

Dr. Joseph Teguh Santoso, M.Kom.

# SEPEDA LISTRIK

Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

# **SEPEDA LISTRIK : Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan**

## **Penulis :**

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom

**ISBN : 9 786235 734828**

## **Editor :**

Muhammad Sholikan, M.Kom

## **Penyunting :**

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

## **Desain Sampul dan Tata Letak :**

Irdha Yuniarto, S.Ds., M.Kom

## **Penebit :**

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan  
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

## **Redaksi :**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : [penerbit\\_ypat@stekom.ac.id](mailto:penerbit_ypat@stekom.ac.id)

## **Distributor Tunggal :**

### **Universitas STEKOM**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : [info@stekom.ac.id](mailto:info@stekom.ac.id)

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit

## KATA PENGANTAR

Puji syukur pada Tuhan Yang Maha Esa bahwa buku yang berjudul “**Sepeda Listrik: Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan**” ini dapat diselesaikan dengan baik. Sepeda listrik merupakan sebuah sepeda yang mempunyai motor listrik sebagai alat bantu gerak. Berbeda dengan sepeda motor listrik, sepeda listrik masih mempertahankan komponen pedal seperti sepeda pada umumnya.

Buku ini terbagi menjadi 8 Bab. Bab pertama buku ini sebagai pengantar tentang sepeda listrik yang akan membahas Sejarah, karakteristik dan kegunaan Sepeda Listrik. Dan harapan sepeda listrik yang akan datang, juga tentang perundang-undangan sepeda listrik. Bab 2 tentang dasar-dasar penggerak listrik, baterai adalah salah satu sumber penggerak sepeda ini, tentang permodelan sepeda, daya yang dibutuhkan, memilih catu daya. Bab 3 membahas tentang sumber tenaga sepeda listrik, dalam hal ini akan membahas lebih khusus tentang catu daya sepeda listrik, karakteristik baterai sel bahan bakar untuk penggerak sepeda listrik. Bab ke 4 dalam buku ini tentang bagaimana cara pengisian baterai, dalam bab ini juga sejarah, fungsi dan karakteristik baterai yang akan digunakan, dibuku ini juga akan dikenalkan tipe sel untuk baterai. Bab ke 5 tentang motor dan pengendali motor dalam buku ini juga menjelaskan tentang prinsip dasar motor listrik, kontrol dan karakteristik sistem penggerak sepeda listrik.

Bab ke 6 menjelaskan tentang desain sistem yang diaplikasikan dalam sepeda listrik, juga dalam bab ini akan memberikan contoh perdagangan sistem sepeda. Bab ke 7 tentang pengukuran efisiensi sepeda listrik termasuk pengukuran daya motor dan mengukur karakteristik dan efisiensi Baterai. Bab terakhir membahas tentang perkembangan sepeda listrik masa depan, tentang perkembangan Sistem sepeda upgrade sumber energi berupa sistem pengisian menggunakan sel surya, dan tentang pengontrol.

Akhir kata semoga buku ini bisa memberikan manfaat serta menambah wawasan baru bagi pembaca tentang sepeda listrik, akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Semarang, September 2022

Penulis

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom, M.Kom.

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Kata Pengantar .....	iii
Daftar Isi .....	iv
<b>BAB 1 SEPEDA LISTRIK: SEJARAH, KARAKTERISTIK, DAN PENGGUNAAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Pendahuluan .....	1
1.2 Sejarah Sepeda .....	2
1.3 Sejarah Sepeda Listrik .....	3
1.4 Beberapa Penggunaan Sepeda Listrik .....	6
1.5 Contoh Sepeda Listrik .....	7
1.6 Masa Depan Sepeda Listrik .....	15
1.7 Peraturan Perundang-undangan yang Mengatur Sepeda Listrik .....	16
1.8 Kesimpulan .....	18
<b>BAB 2 DASAR PROPULSI LISTRIK .....</b>	<b>19</b>
2.1 Pendahuluan .....	19
2.2 Model Matematika Kinerja Sepeda: Daya yang Dibutuhkan .....	19
2.3 Estimasi Daya Motor yang Dibutuhkan .....	26
2.4 Memilih Baterai untuk Biaya Siklus Hidup Minimum .....	31
2.5 Kendaraan Roda Dua Baru yang Unik .....	34
<b>BAB 3 SUMBER LISTRIK UNTUK SEPEDA .....</b>	<b>37</b>
3.1 Pendahuluan .....	37
3.2 Persyaratan Baterai untuk Menghidupkan Sepeda Listrik .....	39
3.3 Karakteristik Baterai yang Sesuai untuk Propulsi Sepeda Listrik .....	41
3.4 Sel Bahan Bakar untuk Menghidupkan Sepeda Listrik .....	64
3.5 Sumber Daya Listrik Baru Terbaik untuk Propulsi Sepeda .....	69
3.6 Sumber Daya Propulsi Sepeda yang Harus Diperhatikan .....	73
<b>BAB 4 PENGISIAN BATERAI .....</b>	<b>75</b>
4.1 Sejarah Teknologi Pengisian Baterai .....	75
4.2 Fungsi Dasar Pengisi Daya Baterai .....	75
4.3 Karakteristik Baterai yang Berkaitan dengan Pengisian Daya .....	76
4.4 Pengisian Baterai Lead-Acid .....	77
4.5 Desain Pengisi Daya untuk Masa Pakai Baterai yang Lama .....	78
4.6 Pengisi Daya Cerdas untuk Baterai Nikel-Kadmium Baru, Nikel-Logam Hidrid, dan Baterai Lithium Baru .....	79
4.7 Baterai Cerdas untuk Pengisi Daya Cerdas .....	89
4.8 Tingkat Self-Discharge Sel Nikel dan Lithium .....	90
4.9 Energi yang Dapat Dipulihkan .....	92
4.10 Pengisi Daya Baterai Panel Surya .....	94
<b>BAB 5 MOTOR DAN PENGENDALI MOTOR .....</b>	<b>96</b>

5.1	Prinsip Dasar Motor Listrik.....	96
5.2	Karakteristik Motor untuk Propulsi Sepeda Listrik .....	104
5.3	Penentuan Rasio Roda Gigi .....	108
5.4	Kontrol Motor .....	114
5.5	Torsi Pedal Digunakan untuk Mengontrol Daya Motor .....	121
<b>BAB 6</b>	<b>DESAIN SISTEM .....</b>	<b>124</b>
6.1	Pendahuluan .....	124
6.2	Menyiapkan Desain Sistem Sepeda Listrik .....	125
6.3	Beberapa Contoh Perdagangan Sistem Sepeda .....	130
6.4	Contoh Desain Sistem .....	134
<b>BAB 7</b>	<b>PENGUKURAN KINERJA .....</b>	<b>145</b>
7.1	Mengukur Daya Propulsi untuk Menentukan Efisiensi Propulsi .....	145
7.2	Mengukur Efisiensi Motor Termasuk Pengukuran Daya Motor .....	148
7.3	Mengukur Karakteristik Baterai .....	150
<b>BAB 8</b>	<b>PERKEMBANGAN UNTUK DIPERHATIKAN .....</b>	<b>155</b>
8.1	Sistem Sepeda .....	155
8.2	Sumber Energi .....	159
8.3	Sistem Pengisian Tenaga Surya .....	161
8.4	Motor Efisiensi Tinggi .....	162
8.5	Kontroler .....	163
	<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>164</b>

# BAB 1

## SEPEDA LISTRIK: SEJARAH, KARAKTERISTIK, DAN PENGGUNAAN

### 1.1 PENDAHULUAN

Kita sering mendengar tantangan: "Mengapa Anda ingin menggunakan sepeda bertenaga listrik ketika tujuan utama sepeda adalah untuk berolahraga?" Tentu saja ini benar ketika setiap orang dapat dengan mudah membuka kunci pintu mobil, masuk, menyalakan mesin, dan pergi. Di tempat kami tinggal, pada hari yang cerah Anda dapat pergi ke jalan setapak di mana Anda akan melihat pelari, skater, dan atlet sepeda berolahraga. Ketika Anda bepergian melintasi negara di jalan raya yang bukan jalan raya, Anda akan melihat sekelompok pengendara sepeda di jalan terbuka dengan keranjang beban penuh dengan bahan pokok, perlengkapan, dan tempat tidur. Mereka mencari petualangan.

Pikirkan kembali, apakah sepeda diciptakan untuk berolahraga? Mungkin tidak, karena pada masa penemuan sepeda, orang mendapatkan latihan mereka dari berjalan ke tempat kerja dan bekerja. Tak lama setelah sepeda tersedia, anak laki-laki Western Union berada di sepeda mengantarkan telegram. Saat ini para peternak di Cina membawa babi hidup ke pasar dengan menggunakan pannier dengan sepeda. Para pekerja di Helsinki, Finlandia, bersepeda ke kantor pusat kota mereka untuk menghindari biaya parkir mobil yang mahal. Di Belanda, 30 persen perjalanan pribadi dilakukan dengan sepeda. Kami menyarankan bahwa menyalakan sepeda dengan motor listrik memiliki manfaat yang sama seperti menyalakan mobil dengan mesin bensin. Kami masih bersenang-senang dengan mobil kami, dan sekarang kami bisa bersenang-senang dengan sepeda bertenaga listrik.

Bicycle tradisional adalah kendaraan roda dua yang digerakkan oleh pengendara yang memberikan tenaga muskular melalui pedal yang memutar salah satu dari dua roda kendaraan. Pengendara menjaga sepeda tetap tegak dengan mengarahkan roda depan untuk menciptakan gaya yang mengembalikan pusat kendaraan jika gravitasi ke zona stabilnya bila diperlukan untuk mencegah terbalik. Sepeda motor saat ini adalah kendaraan roda dua yang digerakkan oleh mesin berbahan bakar. Sebuah sepeda listrik membawa baterai atau sel bahan bakar yang memberikan tenaga listrik ke motor yang digabungkan ke salah satu roda. Pada sebagian besar sepeda listrik pengendara dapat memilih untuk menggunakan tenaga muskular untuk memberikan semua, sebagian, atau tidak ada tenaga penggerak yang diperlukan untuk mempertahankan kecepatan perjalanan yang diadopsinya. Beberapa model bahkan merasakan tekanan pedal Anda dan memerintahkan motor untuk menghasilkan lebih banyak tenaga setiap kali Anda mengayuh dengan keras.

Banyak sepeda listrik yang dirancang dan dibuat khusus untuk perjalanan. Kecepatan perjalanan rata-rata, jika dibandingkan dengan sepeda yang hanya mengayuh, dapat ditingkatkan 8 hingga 10 km/h (5 hingga 6 mph) di atas kecepatan rata-rata orang yang dapat melakukan perjalanan dengan mengayuh.

Pengecualian adalah atlet atau pesaing kelas dunia. Para atlet ini dapat mengayuh sepeda lebih cepat daripada pengendara sepeda biasa yang dapat bergerak dengan sepeda listrik konvensional.

Tujuan kami dalam buku ini adalah sebagai berikut:

1. Jelaskan kinerja sepeda listrik yang tersedia saat ini dan kinerja yang dapat dicapai.
2. Menghitung faktor desain yang mempengaruhi kinerja sepeda listrik dalam hal bobot kendaraan, kecepatan pada kemiringan jalan, dan jarak tempuh yang tersedia antara pengisian ulang baterai atau pengisian bahan bakar sel bahan bakar.
3. Prediksi peningkatan yang akan datang dalam berat dan masa pakai penyimpanan energi teknologi, efisiensi propulsi, dan penggunaan sepeda listrik.
4. Tunjukkan bagaimana penerapan teknik rekayasa sistem saat ini dapat menghasilkan desain sepeda listrik yang memiliki jangkauan perjalanan panjang dan biaya siklus hidup rendah yang membuatnya lebih dapat diterapkan pada kebutuhan perjalanan dunia.

## 1.2 SEJARAH SEPEDA

Pierre Lallent di Prancis pertama kali membuat sepeda roda dua bertenaga pedal pada tahun 1862 dan mendemonstrasikannya pada tahun berikutnya. Pada tahun 1870 jari-jari kawat telah dikembangkan, dan puting untuk mengencangkan jari-jari muncul pada tahun 1874. Pada tahun 1871 James Starley, seorang mandor berusia 67 tahun di Mesin Jahit Coventry, mematenkan sepeda Ariel, yang sebagai opsi menawarkan tuas yang menggandakan jarak tempuh per langkah pedal.

Pada tahun 1880, ketika League of American Wheelmen dibentuk, bicycle "biasa" memiliki roda belakang kecil dan roda depan yang memiliki diameter hingga 5 kaki. Pedal dipasangkan dengan kokoh ke roda depan. Sepeda rata-rata memiliki berat 50 pon, tetapi ada juga yang seringan 21 pon. Dalam "perjalanan abad" pengendara sepeda atletik pada "biasa" mengayuh 100 mil dalam 1 hari selama usia di mana alternatif mandiri adalah hiking, dengan batas praktis 20 mil.

Penggerak rantai dan ban pneumatik, ditemukan oleh John Dunlop pada tahun 1888, memungkinkan sepeda pengaman di mana kedua rodanya berdiameter sama. Sekarang pengendara bisa kapan saja menyentuh tanah dengan kakinya, dan menginjak pedal dengan kecepatan optimal yang berbeda dari kecepatan roda. Ban pneumatik memungkinkan untuk dikendarai di jalan yang kasar dengan kenyamanan yang wajar.

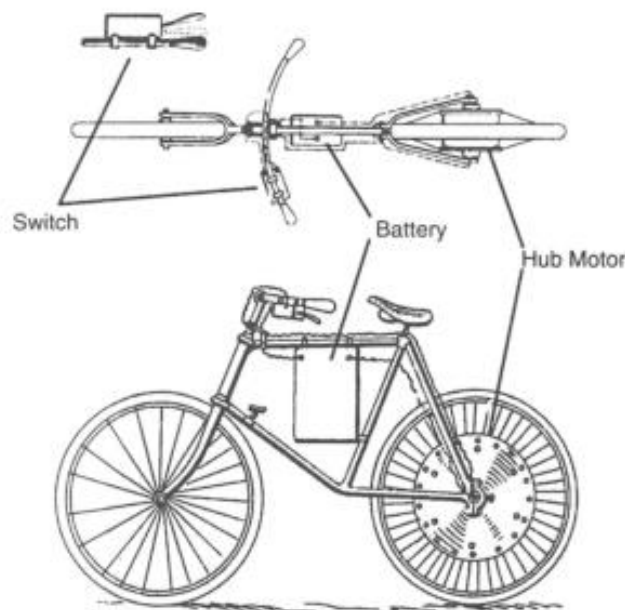
Hub roda belakang The Sturmey Areher, yang berisi rangkaian roda gigi epicyele, juga disebut roda gigi planetary, dipatenkan pada periode 1901 hingga 1906. Dengan hub pertama, pengendara sepeda dapat memilih rasio roda gigi "10" saat mendaki bukit, dan rasio "hi" untuk bersepeda cepat di tanah datar dengan angin ekor. Desain selanjutnya memiliki tiga rasio. Dalam posisi kecepatan tinggi, roda belakang disambungkan secara langsung ke sproket penggeraknya. Versi terbaru mencapai lima rasio kecepatan pedal terhadap kecepatan roda dengan dua set roda gigi planetary.

Hub Sturmey Areher kehilangan popularitas saat perpindahan gigi DeRailleur lebih praktis. Pada sepeda yang dilengkapi DeRailleur, pengendara sepeda dapat memindahkan ehain di antara hingga tujuh sproket "roda bebas" yang memiliki berbagai diameter. Sproket ini digabungkan ke roda belakang melalui eluteh yang berjalan terlalu cepat, yang memungkinkan meluncur ke bawah tanpa pedal diputar oleh rantai. Pengendara sepeda juga dapat memilih salah satu dari tiga sproket "roda rantai" yang memiliki diameter berbeda.

Rakitan roda rantai digabungkan dengan kuat ke engkol pedal. Dengan rasio gigi yang sekarang tersedia, pengendara sepeda dapat mengayunkan pedal pada kecepatan pedal yang menghasilkan kekuatan otot maksimum. Sepeda kemudian bergerak dengan kecepatan di mana semua daya bersih dikonsumsi dalam gaya hambat udara, gesekan, dan pendakian bukit.

### 1.3 SEJARAH SEPEDA LISTRIK

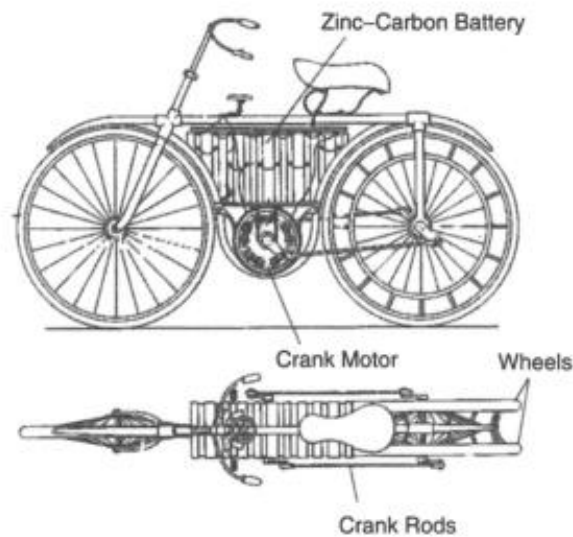
Sepeda listrik pertama kali muncul pada akhir tahun 1890-an. Pada tanggal 31 Desember 1895 Ogden Bolton, Jr., diberikan Paten AS 552271 untuk sepeda bertenaga baterai dengan motor hub arus searah (dc) sikat dan komutator 6 kutub yang dipasang di roda belakang (Gambar. 1.1).



**Gambar 1.1** Sepeda listrik pertama, ditemukan oleh Ogden Bolton, Jr., pada tahun 1895, didorong oleh motor hub gearless di roda belakang dan memiliki baterai 10-V.

Motor tidak berisi roda gigi internal. Itu bisa menarik 100 ampere (A) dari baterai 10-V. Pada tanggal 28 Desember 1897, Hosea W. Libbey dari Boston mengeluarkan US Patent 596272, untuk sepeda listrik yang didorong oleh "motor listrik ganda" yang berada di hub poros engkol (Gambar 1.2). Motor dc sikat dan komutator 5-kutub menggerakkan dua roda belakang yang berjarak dekat, konfigurasi yang telah ditemukan Libbey sebelumnya pada tahun 1893. Patennya menunjukkan batang engkol untuk membawa torsi motor ke roda belakang. Namun, ia segera mengadopsi roda sproket dan penggerak rantai untuk menyalurkan tenaga ke roda belakang. Dia juga menggunakan baterai ganda, terdiri dari sel silinder dengan partisi pusat, yang dia temukan pada April 1895. Setengah dari baterai akan digunakan untuk perjalanan di tanah datar, dan kedua bagian digunakan saat mendaki bukit. Asam baterai diisi ulang dari reservoir yang dipasang di bawah kursi pengendara. Sebuah kain jenuh dengan asam sulfat encer memisahkan pelat baterai. Ini menghindari tumpahnya asam sulfat.

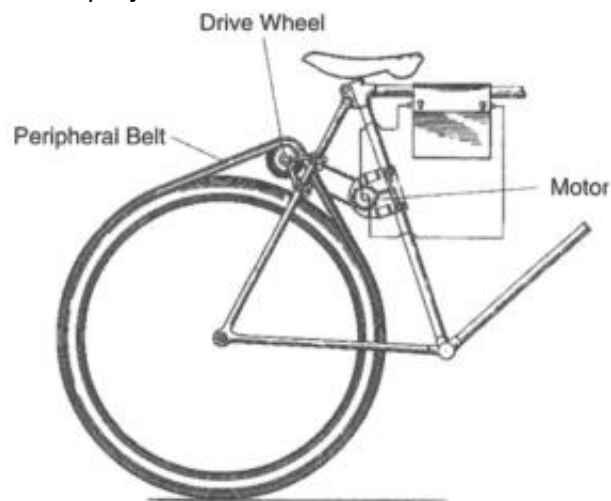




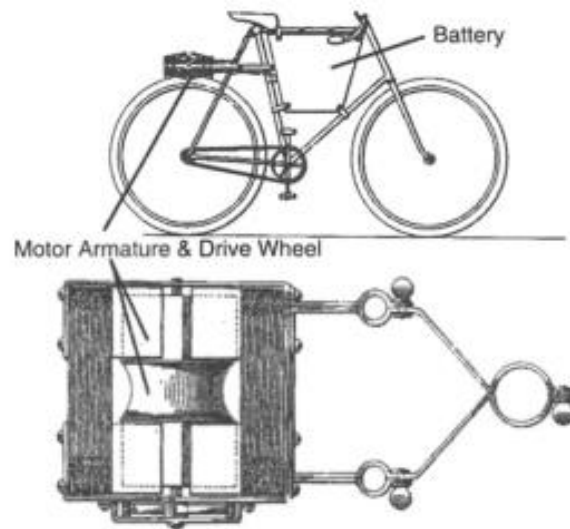
**Gambar 1.2** Penemuan Hosea Libbey, V.S. Paten 596.272, dari "sepeda listrik bertenaga motor hub poros engkol," pada tahun 1897, menampilkan batang engkol yang memasangkan roda belakang kembar ke motor.

Pada tahun 1898 di Chicago, Illinois, Mathew J. Steffens menemukan sepeda listrik di mana sabuk penggerak dikendarai di pinggiran roda asli (V.S. Patent 613752). Sabuk bundar berjalan di alur ban dan menghilangkan masalah selip sabuk dengan menerapkan gaya pada kontakannya dengan tanah (Gambar 1.3). Motor, dipasang pada tiang kursi, menggerakkan katrol sabuk melalui roda sproket dan rantai sproket. Steffens mengatakan idenya dapat diterapkan pada "becak dan kendaraan sejenis lainnya".

John Schnepf di New York mematenkan desain di mana katrol pada poros motor memberikan tenaga penggerak ke permukaan atas roda belakang sepeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.4. V.S. Nomor patennya adalah 627066. Dia juga menyarankan agar baterai dapat diisi oleh motor yang berfungsi sebagai dinamo saat sepeda meluncur menuruni bukit. Namun, dia mengakui bahwa baterai juga membutuhkan sarana normal untuk mengisi penuh setelah perjalanan.



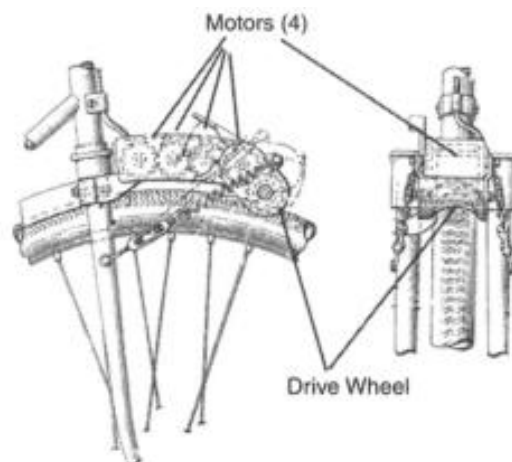
**Gambar 1.3** Penemuan Mathew J. Steffen, Paten A.S. 613.732, dari "sepeda listrik penggerak sabuk tepi roda", pada tahun 1898. Permukaan luar sabuk penggerak menghasilkan tenaga penggerak di permukaan jalan.



**Gambar 1.4** penemuan Iohn Schnepfs, V.S. Paten 627.066, pada tahun 1899, adalah "sepeda listrik penggerak roda gesekan".

Pada tahun 1969 G. A. Wood, Jr., mengembangkan penggerak roda gesekan di V.S. Paten 3.431.994. Dia menggunakan beberapa motor tenaga kuda subfraksional, masing-masing dinilai kurang dari 4 tenaga kuda. Empat motor digabungkan bersama untuk menggerakkan roda depan sepeda melalui roda penggerak gesekan yang mendorong roda depan sepeda. Setiap motor menggerakkan penggerak gesekan melalui serangkaian rangkaian yang terhubung seri roda gigi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Penginderaan torsi dan kontrol daya yang dipasang oleh motor dikembangkan pada akhir 1990-an. Takada Yutka dari Suwa, Jepang, mengajukan paten pada tahun 1997 untuk sistem semacam itu. Shu-Shian dari Taipei dan lainnya mengikuti hirn pada tahun 2001.

Pada 1920-an roda sepeda belakang dengan mesin bensin integral ditawarkan. Juga, mesin kecil yang didukung pegangan-bar dijual untuk menggerakkan roda depan dengan roller penunggang ban. Mesin yang lebih besar dipasang di antara kaki pengendara pada kendaraan yang disebut "motorcycles." Hugo Gernsback mengusulkan propulsi sepeda listrik di majalah *Science and Invention*-nya Januari 1924. Konsepnya menampilkan kabel bawah tanah yang memancarkan daya frekuensi radio (RF), dikumpulkan oleh antena di sepeda.



**Gambar 1.5** G.A. Kayu, Jr.'s, penemuan, V.S. Paten 3.431.994, dalam 1969 untuk "penggunaan ganda motor tenaga kuda subfraksional untuk menggerakkan sepeda listrik."

Pada tahun 1992 Vector Services Limited menawarkan eleetrie bicyele praetieal, Zike. Baterai nikel-kadmium yang terpasang pada anggota rangka dan motor magnet permanen 850-g mendukungnya. Zike memiliki panjang 115 em (45,3 inci) dan tinggi 100 em (39,4 inci). Beratnya 24 pon dan dapat membawa pengendara dengan berat "hingga 17 batu." Dengan Zike melakukan semua pekerjaan, jangkauannya adalah "hingga satu jam berkendara." Membuat Zike melakukan sebagian besar pekerjaan akan memperluas jangkauan hingga setengah jam. Mengayuh secara normal, dengan bantuan Zike di perbukitan dan saat angin sakal kuat, memberikan 3 jam perjalanan dengan sekali pengisian daya baterai. Teknologi lain untuk meningkatkan sepeda listrik berikutnya diusulkan pada [1].

#### **1.4 BEBERAPA PENGGUNAAN SEPEDA LISTRIK**

Kemungkinan penggunaan sepeda listrik termasuk rekreasi ulang, perjalanan ke tempat kerja, pengiriman barang dan jasa, dan membangun komunikasi dengan desa-desa terpencil di negara berkembang.

##### **Rekreasi**

Propulsi eleetrie dapat meningkatkan jarak yang dapat ditempuh oleh orang yang lemah secara fisik dengan sepeda. Namun, sebagian besar pengendara sepeda rekreasi di Amerika termotivasi oleh (1) keinginan untuk menjaga kondisi fisik pengendara sepeda dan (2) tantangan untuk mencapai tujuan yang tidak biasa. Misalnya, setiap tahun klub sepeda di Washington dan Oregon mensponsori perjalanan 2 hari dari Seattle ke Portland dengan kecepatan 193 m. Tantangan ini biasanya menarik sekitar 10.000 pengendara sepeda di awal musim panas setiap tahun.

##### **Perjalanan ke Tempat Kerja**

Dalam kemacetan lalu lintas di jalan bebas hambatan yang dipenuhi eommuter, mobil-mobil yang bergerak lambat menimbulkan polusi udara lokal. "Rel ringan," adalah solusi yang diusulkan. Namun, ia menawarkan fitur ketidaknyamanan pengendara yang sama yang membuat kereta antar kota bangkrut pada 1930-an. Mengemudi langsung dari garasi ke tempat kerja jauh lebih menyenangkan daripada alternatif berjalan di tengah hujan ke adepot, naik kereta yang berhenti setiap mil atau lebih untuk menjemput penumpang, dan kemudian pindah ke bus untuk perjalanan terakhir joumey.

Portland, Oregon, Rp 3.210.000 juta MAXI eommuting rel ekspansi mengilustrasikan intinya. Pernyataan dampak lingkungan memperkirakan bahwa pengendara akan tumbuh dari 24.000 per hari menjadi 42.500 pada tahun 1988. Penumpang sebenarnya turun menjadi 18.000 pada tahun 1988. Sementara itu, penggunaan jalan bebas hambatan harian di wilayah Portland tumbuh menjadi 4 juta kendaraan per hari. Rupanya setiap pemilih yang menyetujui obligasi MAXI mengharapkan jalan bebas hambatan dibersihkan untuk mengemudi sendiri [2].

Kandungan polutan udara yang tinggi di zona pusat kota tidak akan dikurangi dengan menerapkan pengendalian emisi yang lebih banyak dan lebih ketat pada pembangkit listrik tenaga uap dan pembangkit listrik tenaga uap di luar kota kami. Kebijakan yang efektif akan membatasi jumlah mesin mobil di zona pusat kota, baik dengan hambatan atau biaya parkir yang tinggi. Kemudian pilihan para komuter adalah naik angkutan umum atau bersepeda. Di kota-kota di Eropa dan Asia, jalur sepeda yang ramai menunjukkan bahwa sepeda bisa menjadi pilihan yang lebih baik.

Dalam perjalanan, sepeda listrik bisa berguna. Dengan meningkatkan kecepatan perjalanan dapat membuat jalur sepeda lebih produktif. Misalnya, satu jalur jalan bebas hambatan, bila diubah menjadi penggunaan sepeda, dapat mengantarkan 8000 komuter per jam. Jalur ini hanya dapat mengantarkan 2.000 mobil per jam jika mereka melakukan perjalanan dengan kecepatan optimal 35 mil (56 km) per jam [3].

#### **Pengiriman Barang dan Jasa**

Di Jerman, karena pekerja pos yang menua, pengusaha pos menyimpulkan bahwa sepeda listrik akan membantu pengiriman surat lebih cepat dan lebih mudah. Di Shanghai satu perusahaan pizza mengirimkan produknya dengan bantuan sepeda listrik.

#### **Aplikasi Polisi dan Tentara**

Polisi dengan sepeda dapat secara diam-diam dan cepat berpatroli di tempat-tempat umum di perkotaan. Sepeda bertenaga listrik menambah kecepatan dan daya tahan polisi. Polisi di mobil patroli jelajah meninggalkan panggilan pengadilan dengan denda yang ditunjukkan pada mobil yang diparkir di tempat di mana waktu parkir telah berakhir. Ini bukan prosedur yang efisien karena polisi harus mencari tempat untuk memarkir mobil patrolinya di zona pusat kota yang padat dan berjalan ke lokasi pelaku. Sepeda listrik memecahkan masalah ini. Polisi dapat menyandarkan sepeda pada tiang penyangga meteran dan menulis surat panggilan kepada pemilik mobil yang parkir liar. Juga agen yang mengendarai sepeda listrik dapat dengan cepat mengumpulkan koin yang disimpan dari meteran.

#### **Membuka Komunikasi 10 Daerah Terpencil**

Di negara berkembang, penggunaan sepeda listrik yang penting segera dapat membuka komunikasi ke desa-desa terpencil untuk membangun peluang pendidikan. Siswa yang menjanjikan kemudian dapat pergi ke sekolah. Mengganti suku cadang yang rusak, aus, atau rusak dalam suatu kecelakaan bisa memakan biaya yang mahal di komunitas yang hanya memiliki beberapa lusin kendaraan. Sepeda listrik dapat meringankan kekurangan jumlah kendaraan yang memadai. Jika jalan yang memadai untuk mobil tidak tersedia, sepeda listrik dapat membuat perjalanan di jalan setapak lebih tertahankan.

### **1.5 CONTOH SEPEDA LISTRIK**

Contoh sepeda bertenaga listrik yang tersedia secara komersial ditunjukkan pada Gambar 1.6. Tiga foto pertama menunjukkan (a) LA Freezzz buatan Giant Bicycle (Amerika Serikat), (b) model Power Cycle 550 buatan Mirada Bikes (Taiwan), dan (c) Enviro buatan EV Global (Amerika Serikat). Sepeda pada Gambar 1.6a, 1.6b, dan 1.6c mengilustrasikan apa yang disebut secara umum sebagai desain "langkah-langkah" yang jelas. Kendaraan ini memiliki desain rangka yang telah dikembangkan secara khusus untuk digunakan sebagai sepeda bertenaga listrik. Gaya rangka yang lebih konvensional, tetapi khusus dibuat untuk penggunaan sepeda listrik, ditunjukkan pada Gambar 1.6d.

Ini adalah model Siklus Daya 500. Tiga sepeda, (Gbr. 6.1a, 6.1h, dan 6.1d), menggunakan motor yang dipasang di dekat poros engkol pedal. Motor mengirimkan daya ke poros engkol melalui gearbox dan kopling roda bebas sehingga daya dapat dibagi antara motor dan gaya yang diberikan pengendara pada pedal engkol. Masing-masing model ini menyalurkan tenaga ke roda belakang melalui hub empat kecepatan internal di roda belakang. Masing-masing

memiliki baterai yang dipasang baik di belakang atau di depan tiang yang menopang pengendara.



(a)



(b)

**Gambar 1.6** Empat sepeda listrik yang tersedia secara komersial: (a) LA Freezzz, (h) Model Siklus Daya 306, (e) Enuice, dan Cd) Model Siklus Daya 500.



(c)



(d)

**Gambar 1.6** lanjutan.

Model yang tersisa, pada Gambar 1.6c, memiliki motor hub yang berada di dalam bagian tengah roda belakang. Dengan demikian motor memberikan tenaga langsung ke roda. Baterai dipasang pada bingkai monotube miring, yang ditutupi dengan fairing plastik yang dicetak. Sebuah foto close-up dari motor hub ditunjukkan pada Gambar 1.7. Motor hub memiliki lengan reaksi torsi yang diikat di antara rangka sepeda dan poros motor. Selain itu, alih-alih angker motor berputar, medan motor berputar. Dalam arti praktis, roda sepeda berputar pada kecepatan yang relatif lambat, sehingga gigi internal diperlukan untuk menyesuaikan kecepatan motor optimal dengan kecepatan roda. Motor dapat dirancang untuk berputar dengan kecepatan rendah. Namun, efisiensi motor yang berputar pada kecepatan rendah jauh lebih rendah daripada motor kecepatan tinggi yang menghasilkan output daya yang sama. Juga, motor kecepatan lambat akan lebih berat daripada motor kecepatan tinggi dengan persneling pengurangan kecepatannya. Sepeda ini dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 1.1.

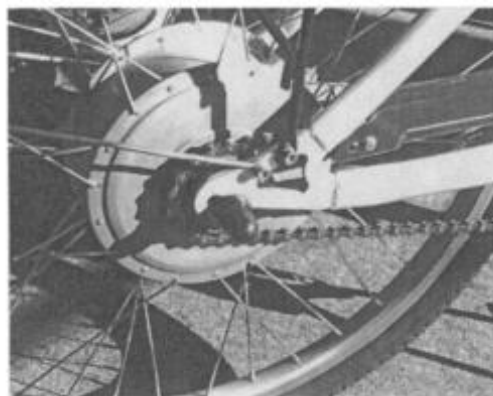
**Tabel 1.1** Kinerja 01 Sepeda Eledric Yang Diproduksi Tahun 2004<sup>a</sup>

Maker and Name	Design	Motor Power	Travel Distance	Maximum Speed	Battery Voltage	Battery Capacity	Battery Energy	Battery Type	Remarks
		W	km	km/h	V	Ah	Wh		
<b>Electric Bikes (United States)</b>									
Currie E-Ride		250	32	32	24	17	408	L-A	20 and 16-inch models
Currie E-Folder	E-Bike	250	32	32	24	17	408	L-A	
ETC Ne Century	E-Bike	250	21	21	24	12	288	L-A	
ETC Traveler	E-Bike	250	19	21	24	12	288	L-A	
EV Global Folding Mini E-Bike		400	19	24	36	7	252	Li Polymer	Standard option
EV Global Folding Mini E-Bike		400	39	24	36	14	504	Li Polymer	Extended range option
EV Global LE	E-Bike	500	32	29	36	8	288	L-A	
EV Global Police PE	E-Bike	500	32	29	36	8	288	L-A	
Optibike 400	E-Bike (1)	400	na	32	36	12	432	NiMH	34 mph with gearing
Rabbit Tool USA Drive Electric Bike Systems 3-Wheeler	Pedelec/E-Bike (2)	500	32	32	24	8	192	NiMH	12 Ah option
Giant Lite	Pedelec	240	48	23	48	7	336	L-A	Taiwan
Panasonic Electric Hybrid Folder	Pedelec	240	37	29	24	6.5	156	NiMH	
Panasonic Electric Hybrid Folder	Pedelec	240	29	24	24	3.5	84	NiCd	
Aprilia Enjoy	Pedelec			24	24	2.6	62	NiMH	
Merida PowerCycle	Pedelec	250	40	25	24	13	312	NiMH	Italy
ZVO Power X	Drive on Dahon	230	40	24	24	9	216	NiMH	Taiwan
		400	32	32	24	7	168	NiMH	
<b>Electric Bikes (Canada)</b>									
Procycle Mikado	Pedelec	250	20	24	24	5	120	Ni-Cd	(5)
Energy & Propulsion Systems	Pedelec	250	24	32	24	8	192	NiMH	(6)
<b>Electric Bikes (Europe)</b>									
Prima Joe Fly	Pedelec	250	25	24	36	5	180	L-A	Cyclon Italy
Prima Runner	Pedelec	250	25	24	36	5	180	L-A	Cyclon Italy
Prima Yello Dream	Pedelec (3)	250	25	24	36	5	180	L-A	Cyclon Italy
Aprilia Enjoy	Pedelec	250	40	25	24	13	312	NiMH	Italy
Bikit	Folding Pedelec	100	32	18	24	7	168	L-A	Israel
Elektromobilbau Schachner	Pedelec/E-Bike	400	40	24	36	5	180	NiCd	Austria
Sparta Pharos	Pedelec (4)	250	40	24	24	7	168	L-A	Holland
Velocity Dolphin	Pedelec	270	20	30	24	7	168	NiCd	Switzerland
Blackpowder									
Heinzmann Estelle Comfort	Pedelec/E-Bike	400	27	21	36	5	180	NiCd	Germany
Piaggio Albatross	Pedelec	250	30	24	36	5	180	L-A	Italy
Yoker City	Pedelec	240	25	24	24	7	168	L-A	Germany
<b>Electric Bikes (China)</b>									
Tianjin Flying Pigeon	E-Bike	180	40	20	36	12	432	L-A	
Wuhan Yunhe	E-Bike	150	50	20	24	22	528	L-A	
Toprun Little Princess	Pedelec	180	60	28	36	5	180	NiCd	
Sunpex Swan	E-Bike	150	32	22	24	12	288	L-A	
SUEL Jet Bike	Pedelec	150	30	20	24	7	168	NiMH	
Changjie Electric Bicycle TD H09Z	E-Bike	160	50	20	36	6	216	L-A	

**Tabel 1.1** Kinerja 01 Sepeda Listrik Yang Diproduksi Tahun 2004- lanjutan

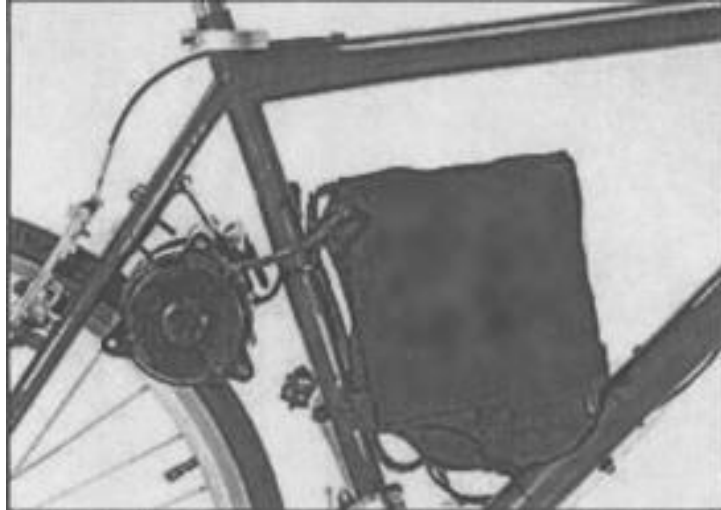
Maker and Name	Design	Motor Power	Travel Distance	Maximum Speed	Battery Voltage	Battery Capacity	Battery Energy	Battery Type	Remarks
		W	km	km/h	V	Ah	Wh		
<b>Electric Bikes (United States)</b>									
Changjie Electric Bicycle TD H10Z	Folding E-Bike	160	40	20	24	12	288	L-A	
Suzhou Small Antelope	E-Bike	180	40	20	36	12	432	L-A	
T & DI Continent Dove	E-Bike	180	55	20	36	12	432	L-A	
T & DI Gentle Breeze	E-Bike	180	45	20	36	12	432	L-A	
Zhejiang Wolong	E-Bike	150	50	20	12	12	144	L-A	
Hengbo King Ring	E-Bike	250	50	20	36	7	252	L-A	
Shanghai Forever Career	E-Bike	180	50	20	36	12	432	L-A	
Xingyueshen LanFeng	E-Bike	150	45	20	36	12	432	L-A	
Hangzhou Qianjiang-Gear Gold Algret	E-Bike	180	50	20	36	12	432	L-A	
Jingcheng TDN32Z	E-Bike	200	60	80	36	12	432	L-A	
Hangzhou Dongking QunFang	E-Bike	180	50	20	36	12	432	L-A	
<b>Electric Bikes (Japan)</b>									
Miyata GoodluckAlumni 26	Pedelec	235	20	15	24	3.6	86	NiCd	
National Elegant ViVi-L	Pedelec	240	23	15	24	2.8	67	NiMH	
Bridgestone Assista Superlight	Pedelec	235	25	15	24	3.6	86	NiCd	
Yamaha PAS Super Light	Pedelec	235	20	15	24	3.6	86	NiCd	
Honda Step Combo	Pedelec	235	30	24	24	3.6	86	NiMH	
Suzuki Love SNV 24	Pedelec	240	35	15	24	2.8	67	NiMH	
Sanyo Enacle Leger	Pedelec	250	36	15	36	2.4	86	NiCd	
Mitsubishi Bicic	Pedelec	235	41	24	24	4.5	108	NiCd	
Maruishi Frackers Como Assist	Pedelec	235	25	15	24	3.6	86	NiCd	
<b>Electric Bikes (Tawian)</b>									
Merida Powercycle	Pedelec	230	40	24	24	9	216	NiMH	
Giant LaFree Twist	Pedelec	240	37	29	24	6.5	156	NiMH	Taiwan
Soleus SEB-26S	E-Bike	250	24	35	24	12	288	L-A	
Eleon GP-26MTB	E-Bike	300	30	25	24	17	408	L-A	
Cosmos Ocean EZ-1	E-Bike	250	20	24	36	4.4	158	NiCd	
<b>Averages =</b>		251	35	24	29	8.49	246		

Gambar 1.8 dan 1.9 menunjukkan lebih banyak contoh sepeda listrik komersial. Gambar 1.8 menunjukkan motor dan baterai yang dipasang pada desain rangka sepeda yang lebih konvensional oleh ZAP (Amerika Serikat) pada model DX-nya. Kedua motornya menggerakkan roda sepeda melalui kenop knurled yang menekan roda belakang. Pengendara harus mengayuh pedal untuk mengaktifkan motor. Beberapa model menggunakan motor tunggal. Gambar 1.9 menunjukkan kit yang dapat dibeli untuk dipasang ke sepeda. Sistem ZAP sedang diadopsi oleh beberapa pasukan sepeda polisi. Model rangka sepeda lipat ditunjukkan pada Gambar 1.10.



**Gambar 1.7** Motor penggerak di dalam hub memiliki medan putar yang digabungkan ke hub dengan roda gigi pengurang kecepatan. Lengan reaksi torsi memasangkan angker motor ke rangka sepeda.

Propulsi listrik tersedia bahkan di sepeda telentang, seperti BikeElectric. Kami telah membuat tiga roda telentang, dengan dua roda belakang dan satu roda depan yang lebih kecil, dan melapisi bingkai dengan fabrie plastik. Kami mengendarai roda belakang kiri dengan rantai melalui pemindah gigi Sturmey Areher dan mendorong roda belakang kanan dengan pedal melalui pemindah gigi Sturmeier lainnya. Kami membuat rekor untuk konsumsi energi tingkat rendah di Seattle-to-Portland Bicycle Classic pada tahun 1996.



**Gambar 1.8** Kit DX yang ditawarkan oleh ZAP USA, tersedia bagi pemilik yang memutuskan untuk menambahkan penggerak listrik ke sepedanya. Poros keluaran motor bertenaga baterai mendorong permukaan ban belakang. Baterai ada di dalam tas "ZAP". (Dengan izin dari ZAP, Santa Rosa, CA, Zapworld.com)



**Gambar 1.9** Kit sepeda ZAP SX, yang ditawarkan oleh ZAP USA, adalah kotak kuning yang berisi lampu depan, baterai, dan motor dengan poros keluaran yang mendorong permukaan luar ban depan sepeda.



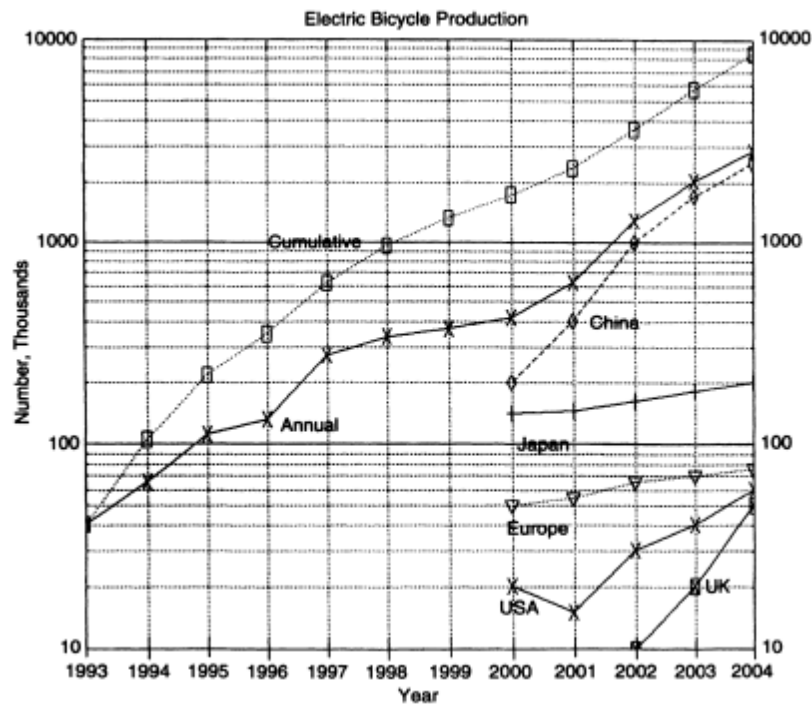


**Gambar 1.10** Motor hub di roda belakang mendorong sepeda listrik lipat ZAP World.COM yang dirancang untuk pelancong

Karakteristik yang paling relevan dari beberapa sepeda bertenaga listrik komersial yang tersedia baru-baru ini dirangkum dalam Tabel 4 yang disusun oleh Jamer son [4]. Ketika kami memulai penelitian kami tentang sepeda bertenaga listrik pada akhir tahun 1992, hampir tidak ada sepeda listrik komersial yang tersedia. Pada awal 1998 setidaknya ada 49, seperti yang ditunjukkan oleh Jamerson [5], [6]. Gardner [7] mengamati bahwa meskipun produksi sepeda menurun dari puncaknya sebesar 107 rnil unit per tahun pada tahun 1995, produksi sepeda listrik terus meningkat. Data tersebut dan data dari Ed Benjamin [8] menunjukkan bahwa produksi sepeda listrik telah tumbuh dan diperkirakan akan tumbuh pada tingkat sekitar 35 persen per tahun selama periode satu tahun dari 1993 hingga 2004. Benjamin melaporkan bahwa ada 160 manufaktur peserta pameran di Shanghai Cycle Show 2003. Prediksinya diplot pada Gambar 1.11, yang menunjukkan bahwa Republik Rakyat Cina mendominasi dalam produksi sepeda listrik. Data terbaru menunjukkan bahwa produksi sepeda China telah tumbuh menjadi 1,6 juta per tahun, pada tahun 2002.

Kami juga mencatat beberapa perbedaan dalam meninjau kinerja sepeda listrik yang diproduksi di dunia, seperti yang dilaporkan dalam Tabel 1.1 dari Benjamin [8]. Salah satunya adalah ketika baterai NiMH dan NiCd digunakan sebagai pengganti baterai timbal-asam, kapasitas baterai berkurang. Insentif utama untuk ini adalah untuk menghindari perubahan biaya kendaraan. Dengan demikian, jarak tempuh dikorbankan untuk menghindari kenaikan harga jual kendaraan. Kedua, kami memperhatikan bahwa sebagian besar produsen D.S. menawarkan lebih banyak kit daripada rakitan sepeda lengkap. Alasannya bisa karena penghematan biaya, membatasi eksposur kewajiban pabrik, atau relatif kurangnya minat pada sepeda bertenaga listrik di Amerika Serikat.

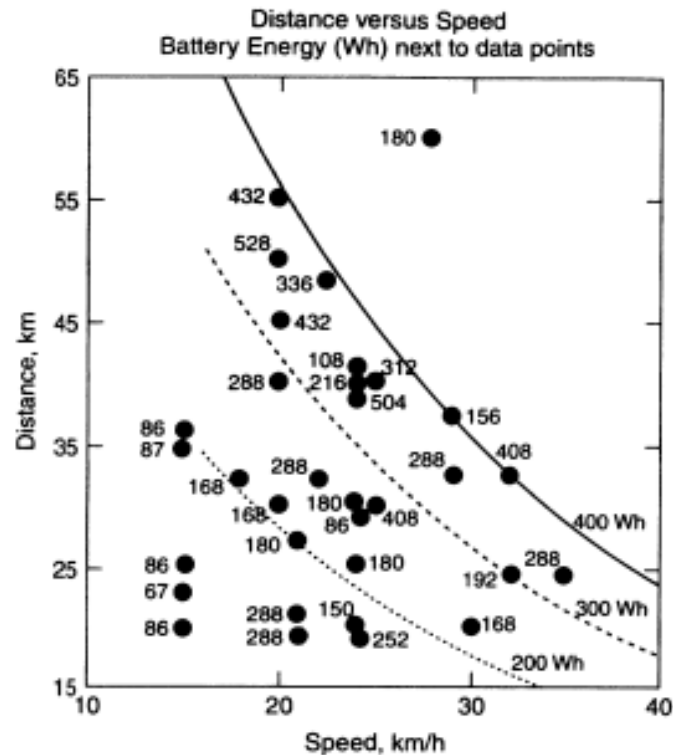
Perbedaan lain adalah bahwa kecepatan tertinggi sepeda AS umumnya berkisar antara 25 hingga 35 km/h, sedangkan di negara lain berkisar antara 15 hingga 25 km/h. Juga sepeda buatan China umumnya memiliki harga di bawah harga rata-rata dunia. Perbedaan lain bagi pengguna adalah pada Gambar 1.12, yang menunjukkan kemampuan jarak yang dinyatakan pabrik sebagai fungsi dari kecepatan perjalanan. Di sebelah titik data ditunjukkan kapasitas energi, dalam watt-jam (Wh), dari baterai untuk sepeda yang merespons.



**Gambar 1.11** Perkiraan produksi sepeda listrik. Data penjualan Benjamin [8] untuk tahun 2000 hingga 2004 digabungkan dengan data produksi Gardner [7] untuk tahun 1993 hingga 2000.

Kapasitas baterai ini adalah produk dari tegangan baterai nominal dan rating ampere-jam. Overlay ke titik data adalah satu set kurva parameter, untuk kinerja teoritis, dengan asumsi tiga nilai energi, dalam watt-jam. Kami menemukan bahwa performa sepeda listrik sering dilebih-lebihkan saat membandingkan titik data dengan kurva. Hal ini terutama berlaku untuk titik data yang ditunjukkan untuk kecepatan sekitar 28 km/h dan jarak 60 km menggunakan energi 180 Wh. Sepeda listrik buatan China ini adalah sepeda yang motornya tidak bisa jalan kecuali pengendaranya mengayuh pedalnya (Pedelec). Tidak diragukan lagi, sebagian besar distansi dilalui dengan mengayuh. Eurve dihitung menggunakan prosedur, yang dijelaskan dalam Bab 2, untuk perjalanan rata pada ketinggian permukaan laut untuk pengendara 75 kg (165 lb) dengan bicycle 36 kg (80 lb). Kurva didasarkan pada efisiensi sistem 100 persen. Kami telah menemukan bahwa efisiensi sistem umumnya dalam kisaran 55 hingga 65 persen. Beberapa rata-rata yang menarik dapat dihitung dari data pada Tabel 1.1.

Misalnya, daya motor rata-rata adalah 250-W, kapasitas baterai rata-rata adalah 8,5 Ah, dan energi terkait yang disimpan dalam baterai adalah sekitar 250 Wh. Kecepatan rata-rata 24 km/h dan jarak tempuh 34 km.



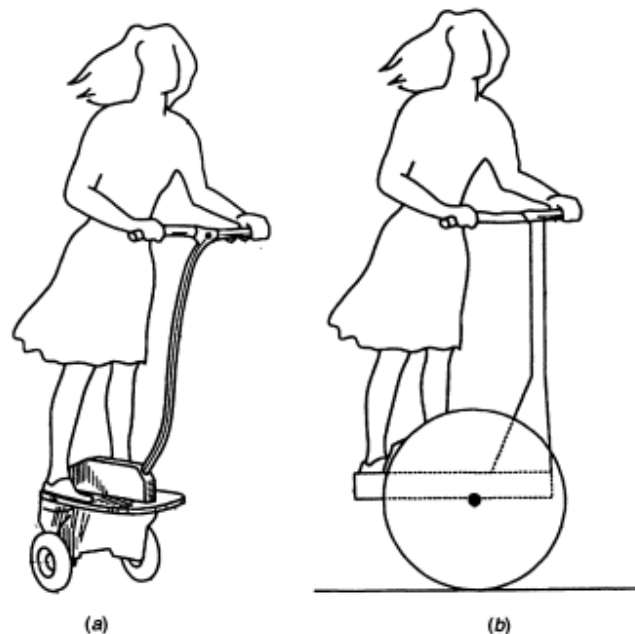
**Gambar 1.12** Jarak tempuh versus kecepatan untuk sepeda listrik pabrikan yang representatif. Nilai kapasitas energi baterai dalam watt-jam ditempatkan di sebelah titik data jika memungkinkan. Garis grafik menunjukkan nilai teoretis yang dihitung dengan asumsi efisiensi sistem 100 persen dan kedalaman pengosongan 100 persen untuk baterai yang memiliki kapasitas energi yang ditunjukkan dalam watt-jam.

### Skuter Listrik

Sepupu dekat dengan sepeda bertenaga listrik adalah skuter bertenaga listrik, yang merupakan kendaraan roda dua yang tidak memiliki alat penggerak bertenaga manusia. Ini memiliki platform di mana pengendara berdiri di beberapa desain atau duduk di desain lain. Roda biasanya berdiameter lebih kecil daripada yang ada di sepeda. Ukuran skuter berkisar dari yang dapat dibawa dengan satu tangan hingga yang lain yang terlalu berat untuk diangkat oleh rata-rata orang. Skuter listrik yang lebih kecil bergerak dengan kecepatan sepeda listrik. Yang lebih besar melakukan perjalanan dengan batas kecepatan jalan kota. Produksi dunia skuter listrik kecil telah menjadi urutan besarnya kurang dari sepeda listrik. Namun, penjualan skuter tumbuh pada tingkat sekitar 47 persen per tahun. Ini jauh lebih tinggi dari tingkat pertumbuhan penjualan sepeda listrik. Di Amerika Serikat skuter listrik kecil memiliki popularitas yang lebih besar daripada sepeda listrik. Produk baru adalah Segway, skuter yang distabilkan secara elektromekanis di mana pengendara berdiri tegak di atas platform di antara dua roda (Gambar. 1.13). Roda Bach digerakkan oleh motor listrik. Skuter mempertahankan platform yang rata saat melewati variasi medan-lereng. Pengendara mengontrol fungsi berhenti dan memulai dengan mencondongkan tubuh ke depan atau ke belakang, atau memutar pegangan tegak di arah yang sesuai. Ini dirancang untuk digunakan di trotoar pejalan kaki. Ini memiliki pegangan untuk menyesuaikan kecepatannya.

Segway adalah mesin yang relatif mahal dengan jumlah pendapat negatif dan positif yang mungkin sama tentang utilitas dan keamanannya. Kesederhanaan bukanlah keahliannya.

Filosofi desain menggunakan dua roda berdampingan membutuhkan sistem stabilisasi yang kompleks. Sebaliknya, sepeda dengan dua roda tandem mudah diseimbangkan saat bepergian. Segway memiliki berat 80 lb (36 kg) dan kecepatan tertingginya adalah 12 mph (19 km/jam) dan memiliki kemampuan jarak tempuh 11 mil (18 km). Analisis kinerjanya dalam uji panjat bukit diberikan dalam Bab 2.



**Gambar 1.13** Segway, skuter yang distabilkan secara elektromekanis: (a) dari V.S. Paten 6.367.817 B, Kamen dkk., 9 April 2002 dan (b) dari V.S. Paten 6.543.564 BI, Kamen dkk., 8 April 2003.

## 1.6 MASA DEPAN SEPEDA LISTRIK

Ekonomi, biaya bensin dan solar, dan polusi udara akan mempengaruhi penggunaan sepeda listrik dan sepeda pada umumnya. Harga bahan bakar saat ini di beberapa negara terkait dengan biaya produksi dan di negara lain dengan kebutuhan untuk mengendalikan impor. Harga bahan bakar di masa depan akan dipengaruhi oleh habisnya cadangan minyak bumi dan gas alam, dan kebutuhan untuk membatasi (1) pencemaran lingkungan dan (2) pembentukan karbon dioksida.

Pencemaran atmosfer oleh kendaraan bermotor di kota-kota hanya dapat dicegah dengan melarang kendaraan-kendaraan ini di zona pusat kota. Salah satu jenis bus, yang digunakan di Seattle, didorong oleh mesin diesel saat bepergian di pinggiran kota dan oleh tenaga troli listrik di terowongan pusat kota. Bus dan rel ringan menderita dari fitur ketidaknyamanan pengguna yang jarang disebutkan, yang mendorong rel kereta listrik antar kota bangkrut pada 1930-an. Sekali lagi sepeda, dan terutama yang bertenaga baterai listrik, dapat menjadi kendaraan umum untuk bepergian ke tempat kerja di pusat kota.

Masalah dalam membawa setiap hari satu juta orang untuk bekerja di pusat kota yang dipenuhi gedung pencakar langit di kota besar mudah diidentifikasi. New York City membangun jaringan kereta bawah tanah yang berguna dengan tenaga kerja imigran pada saat pertanyaan lingkungan tidak menunda pembangunan. Hari ini pengendara kereta bawah tanah menggerutu tetapi memilih untuk tidak pergi bekerja di bus atau mobil. Jaringan kereta

bawah tanah yang memberi makan zona pusat kota tidak akan berfungsi di Los Angeles atau Seattle di mana majikan besar berada di pinggiran kota terpencil.

Kita dapat melihat ke kota-kota Eropa dan Cina untuk melihat bahwa bersepeda ke tempat kerja adalah solusi yang berhasil. Setiap hari di Shanghai lebih dari satu juta orang bersepeda ke tempat kerja. Ketersediaan sepeda listrik akan semakin meningkatkan sepeda untuk komuter ke tempat kerja. Jalur jalan bebas hambatan yang dibangun untuk mobil dapat dengan mudah diubah menjadi jalur sepeda, melipatgandakan kapasitas angkutan komuternya. Alternatif untuk melipatgandakan jumlah jalur mobil akan membutuhkan kebuntuan lingkungan yang tidak ada harapan. Trotoar dan jembatan hanya perlu membawa pengendara sepeda yang beratnya masing-masing kurang dari 300 pon, daripada mobil dan bus multiton. Pegangan sepeda untuk bekerja dapat dibuat lebih nyaman dengan penutup hujan di atas jalur sepeda (lihat Bab 8). Infrastruktur pendukung dapat mencakup stasiun pengisian yang dioperasikan dengan koin di tempat kerja.

Kereta komuter yang berhenti pada interval yang sering mengakibatkan perjalanan yang lambat dari rumah di pinggiran kota ke tempat kerja di pusat kota. Salah satu solusinya adalah membuat pemisahan yang lebih besar antara stasiun dan garasi parkir untuk komuter lokal yang berkendara dari klakson ke stasiun. Di salah satu stasiun semacam itu di Virginia, pada pukul 9:00 pagi, pada hari kerja garasi parkir penuh, dan setiap tempat parkir pinggir jalan terdekat ditempati. Sepeda listrik untuk perjalanan klakson ke stasiun akan menyelesaikan masalah ini.

Sepeda listrik lipat ringan yang dapat dibawa pengendara di kereta dan sepeda dari stasiun pusat kota ke tempat kerjanya akan lebih baik.

Di lingkungan baru ini, performa sepeda listrik akan meningkat dalam hal jangkauan perjalanan dengan baterai yang terisi daya, masa pakai baterai, keandalan, kenyamanan berkendara, dan banyak fitur lainnya. Pembuat sepeda listrik baru akan menghabiskan banyak uang untuk meningkatkan kinerja sepeda guna merebut posisi pemasaran terkemuka dari produsen yang ada. Misalnya, China pasti akan memasarkan sepeda listrik murah dari pabrik produksi tinggi. Di pasar konsumen Amerika kami, sepeda listrik baru yang berkinerja lebih baik dapat menjadi populer untuk waktu yang terbatas, meskipun harganya lebih mahal. Kami berharap dapat melihat peningkatan yang signifikan dan berkelanjutan dalam jangkauan perjalanan sepeda listrik dari peningkatan kandungan energi baterai. Salah satu contohnya adalah sel bahan bakar seng-udara, yang sedang dikembangkan untuk mobil listrik. Itu tidak dapat diisi ulang oleh pemiliknya tetapi dapat diisi ulang di "stasiun pengisian" di mana sel bahan bakar yang habis dapat dengan cepat ditukar dengan sel bahan bakar yang diisi ulang. Penyimpanan hidrogen dalam jaringan nanotube adalah teknologi lain yang akan datang.

## **1.7 PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN YANG MENGATUR SEPEDA LISTRIK**

Peraturan yang akan mempengaruhi desain dan penggunaan sepeda listrik berkembang di seluruh dunia. Pendekatannya adalah dengan mendefinisikan sepeda bertenaga listrik sebagai kelas sepeda dan kemudian memberlakukan batas atas kecepatan sepeda saat bertenaga motor. Batas ini kemudian dikaitkan dengan kecepatan yang biasanya diamati dengan sepeda biasa di kota. Peraturan yang mendefinisikan batasan desain dirangkum pada Tabel 1.2. Peraturan lain mengatur asuransi, helmet, usia operator, dan

perjalanan di jalan dan jalur. Setiap kali batasan yang ada dilampaui, peraturan dibuat lebih ketat dalam hal penerapannya. Peraturan terkait kendaraan bermotor mencakup topik-topik seperti perizinan, penggunaan jalan, asuransi wajib, dan batasan usia pengemudi. Mereka dapat diterapkan pada pengendara sepeda listrik segera setelah kehadiran mereka di jalanan menjadi signifikan.

Di Amerika Serikat sepeda bertenaga listrik adalah produk consumer, seperti yang didefinisikan oleh pemerintah federal. City Electric International Consulting Group mengutip kemungkinan peraturan dalam Tabel 2 dari [9]. Sepeda listrik memiliki dua atau tiga roda dan digerakkan oleh pedal atau motor listrik. Kemungkinan peraturan akan membatasi daya motor ke nilai kurang dari 750 W. Kecepatan maksimum sepeda di permukaan yang rata mungkin dipertahankan kurang dari 20 mph bila pengendaranya adalah orang dengan berat lebih dari 170 lb, dan sepeda hanya digerakkan oleh motor. Standar yang sangat spesifik membatasi tegangan konduktor di mana penumpang kendaraan mungkin terpapar. Misalnya, baterai starter mesin di mobil umumnya dibatasi hingga 40 V untuk alasan keamanan.

**Tabel 1.2** Ringkasan Batasan Regulasi untuk Mendefinisikan Eleetrie Rieyele dalam Klasifikasi Rieyele

Location	Motor Power Limit (W)	Speed Limit (km/h)	Weight Limit (kg)	Other Limitations
European Union	250	25 <sup>a</sup>	No	Pedal assist <sup>a</sup>
United Kingdom	200 <sup>b</sup>	25 <sup>c</sup>	40 <sup>d</sup>	Must have pedals and on/off switch
Canada	500 <sup>e</sup>	32	No	Must have pedals and less than 4 wheels and on/off switch
Taiwan	No <sup>f</sup>	30	40	
Japan	No <sup>g</sup>	24	No	
China	240	20	No	Must have pedals
United States	750	32.2 <sup>h</sup>	No	Must have pedals and less than 4 wheels

- Daya motor secara bertahap berkurang seiring dengan peningkatan kecepatan hingga 25 km/jam di mana kecepatan daya motor harus nol.
- 250 W untuk becak.
- "Maksimum dengan daya motor yang diterapkan.
- 60 kg untuk becak.
- "Daya motor nol untuk kecepatan kurang dari 3 km/jam.
- Daya hanya bekerja selama mengayuh.
- Daya motor sama dengan daya pedal hingga 20 km/jam, setelah itu secara bertahap berkurang menjadi nol pada 24 km/jam.
- Bila berat operator 170 pon atau kurang.

Sumber: Dari Jamerson [41].

Di Amerika Serikat juga akan ada undang-undang, aturan, dan peraturan negara bagian terkait yang harus diperhatikan. Setiap negara bagian akan menentukan ke mana sepeda bisa pergi, seberapa cepat mereka bisa pergi, dan bagaimana kode asuransi negara bagian itu

berlaku. Beberapa negara bagian mungkin memerlukan inspeksi dan sertifikasi sepeda listrik. Perusahaan yang memproduksi, menjual, atau memperbaiki sepeda listrik mungkin diharuskan memiliki izin atau lisensi. Beberapa negara bagian mungkin mendefinisikan sepeda listrik sebagai sepeda motor. Kemudian, untuk mendapatkan SIM, pengendara sepeda listrik harus lulus tes tertulis khusus dan juga tes mengemudi. Persyaratan Helmet mungkin sama dengan sepeda konvensional. Sepeda listrik biasanya tidak memerlukan registrasi, lisensi, atau kualifikasi operator.

Beberapa negara lain mengatur penerapan tenaga motor listrik untuk sepeda. Misalnya, beberapa mengharuskan tenaga motor saja tidak boleh menggerakkan sepeda. Beberapa negara mengatakan bahwa daya motor tidak boleh melebihi daya pedal operator, sementara yang lain mengatakan pedal harus digunakan sebelum daya motor diterapkan. Banyak yang memiliki batas kecepatan di mana daya motor harus dimatikan.

## **1.8 KESIMPULAN**

Dalam bab ini kami merangkum kinerja yang dicapai, sejarah, di mana dibuat, siapa yang membuatnya, biaya, kegunaan, dan masa depan sepeda listrik. Bab-bab berikut mencakup dasar-dasar penggerak listrik, baterai, motor dan pengontrol, dan prinsip-prinsip rekayasa sistem untuk merancang sepeda listrik yang sukses, pengujian komponen, dan perkiraan beberapa perkembangan masa depan yang kami ramalkan.

## BAB 2

### DASAR PROPULSI LISTRIK

#### 2.1 PENDAHULUAN

Banyak landasan teknis dibahas dalam bab ini. Persamaan dan tabel menyediakan data yang dapat digunakan untuk mendesain sepeda listrik Anda. Jika Anda berencana untuk membelinya, ada cukup informasi di sini bagi Anda untuk mengevaluasi validitas klaim kinerja yang dibuat oleh vendor. Untuk keputusan pembelian Anda, informasi ini akan memungkinkan Anda untuk memilih sepeda listrik dengan kinerja terbaik. Dikembangkan di bagian pertama bab ini adalah model matematika yang memprediksi daya yang dikonsumsi dalam perjalanan sepeda. Daya yang dibutuhkan untuk mendaki bukit, mengatasi hambatan angin, dan hambatan gelinding dikembangkan dalam bentuk analitik. Data terkait termasuk koefisien hambatan aerodinamis dari bentuk yang menarik dan area proyeksi pengendara sepeda. Hambatan menggelinding sepeda terkait dengan berat total yang dibawa oleh rodanya. Kami menyimpulkan bab ini dengan diskusi tentang biaya siklus hidup dan mengilustrasikan prosedur analitis kami dengan dua kendaraan yang menarik: pembalap yang mengayuh dan skuter yang distabilkan secara elektromekanis. Bab 4 dan 5 akan menggunakan informasi tersebut dan memperluas contoh-contoh yang disajikan.

#### 2.2 MODEL MATEMATIKA KINERJA SEPEDA: DAYA YANG DIBUTUHKAN

Daya yang dikonsumsi dalam mendorong sepeda dan pengendara terutama disebabkan oleh hambatan angin yang datang dan mengangkat massa ke atas bukit dengan kecepatan sepeda normal dan yang kedua karena gesekan bantalan dan ban. Gesekan bantalan dan ban, meskipun kecil, dapat menyamai hambatan angin pada kecepatan yang sangat rendah.

##### Kekuatan Pendakian Hili

Daya yang dikonsumsi dalam mendaki hill ( $P_u$ ) dalam watt (W) adalah produk dari massa total dan kecepatan vertikal:

$$P_u = 9.81 M v_g G \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

di mana  $M$  adalah massa total sepeda, pengendaranya, dan muatan yang diangkut, dalam kilogram;  $v_g$  adalah kecepatan gerak dalam meter per detik; dan  $G$  adalah derajat yang dinyatakan sebagai pecahan yang merupakan perubahan ketinggian terhadap jarak yang ditempuh. Untuk kemiringan curam  $G$  harus diganti dengan sinus  $[\tan^{-1}(\text{naik/lari})]$ .

##### Daya Mengatasi Hambatan Angin

Variabel terpenting dalam konsumsi daya sepeda listrik bertenaga baterai adalah hambatan angin. Gaya hambat angin ini ( $R_w$ ) dalam newton, dari [1] adalah:

$$R_w = C_d \rho A v_r^2 / 2 \quad (2.2)$$

di mana:



$A$  = luas depan,  $m^2$

$C_d$  = koefisien hambatan. Contohnya adalah 0,1 untuk badan ramping, 0,3 untuk mobil penumpang, 0,77 untuk pengendara sepeda telentang, dan 1 untuk pengendara sepeda tegak. Informasi lebih lanjut tentang koefisien ini diberikan nanti dalam bab ini.

$\rho$  = kerapatan udara,  $kg/m^3$

$$\rho = 1.2e^{-0.143h}$$

di mana:

$h$  = ketinggian di atas permukaan laut, km

$e$  = 2.7183

$v_r$  = kecepatan relatif di udara, yang merupakan kecepatan gerak ( $v_g$ ) ditambah vektor angin ( $v_w$ ), m/s

Itu adalah:

$$v_r = v_w + v_g$$

Daya yang dikonsumsi ( $P_w$ ) dalam mengatasi hambatan angin di setiap kenaikan perjalanan adalah:

$$P_w = R_w v_g, \quad (W) \quad (2.3)$$

$$P_w = [C_d \rho A (v_w + v_g)^2] v_g / 2 \quad (W) \quad (2.4)$$

Perhatikan bahwa gaya propulsi yang diperlukan untuk mengatasi hambatan angin bervariasi sebagai kuadrat dari kecepatan relatif. Tenaga penggerak yang diberikan, di mana ban menyentuh tanah, bervariasi secara langsung dengan kecepatan perjalanan di atas tanah. Misalnya, sebuah sepeda yang melaju dengan kecepatan 10 m/s (36 km/jam, 22 mph) menjadi 2- m/s (7-kmlh, 4,5-mph) head wind membutuhkan tenaga penggerak 432 W.

Sepeda yang sama yang melaju dengan kecepatan 7 m/s (25 km/jam, 15 mph) menjadi angin depan 5 m/s (18-km/h, 11-mph) akan membutuhkan 302 W. Kedua pengendara sepeda akan merasakan 12-mi yang sama (43 –km/h, 20-mph) angin di wajah mereka saat mereka bersepeda. Kebetulan, untuk setiap kondisi energi yang sama digunakan. Untuk panjang perjalanan yang sama, kondisi daya yang lebih tinggi tiba lebih cepat daripada kondisi daya yang lebih rendah.

### **Koefisien Drag of Shapes of Interest**

Anda dapat menggunakan bentuk aerodinamis di bagian depan sepeda Anda atau Anda dapat memilih untuk menutup sepeda. Tabel 2.1 menunjukkan nilai koefisien drag untuk berbagai bentuk. Juga ditampilkan kemungkinan manfaat dalam hal daya yang diperlukan

untuk mengatasi hambatan udara dari bentuk-bentuk ini untuk area depan 0,4 dan 0,5 m<sup>2</sup> dalam angin 20-mph (32-km/h).

### Area Proyeksi Pengendara Sepeda

Kami dalam beberapa kesempatan mengukur komponen area depan pengendara sepeda bergaya jalanan. Kami melakukan ini dengan memperbesar gambar pengendara sepeda dan kemudian mengukur area komponen pembesaran. Pada Tabel 2.2 kolom menunjukkan hasil untuk pria 175 pon dengan kemeja lengan pendek biasa dan celana panjang biasa [2]. Gambar pria dalam gambar video yang diperbesar memiliki total luas frontal terukur 0,5 m<sup>2</sup>.

Data menunjukkan area segmen bodi sehingga Anda dapat menjelajahi manfaat peningkatan aerodinamis dengan menempatkan bagian tertentu dari tubuh pengendara sepeda di belakang pelindung aerodinamis.

**Tabel 2.1** Koefisien Tarik untuk Berbagai Bentuk

Shape	Drag Coefficient $C_d$	Power Required (W) <sup>a</sup>	
		0.5 sq m	0.4 m <sup>2</sup>
Circular disc <sup>b</sup>	1.12	189	151
Flat plate $L/D = 1:1$ <sup>c</sup>	1.16	195	156
$L/D = 5:1$ <sup>b</sup>	1.2	202	162
$L/D = 20:1$ <sup>b</sup>	1.5	252	202
Bicycle rider <sup>a</sup>	1	168	135
Cylindrical surface <sup>b</sup> perpendicular to flow $L/D = 5 : 1$	0.74	125	100
Hemisphere <sup>b</sup> hollow downstream	0.34	57	46
Teardrop <sup>c</sup>	0.1	17	13
Ellipsoid 1:3 <sup>b</sup> major axis parallel	0.06	10	8
Airship hull <sup>b</sup>	0.042	7	6

**Tabel 2.2** Area Depan Bagian Tertentu dari Tubuh Manusia Mengendarai Sepeda Gunung 26 inci

	Area (m <sup>2</sup> )	(%) of total
Head	0.036	7.2
Torso	0.127	25.1
Arms	0.09	18
Upper legs	0.094	18.7
Lower legs	0.053	10.4
Feet	0.025	4.9
Hands	0.026	5.2
Bicycle	0.053	10.5
Total	0.504	

### Daya Mengatasi Tahanan Gulir

Dalam perjalanan dengan kecepatan yang sangat rendah pada rute yang datar, gaya yang harus diatasi oleh penggerak sepeda terutama adalah hambatan gelinding. Resistansi ini

tergantung pada berat kendaraan, jenis bantalan yang digunakan, dan jenis ban. Daripada mencoba menentukan banyak komponen dalam tahanan gelinding ini, kami mengukur efek totalnya [3]. Tahanan gelinding diukur untuk perjalanan di atas lantai pabrik beton yang mulus, di mana tidak ada angin. Bobot kendaraan dan tekanan ban pun bervariasi. Kami menemukan bahwa koefisien rolling resistance bervariasi dengan massa kendaraan.

Kami memperkirakan koefisien tahanan gelinding,  $C_r$ , dengan fungsi:

$$C_r = A + B/W \quad (2.5)$$

di mana  $W$  adalah pengukuran berat kami dalam pound dan nilai parameter  $A$  dan  $B$  yang diberikan pada Tabel 2.3.

Diplot pada Gambar 2.1 adalah koefisien tahanan gelinding dari jenis sepeda yang memiliki massa dan tekanan ban yang bervariasi. Garis-garis halus pada grafik pada Gambar 2.1 menunjukkan hasil perkiraan ini untuk kendaraan telentang tiga roda yang kami gunakan dalam lari sepeda klasik Seattle ke Portland. Kendaraan ini memiliki roda depan ODe dengan ban knobbed berukuran 2 kali 16 inci dan dua roda belakang dengan ban permukaan halus berukuran 1,75 kali 16 inci [3].

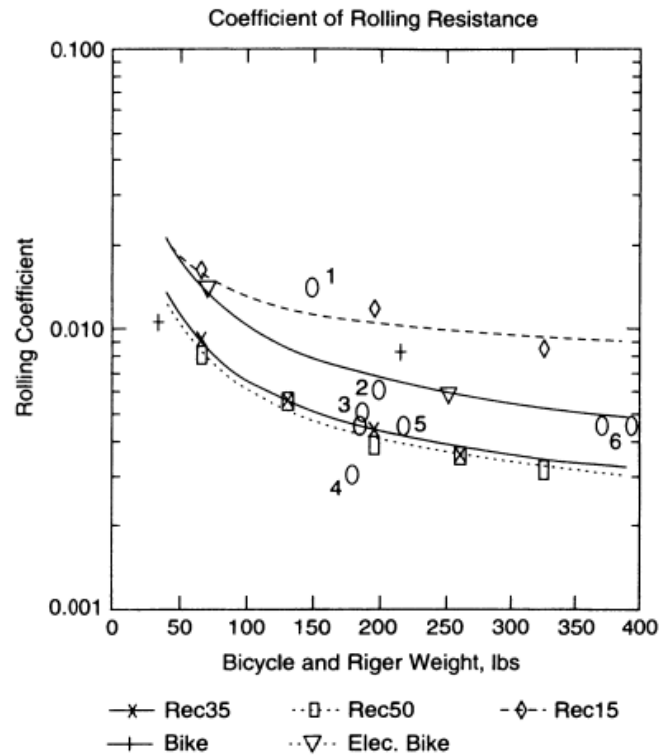
Kami juga mengukur koefisien rolling di luar ruangan dalam kondisi angin yang sangat rendah dengan menarik telentang dan mengukur gaya penarik yang diperlukan. Kami melakukan 30 pengukuran di kedua arah di jalan berkerikil dan aspal dengan kecepatan 2 mph (1,2 kmlh) atau kurang. Hasil rekaman ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Daya yang dikonsumsi dalam mengatasi efek bantalan dan gesekan ( $P_r$ ) adalah:

$$P_r = 9.81C_r M v_g \quad (W) \quad (2.6)$$

**Tabel 2.3** Nilai Parameter untuk Persamaan. (2.5) Koefisien Tahanan Gulir

	A	B
<b>Electric bicycle</b>		
35 psi	0.0031	0.75
<b>Three-wheel recumbent</b>		
15 psi	0.0077	0.53
35 psi	0.002	0.455
50 psi	0.0019	0.423



**Gambar 2.1** Nilai koefisien tahanan gelinding yang terukur. Nilai gabungan dari [2] dan [4].

Titik data adalah: x, tiga roda telentang dengan satu roda depan memiliki ban kenop berukuran 2 kali 16 inci, dan pada roda belakang  $1\frac{3}{4}$  kali ban beralur halus 16 inci. Ketiga roda memiliki tekanan ban 35 psi. 0, sama telentang dengan tekanan ban 50-psi; , sama telentang dengan tekanan ban 15-psi; +, sepeda gunung dengan  $2\frac{1}{4}$  ban kenop 26 inci pada 45 psi; V', adalah sepeda gunung listrik dengan ban 26 inci pada 35 psi: 0, berbagai sepeda seperti nomor pada grafik dari Gross et al. [4]: 1 untuk pembalap muda off-road, 2 untuk komuter Eropa, 3 untuk telentang, 4 untuk balap, 5 untuk aerodinamis roda tiga, dan 6 untuk sepeda tandem.

**Tabel 2.4** Nilai Terukur Koefisien Penggulungan Ketahanan untuk Berbagai Permukaan Jalan

Weight	Coefficient of Rolling Resistance		
lb	218	282	381
kg	99	128	173
Compacted gravel	0.01	0.0052	Not measured
Loose pea gravel	0.0092	0.0069	0.0051
Smooth asphalt	0.0071	Not measured	Not measured

Misalnya, 43,4 W diperlukan untuk mendorong sepeda 114 kg (250 lb) dengan pengendara dengan kecepatan 5,55 m/s (20 km/h, 12,4 mph), ketika kecepatan angin belakang sama dengan kecepatan maju sepeda dan  $C_r = 0,007$ .

**Daya untuk Akselerasi**

Energi kinetik,  $K_e$ , yang diinvestasikan ke dalam benda yang bergerak sama dengan setengah massanya dikalikan kuadrat kecepatannya ( $K_e = \frac{1}{2} Mv^2$ ). Gaya dorong yang melebihi

gaya dorong dan gaya gesekan benda akan menaikkan kandungan energi kinetik benda dengan menaikkan kecepatannya. Gaya percepatan dikalikan jarak yang diterapkan sesuai dengan peningkatan energi kinetik massa.

Gaya percepatan adalah  $F = Ma$ . Gaya ini diterjemahkan menjadi torsi yang dibutuhkan pada roda penggerak sepeda yang pada akhirnya membutuhkan torsi dari motor dan atau gaya yang diberikan oleh pengendara pada pedal engkol. Torsi yang diperlukan pada roda penggerak untuk percepatan tertentu ( $a, m/s^2$ ) adalah:

$$T = 9.807Mra \quad (\text{N-m}) \quad (2.7)$$

di mana  $r$  adalah jari-jari roda, dinyatakan dalam meter, dan massa sepeda dan pengendara yang merupakan berat gabungan dalam kilogram dibagi dengan konstanta gravitasi  $9,807 \text{ m/s}^2$ . Misalnya, sepeda dengan roda 66 cm dengan berat gabungan dengan pengendara 130 kg yang dipercepat pada 1 m/s akan membutuhkan torsi roda sebesar  $9,807 \times 130 \times 1 \times 0,33/9,807 = 43 \text{ N-m}$ . Roda gigi antara motor dan/atau pedal engkol akan menskalakan nilai torsi ini dengan rasio roda gigi. Roda gigi yang mengurangi kecepatan pedal engkol dan motor relatif terhadap roda penggerak akan mengurangi torsi yang diperlukan pada anel motor/atau poros engkol. Wajar ketika mengendarai sepeda untuk memulai dengan dorongan dan kekuatan pedal.

Momen inersia roda penggerak sepeda, roda gigi, dan rotor motor serta inersia komponen lain dalam sistem penggerak akan menambah torsi yang dibutuhkan. Namun, sebagai perbandingan, ini dapat dianggap diabaikan dalam arti praktis. Gaya yang diberikan oleh pengendara pada pedal engkol akan mengurangi dari yang dibutuhkan motor. Seperti yang sudah dikatakan, adalah wajar ketika mengendarai sepeda untuk memulai dengan dorongan dan kekuatan pedal. Namun, jika pengendara tidak berkontribusi pada gaya akselerasi, motor akan menanggung beban penuh. Dalam hal ini pada saat awal akselerasi, karena tidak ada gerakan, motor memberikan daya DO tetapi harus mensuplai torsi untuk menghidupkan sepeda agar dapat bergerak. Torsi awal, tergantung pada kondisi, kemungkinan mendekati kondisi torsi mati motor, di mana arus akan tinggi. Baterai harus mensuplai arus yang relatif besar ini pada tegangan terminalnya untuk mencapai percepatan. Ini adalah kondisi yang membutuhkan daya maksimum dari baterai, sejauh yang diperlukan untuk akselerasi. Untuk mencari daya yang diperlukan untuk percepatan ini kita dapat mulai dengan menentukan usaha yang dilakukan. Usaha adalah hasil kali gaya dan jarak.  $S = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$ , dimana  $V_0$  adalah kecepatan awal dan  $t$  adalah waktu percepatan.

Yakinkan  $V_0 = 0$ . Dengan menggunakan nilai contoh di atas,  $a = 1 \text{ m/s}^2$  dan  $t = 1 \text{ s}$ , kita temukan bahwa  $S = \frac{1}{2} \text{ m}$ . Usaha yang dilakukan adalah:

$$W = FS = Ma\left(\frac{1}{2}at^2\right) \quad (\text{kg-m}) \quad (2.8)$$

Daya adalah laju melakukan pekerjaan, sehingga  $P = W/t$ , jadi

$$P = \frac{1}{2} 9.807 M a^2 t \quad (\text{W}) \quad (2.9)$$

Melanjutkan contoh, daya rata-rata pada detik pertama percepatan sepeda 130 kg dan pengendara adalah 65 W. Pada 5 s itu akan menjadi 325 W, pada titik mana sepeda akan menempuh jarak 12,5 m (20 kaki).

Pada contoh pertama tanpa gerakan, tidak ada kerja, tetapi daya diambil dari baterai. Melanjutkan contoh torsi 43 N-m, pertimbangkan karakteristik motor yang mungkin memiliki peringkat torsi terhenti 81 N-m pada arus 60 A pada 36 V. Dengan menggunakan penskalaan linier, kami akan memperkirakan arus pada torsi 43 N-m menjadi  $60 \text{ A} \times 43 \text{ N-m} / 81 \text{ N-m} = 32 \text{ A}$ . Ini membutuhkan 1152 W dari baterai. Nilai arus dan daya ini merupakan batas atas pada nilai aktual yang akan terjadi karena resistansi internal baterai, motor, dan sirkuit penghubung serta induktansi motor. Induktansi akan membatasi arus sesaat, dan resistansi rangkaian akan mengurangi tegangan baterai dari nilai nominal.

Dengan bantuan pengendara, arus start dan daya baterai yang dibutuhkan akan semakin berkurang atau bahkan dihilangkan dengan pengendara yang konservatif. Kecepatan sepeda dengan percepatan adalah  $V = a \times t$  dan untuk contoh  $1 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ s} = 5 \text{ m/s}$ . Daya total yang dibutuhkan adalah jumlah daya untuk mengatasi hambatan angin, hambatan gelinding, gaya gravitasi, gesekan, dan juga daya percepatan. Energi yang dibutuhkan, dengan menggunakan hubungan  $K = \frac{1}{2} M v^2$ , untuk mempercepat contoh sepeda dan pengendara bermassa 300 lb (130 kg) dari berbagai kecepatan awal ke kecepatan yang lebih tinggi yaitu 5 atau 10 mph lebih cepat ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Perhatikan bahwa lebih banyak energi diperlukan untuk mengubah kecepatan dengan jumlah tertentu saat Anda bepergian lebih cepat. Ini karena kecepatan rata-rata lebih besar. Lebih banyak daya yang dikonsumsi karena daya sebanding dengan gaya dikali kecepatan. Anda akan memerlukan informasi ini nanti saat menentukan kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk sepeda Anda. Ini membutuhkan perkiraan berapa kali Anda mengubah kecepatan dan seberapa banyak.

Kami menunjukkan di Bab 4 bahwa energi dapat diperoleh kembali selama deselerasi. Dengan membalikkan konsep di atas dan mempertimbangkan penurunan kecepatan pada Tabel 2.5, nilai energi yang ditabulasikan menjadi energi yang dapat diperoleh kembali. Energi yang dapat diperoleh kembali ini berkurang oleh ketidakefisienan pemulihan.

**Tabel 2.5** Energi yang Digunakan untuk Mengalirkan Sepeda dari Berbagai Kecepatan

Start Speed		Energy Used (Wh) at End Speed	
mph	km/h	+5 mph (+8 km/h)	+10 mph (+16 km/h)
0	0	0.1	0.28
3	4.8	0.21	0.60
6	9.7	0.33	0.83
9	14.5	0.44	1.07
12	19.3	0.55	1.28

Conditions  
 Weight 300 lb (131 kg)  
 Acceleration 3 ft/s<sup>2</sup> or 2.05 mph/s or 0.9 m/s<sup>2</sup>

## Nilai Terukur

Kami telah menguji banyak konfigurasi sepeda listrik bertenaga baterai. Kami mengendarai satu di jalur sepeda yang pada dasarnya datar sampai baterai habis. Jejak ini, "jalur antar kota" menghubungkan kota Auburn dan Kent di Negara Bagian Washington. Kami mengendarai sepeda terlebih dahulu ke utara, lalu ke selatan, untuk menghilangkan efek kemiringan kecil dan angin sepoi-sepoi yang ada. Kami mencatat kecepatan, jarak, tegangan motor, dan arus motor saat kami bepergian. Data ini mengkonfirmasi ekspresi analitik yang kami gunakan di komputer untuk menghasilkan grafik kinerja perjalanan sepeda dalam bab ini [2, 3].

### 2.3 ESTIMASI DAYA MOTOR YANG DIBUTUHKAN

Kami menggunakan ekspresi analitik yang diberikan di Bagian 2.2 untuk menggambarkan kisaran nilai untuk parameter terkait seperti kecepatan, berat, kemiringan jalan, efek angin, dan daya penggerak. Ini dapat digunakan untuk memperkirakan daya motor yang dibutuhkan. Perkiraan ini bersama dengan informasi yang diberikan dalam Bab 6 dapat digunakan untuk memilih motor. Prosesnya adalah pertama untuk menemukan kekuatan propulsi, kedua untuk meningkatkannya untuk memperhitungkan kerugian, dan terakhir untuk menentukan seberapa besar tenaga penggerak yang harus disumbangkan oleh pengendara.

#### Menentukan Daya Propulsi

Fungsi di atas menentukan daya yang diperlukan dari roda penggerak untuk menggerakkan sepeda pada kecepatan yang diinginkan. Contoh hasil menggunakan ekspresi analitik ini untuk beberapa kondisi representatif ditunjukkan pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.2. Tabel 2.6 menunjukkan daya yang diperlukan untuk mengembangkan torsi roda sepeda yang diperlukan untuk melaju pada kecepatan yang ditunjukkan, dengan berbagai kondisi kemiringan permukaan dan angin kepala. Nilai daya ini diperlukan untuk mengatasi (1) gaya hambatan udara, (2) gaya mengatasi hambatan roda untuk menggelinding, dan (3) gaya yang diperlukan untuk mengatasi gravitasi saat berjalan menanjak. yang diharapkan pada ketinggian 50 f dalam menciptakan nilai untuk tabel. Kepadatan udara di ketinggian yang lebih tinggi akan lebih sedikit, sehingga lebih sedikit daya yang dibutuhkan. Mengadopsi nilai elevasi rendah menghasilkan perkiraan yang lebih konservatif dari daya yang dibutuhkan. Koefisien tahanan gelinding 0,007 digunakan.

**Tabel 2.6** Daya yang Diperlukan untuk Mengembangkan Torsi Roda yang Diperlukan untuk Kondisi Perjalanan yang Diindikasikan di

		Head-Wind Speed					
		0	6.2	15.5	25		
mph		0	6.2	15.5	25		
km/h		0	10	25	40		
Bicycle Speed							
mph	km/h	Road Power Required (W)				Road Grade (%)	
8	12.9	40	69	143	254	0	
		156	185	258	369	3	
		271	300	374	484	6	
12	19.3	86	145	279	468	0	
		259	318	452	641	3	
		431	491	625	814	6	
16	25.7	161	261	472	755	0	
		392	492	702	985	3	
		622	722	932	1216	6	
20	32.2	277	428	730	1124	0	
		565	716	1018	1412	3	
		853	1004	1306	1700	6	

"Kondisi: Area depan pengendara dan sepeda adalah  $0,4 \text{ m}^2$  ( $4,3 \text{ ft}^2$ ), beratnya 75 kg (165 lb). Koefisien drag adalah 1: koefisien rolling resistance adalah 0,007; elevasi adalah 15 m (50 ft).

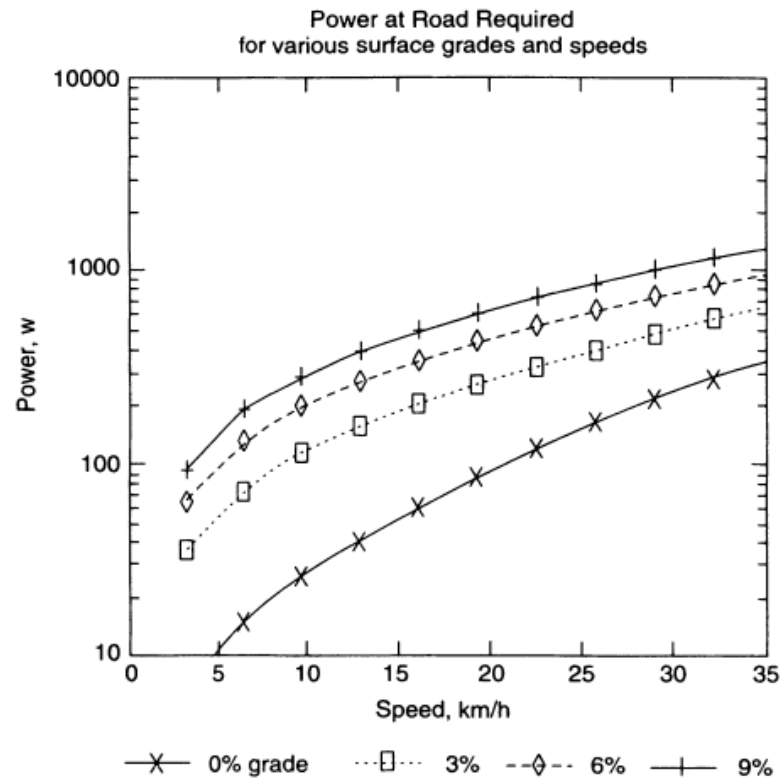
Jika pengendara bersepeda melawan angin kencang, maka kerugian aerodinamis bertambah, dan pada setiap kecepatan lebih banyak tenaga harus disalurkan ke roda di permukaan jalan. Tabel 2.6 mengilustrasikan hal ini dengan menunjukkan daya yang dibutuhkan untuk kecepatan angin kencang hingga 25 mph (40 km/h).

Untuk efek hambatan udara kami mengasumsikan area frontal  $4,3 \text{ ft}^2$  ( $0,4 \text{ m}^2$ ). Ini akan sesuai dengan orang dewasa yang mengenakan pakaian jalanan biasa. Kami mengukur area depan yang diproyeksikan dari foto-foto orang yang mengendarai sepeda jalanan dalam posisi santai yang normal. Mereka bukan pembalap yang biasanya berjongkok di atas setang. Kami menggunakan koefisien drag 1 yang didasarkan pada pengukuran. Juga, untuk berat gabungan pengendara dan sepeda listrik kami menggunakan 75 kg (165 lb). Gambar 2.2 menunjukkan total daya yang dibutuhkan untuk disalurkan di permukaan jalan, dalam suasana tenang, untuk kecepatan sepeda dari 5 hingga 35 km/h dan kemiringan jalan dari 0 hingga 9 persen.

#### **Menskalakan Daya Jalan untuk Menemukan Daya Motor yang Dibutuhkan**

Dalam menentukan peringkat motor penggerak, perancang harus meningkatkan nilai pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.2 untuk memasukkan daya untuk rugi-rugi mekanis dan elektrik. Tenaga motor tambahan juga diperlukan untuk melewati jalan bergelombang atau jalan yang tergenang air. Motor dinilai dalam hal output daya. Output ini harus mencakup kerugian pada roda gigi dan rantai yang menghubungkan motor berkecepatan tinggi ke roda sepeda.





**Gambar 2.2** Daya yang dibutuhkan pada permukaan jalan untuk berbagai kemiringan jalan dan kecepatan perjalanan. Legenda: x adalah 0% tingkat jalan, [ adalah 3% tingkat jalan, o adalah 6% tingkat jalan, dan + adalah 9% tingkat jalan.

Cara praktis untuk menghitung kerugian ini adalah dengan menggabungkannya menjadi efisiensi keseluruhan. Ini akan mengasumsikan, yang biasanya terjadi, bahwa variabel loss di dalam baterai dan sirkuit listrik antara baterai dan motor tidak sepenting perubahan loss di dalam motor setiap kali output dayanya berubah. Membagi nilai Tabel 2.6 dengan efisiensi keseluruhan, yang kita sebut sebagai efisiensi sistem, menghasilkan nilai konservatif untuk peringkat daya motor yang diperlukan. Kekuatan ini, bila dibagi dengan 746, memberikan nilai dalam tenaga kuda. Seseorang perlu memodifikasi prosedur ini untuk menentukan daya motor jika sambungan antara baterai dan motor tidak signifikan. Modifikasi ini akan diperlukan jika komponen high-loss, seperti rheostat, digunakan untuk mengontrol kecepatan motor.

Pengkabelan, sakelar, dan sirkuit solid-state berukuran memadai memiliki kerugian kecil yang dapat diabaikan jika dibandingkan dengan perbedaan berat dan ukuran antara pengendara sepeda. Faktor tambahan dalam menentukan peringkat daya motor adalah rasio input/output dari gigi pengurang kecepatan yang memasang motor ke roda penggerak daya sepeda. Gear reduksi kecepatan terbaik mungkin tidak sesuai untuk motor yang paling efisien. Memilih jenis dan rasio putaran per menit (rpm) yang optimal untuk propulsi sepeda yang efisien adalah prosedur rekayasa sistem yang kompleks yang dijelaskan dalam Bab 6. Kami telah menemukan berdasarkan pengalaman bahwa total efisiensi propulsi keseluruhan adalah sekitar 50 hingga 60 persen. Motor dapat menjadi kontributor paling signifikan terhadap hilangnya efisiensi. Efisiensi maksimum yang diukur selama dur berkisar antara 30 hingga 70 persen untuk motor arus searah (dc) seri-sikat dan magnet permanen. Banyak

produsen motor mengutip efisiensi 90 persen atau lebih. Namun, efisiensi motor tergantung di mana Anda mengoperasikan motor pada titik desain daya bebannya. Umumnya, pengoperasian motor yang benar menghasilkan efisiensi sekitar 70 persen.

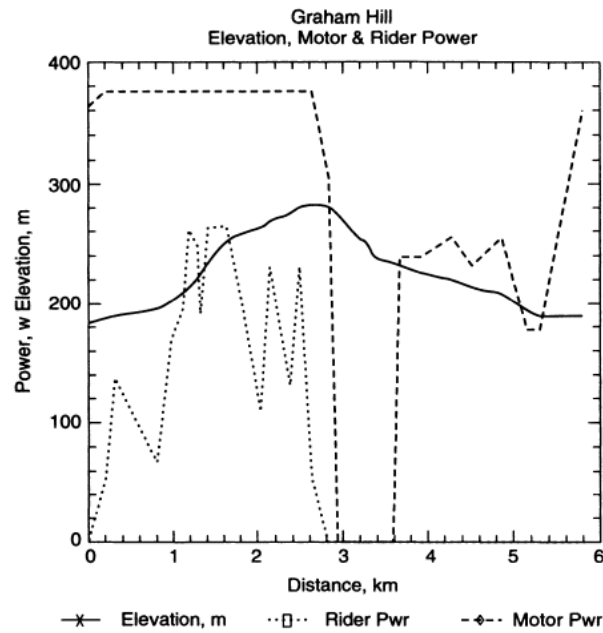
Menggabungkan motor ke roda penggerak menghasilkan kerugian tambahan pada efisiensi sistem. Beberapa mekanisme yang digunakan untuk memasang motor ke roda adalah gearbox, belts, rantai, atau mekanisme penggerak gesekan. Gearbox akan mengurangi efisiensi sekitar 5 persen untuk setiap faktor pengurangan 2 kecepatan. Rantai atau sabuk bergigi memiliki efisiensi tinggi, di urutan 95 persen. Penggerak gesekan perangkat pada roda sepeda memiliki efisiensi yang bervariasi dengan tekanan terhadap roda dan juga kondisi jalan basah atau kering. Dalam penyesuaian coba-coba tekanan terhadap roda, kami mencapai keseimbangan antara penggerak roda positif tanpa slip dan penarikan arus minimum dari bauery. Kami menemukan bahwa efisiensi tertinggi adalah sekitar 85 persen untuk jenis penggerak ini.

Nilai daya motor yang ditentukan oleh prosedur di atas memastikan bahwa pengendara tidak menambah daya. Hampir semua sepeda bertenaga listrik dapat dikayuh sambil ditenagai oleh motor. Tenaga motor kemudian dapat dikurangi, terutama untuk tingkat permukaan yang lebih tinggi. Ketersediaan tenaga pedal ini dapat mengurangi tenaga motor yang dibutuhkan untuk bersepeda di tanjakan pendek yang curam. Untuk mengilustrasikan bagaimana seseorang akan memilih peringkat motor yang akan menghasilkan daya penggerak sepeda yang dibutuhkan, kami menggunakan perhitungan untuk sampel medan dan pengendara yang diharapkan. Proses pemilihan akan menjadi proses berulang dimana medan sampel akan dipilih dan asumsi tertentu akan dibuat pada batas atas tenaga motor dan bagaimana pengendara akan berkontribusi pada kekuatan propulsi. Pada setiap langkah iterasi asumsi akan diubah sampai diperoleh hasil yang dapat diterima.

Gambar 2.3 menunjukkan contoh bukit curam, bukit Graham, dan daya yang sesuai yang dibutuhkan dari motor dan dari arider. Nilai daya yang dihitung mengasumsikan efisiensi sistem 60 persen, sepeda dan pengendara dengan berat gabungan 120 kg (265 lb), area depan 0,42 m<sup>2</sup> (4,5 ft<sup>2</sup>), dan nilai kecepatan yang ditunjukkan pada gambar. Daya motor maksimum ditetapkan pada 375 w. Total waktu perjalanan untuk ilustrasi ini adalah sekitar 15 menit dan sekitar 10 menit dihabiskan untuk perjalanan menanjak. Selama segmen menanjak, pengendara harus menghasilkan lebih dari 100 W selama 6,5 menit atau lebih dari 200 W selama 3 menit. Dalam Bab 5 kita akan membahas bagaimana memilih motor menurut rating dan kurva kecepatan-torsinya.

### **Motor Versus Museies Manusia untuk Propulsi Rieyele**

Kemampuan manusia untuk menyalurkan tenaga penggeraksepeda merupakan fungsi waktu sebelum habis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Data umumnya berkaitan dengan laki-laki non-atletik yang sehat. Kami menunjukkan ini hanya untuk menambah perspektif dan tidak terlalu spesifik dengan nilai-nilai seperti itu. Ada berbagai kemungkinan nilai.



**Gambar 2.3** Graham tanjakan yang curam dan tenaga yang dibutuhkan dari motor dan pengendara.

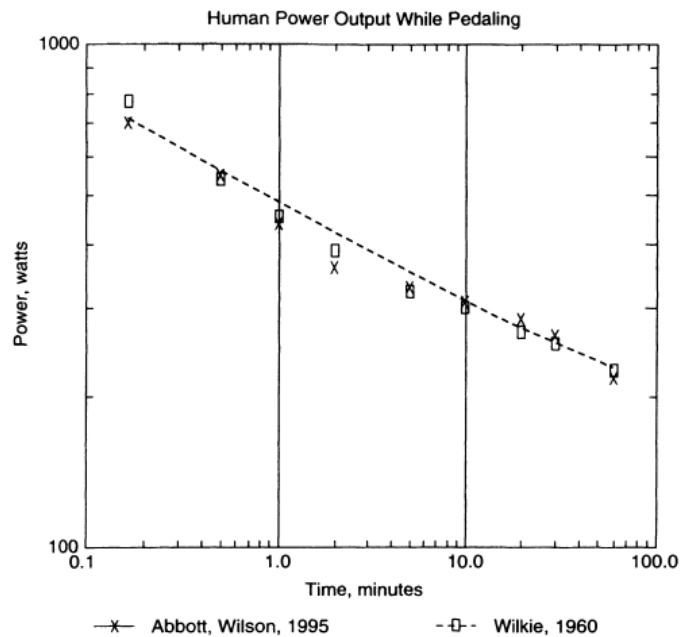
Garis grafik adalah: \_\_\_ elevasi dalam meter, daya pengendara dalam watt, dan - - - - - daya motor dalam watt. Kecepatan sepeda dalam km/jam =  $16 - 1,6 GO^{0.71}$  untuk  $G = 0$  hingga 6 dan  $\delta = 24 - 1.6 G^{1.4}$  untuk  $13 < G < 46$  dan 38 km/h untuk  $G < 0$ .

Perkiraan curve yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 diberikan oleh persamaan:

$$P = 85 + 400/\tau^{0.25} \quad (\text{W}) \quad (2.10)$$

di mana  $\tau$  adalah durasi waktu ketahanan dalam menit. Ini hanya valid untuk data yang ditunjukkan pada gambar.

Kami belajar dari para insinyur yang sedang mengembangkan pesawat bertenaga manusia Raven bahwa seorang atlet kelas atas dalam kondisi yang baik dapat mengirimkan dengan kakinya 4 W/kg berat badan. Durasi penerbangan yang direncanakan Raven adalah 5 jam. Juga, A.C. Gross dan rekan-rekannya melaporkan bahwa nonatlet yang sehat dapat menghasilkan daya musel 75 W selama 8 jam, sementara atlet yang baik dapat menghasilkan daya sekitar 300 W [4]. Manusia biasa dapat menghasilkan sekitar 746 W untuk sesaat. Seseorang yang bukan atlet dapat mengirimkan kekuatan ini selama 12 detik, dan atlet yang baik dapat mengirimkannya selama 30 detik.



**Gambar 2.4** Output tenaga manusia saat mengayuh. Titik data berasal dari: "x" dari Abbott dan Wilson "Human-Powered Vehicles", Human Kinetics (1995), dan titik "[]" berasal dari Wilkie, "Man as a Source of Mechanical Power", Ergonomics, 3 (1), hlm. 1-8, 1960, seperti yang diberikan oleh Coate [Ref. 1.1]. Garis, - - - - -, dalam grafik adalah aproksimasi.

## 2.4 MEMILIH BATERAI UNTUK BIAYA SIKLUS HIDUP MINIMUM

Kita dapat memilih jenis baterai yang akan digunakan dan menghitung seberapa besar seharusnya setelah menghitung daya motor apa yang dibutuhkan dan lama perjalanan antara pengisian ulang baterai. Teknologi baterai semakin maju, dan peningkatan kinerja baru mulai tersedia setiap tahun.

**Tabel 2.7** Perbandingan Biaya Siklus Hidup BaUery

	Battery Type					
	Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Poly	Zn-Air
Energy use per unit distance, $E_u$ , Wh/km	10	10	10	10	10	10
Battery purchase cost per unit of energy, $C_e$ , cents/Wh	4.5	8	35	16	6	0.75
Number of charge-discharge cycles, N	300	1250	1250	1250	1200	200
Depth of discharge (fractional)	0.7	0.65	0.65	0.75	0.7	0.7
Battery cost per unit travel distance, $C_m$ , Cents/km	0.214	0.098	0.431	0.171	0.071	0.054
Number battery purchases relative to longest life battery	4.2	1.0	1.0	1.0	1.0	6.3
Equal travel distance battery cost, cents/km	0.89	0.10	0.43	0.17	0.07	0.33

Produsen sepeda listrik suka mengurangi bobot baterai dengan memperpendek jarak tempuh dengan baterai yang terisi penuh. Untuk rentang perjalanan apa pun, mengadopsi

baterai yang lebih ringan tetapi lebih mahal dapat mengurangi bobot baterai. Dalam Bab 3 kita membahas secara rinci karakteristik baterai. Di sini kami menawarkan metode memilih baterai berdasarkan beberapa karakteristik ini. Kepadatan energi, biaya, kedalaman pengosongan, dan jumlah siklus pengisian-pengosongan yang tersedia selama masa pakai baterai adalah istilah yang kami pertimbangkan untuk menemukan biaya siklus hidup terendah dari penggunaan baterai.

Pada Tabel 2.7 kami membandingkan enam kimia baterai sehubungan dengan biaya dan jarak perjalanan yang tersedia. Timbal-asam (Pb), nikel-kadmium (NiCd), dan nikel-logam hidrida (NiMH) adalah jenis baterai yang paling tersedia untuk pembuat sepeda listrik. Baterai zinc-air saat ini hanya sebagai ilustrasi karena infrastruktur "pengisian" baterai belum tersedia untuk ukuran baterai penggerak sepeda. Baterai lithium ion (Li ion) yang sekarang sedang dibangun untuk layanan empedu mobil listrik mungkin akan segera digunakan pada sepeda. Mereka dapat mengirimkan 224 Wh/kg dengan biaya Rp 18.300 per Wh dan berat 4,5 kg/kWh.

### **Biaya Siklus Hidup Baterai**

Total biaya perjalanan dengan sepeda listrik adalah biaya peralatan ditambah biaya listrik yang digunakan. Rangka dan roda sepeda akan dengan mudah bertahan lebih dari 10 tahun, jadi biaya per tahun mereka kecil. Baterai, jika habis dalam jumlah besar setiap kali sepeda digunakan, akan menjadi faktor terpenting dalam perhitungan biaya siklus hidup. Pengaruh kedalaman pengosongan pada masa pakai baterai dijelaskan di Bab 3. Biaya baterai dan biaya listrik untuk mengisi ulang baterai mewakili sebagian besar biaya perjalanan berdasarkan jarak per unit. Sebagai ilustrasi, kami jamin bahwa sepeda listrik menggunakan energi listrik 10 Wh untuk menempuh jarak 1 km. Mengosongkan baterai timbal-asam 30-Wh/kg sepenuhnya akan membawa seorang musafir menempuh jarak ( $d$ ) berat baterai per unit:

$$d = (30 \text{ Wh/kg}) / (10 \text{ Wh/km}) = 3 \text{ km/kg berat baterai}$$

Alih-alih mengosongkan baterai sepenuhnya, kami mungkin mengasumsikan kedalaman pengosongan 80 persen, yang menghasilkan bobot baterai 2,4 km/kg. Batas yang lebih masuk akal untuk kedalaman pengosongan untuk masa pakai baterai yang lebih lama adalah 60 persen, yang menghasilkan bobot baterai 1,8 km/kg. Informasi lebih lanjut tentang kedalaman debit diberikan dalam Bab 3. Suatu rumus umum yang memberikan biaya investasi baterai ( $C_m$ ) per satuan jarak tempuh selama masa pakai baterai adalah:

$$C_m = E_u C_E / N D_{\text{dis}} \quad (2.11)$$

di mana:

$E_u$  = penggunaan energi per satuan jarak, Wh/km

$C_E$  = biaya purchase baterai per Wh

$N$  = berapa kali baterai diisi ulang setelah pengosongan

$D_{\text{dis}}$  = kedalaman pengosongan baterai setiap kali baterai habis

Dan  $D_{dis}$  dinyatakan sebagai faktor, dengan nilai kurang dari 1. Jika  $N$  mewakili jumlah siklus pengisian-pengisian ulang dari masa pakai baterai, seseorang dapat memperoleh biaya perjalanan relatif dengan menormalkan  $C_m$  ke masa pakai baterai yang paling lama. Hal ini dicapai dengan mengalikan dengan rasio  $N_{max} / N_l$  di mana  $N_{max}$  adalah baterai dengan siklus hidup terpanjang dan  $N_l$  adalah baterai yang diinginkan. Rasio ini menentukan berapa kali baterai dengan masa pakai lebih pendek perlu dibeli untuk memberikan jarak tempuh yang sama dengan masa pakai baterai yang lebih lama. Evaluasi ini dirangkum untuk kondisi tipikal pada Tabel 2.7 untuk enam jenis baterai.

Faktor lain akan masuk ke dalam biaya baterai. Misalnya, timbal-asam baterai dapat rusak jika dibiarkan kosong selama beberapa hari. Baterai nikel-kadmium akan lebih tahan terhadap penyalahgunaan semacam ini. Total biaya siklus hidup juga termasuk biaya energi listrik yang digunakan dalam perjalanan. Sebagai contoh, listrik yang harganya 10 cents/kWh sama dengan 0,01 cents/Wh. Dengan efisiensi pengisian baterai 50 persen biaya energi listrik ( $C_e$ ) adalah:

$$C_e = 0.02 \text{ cents/Wh} \times 12 \text{ Wh/km} = 0.24 \text{ cents/km}$$

Nilai ini atau yang serupa untuk wilayah Anda, bila ditambahkan ke biaya investasi baterai, memberikan total biaya siklus hidup baterai.

#### **Berat dan Volume Baterai**

Berat dan volume baterai juga penting. Itu hanya tergantung pada seberapa banyak Anda ingin membayar untuk kualitas menguntungkan lainnya ini dibandingkan dengan baterai yang lebih besar atau berat. Rumus volume dan berat masing-masing adalah:

$$V_b = DE_u / D_{dis} E_d \quad (\text{liters}) \quad (2.12)$$

$$W_b = DE_u / D_{dis} E_b \quad (\text{kg}) \quad (2.13)$$

di mana:

$D$  = jarak

$E_b$  = kandungan energi baterai, Wh/kg (juga disebut sebagai kerapatan energi gravimetri)

$D_{dis}$  = kedalaman debit seperti di atas

$E_d$  = kerapatan energi volumetrie, Wh/L

$E_u$  = penggunaan energi per satuan jarak, Wh/km

Dalam Bab 3 kita akan menunjukkan bahwa rapat energi bergantung pada seberapa besar daya yang diambil dari baterai. Lebih sedikit energi yang dapat diambil dari baterai, atau hampir setiap sumber energi, ketika lebih banyak daya diambil dari baterai atau sumber daya lainnya.

## 2.5 KENDARAAN RODA DUA BARU YANG UNIK

Kami mengilustrasikan penggunaan beberapa teknik analitik yang dikembangkan dalam bab ini dengan menerapkannya pada dua kendaraan roda dua yang unik dan menarik. Ilustrasi menunjukkan kemungkinan untuk mengevaluasi produk dan desain.

### Cheetah - Rieyele Supercepat

Dari waktu ke waktu Anda akan menemukan laporan tentang sepeda supercepat. Sepeda supercepat seperti itu adalah karya teknik dan keahlian yang luar biasa. Anda mungkin bertanya-tanya, sekarang Anda telah melihat beberapa persamaan dasar dari daya yang dibutuhkan untuk melakukan perjalanan, "Bagaimana mereka melakukannya?" Cheetah, dinamai demikian oleh mahasiswa pascasarjana di University of California di Berkeley, adalah sepeda yang menarik minat kami. Ini menetapkan rekor kecepatan dunia pada 22 September 1992 [5].

Referensi satu halaman ini tidak memberikan banyak informasi tentang bagaimana kinerja yang memecahkan rekor ini dicapai. Ini menunjukkan sepeda bertenaga manusia yang tertutup secara aerodinamis dan melaporkan bahwa ia melaju dengan kecepatan rata-rata 68,73 mph (110,61 kmph) pada jarak 656,2 kaki (200 m) dan berat 29,5 lb (13,37 kg). Pertunjukan yang dilaporkan ini telah dilakukan di jalan raya di Lembah San Luis di Colorado. Selungkup aerodinamis dilaporkan memiliki panjang 9 kaki dengan lebar 18 inci. Dari informasi ini kami ingin mengetahui: (1) berapa daya yang dibutuhkan dan (2) berapa koefisien drag aerodinamis?

Dengan menskalakan gambar dalam referensi untuk ketinggian pagar dan pengendara sepeda, mengacu pada peta, dan dengan asumsi pria berotot sedang adalah pengendara sepeda, kami menggunakan nilai berikut:

1. Luas bagian depan selungkup kira-kira berbentuk elips dengan sumbu minor 18 inci dan sumbu utama 51 inci, yang menghasilkan luas 5 ft<sup>2</sup> (0,46 m<sup>2</sup>).
2. Pengendara sepeda tingginya sekitar 64 inci dan beratnya sekitar 140 pon.
3. Ketinggian rute sekitar 8000 hingga 9000 kaki.

Dari informasi dan asumsi di atas, kami menghitung, untuk jalan datar, bahwa koefisien hambatan adalah antara 0,07 dan 0,09. Koefisien drag aerodinamis Tabel 2.1 menunjukkan bahwa ini akan berada di antara kategori teardrop dan airship-hull. Kami memperkirakan bahwa pengendara sepeda harus menghasilkan daya 490 hingga 630 W, tidak termasuk tahanan gelinding. Tambahan 60 hingga 120 W akan diperlukan untuk mengatasi hambatan gelinding yang ditentukan oleh asumsi koefisien gelinding 0,0025 hingga 0,005. Kekuatan ini, yang dibutuhkan pada kecepatan 68,73-mph, adalah rata-rata selama 6,5 detik perjalanan melalui jarak yang diukur.

Anda mungkin bertanya-tanya mengapa Colorado dipilih untuk demonstrasi. Alasannya adalah ketinggian tinggi dan udara kering. Ketinggian yang lebih tinggi memiliki atmosfer yang kurang padat, dan karenanya lebih sedikit hambatan udara. Tambahan 270 W daya akan diperlukan di permukaan laut untuk mencapai kecepatan yang sama.

Bagaimana pengendara sepeda mendapatkan kecepatan? Kita tidak tahu persisnya, tetapi jika pengendara sepeda dipercepat dengan kecepatan tetap 1 ft/s (0,68 mph, 0,31 m/s), kecepatannya akan tercapai dalam waktu sekitar 100 s. Daya yang dibutuhkan

pengendara sepeda akan meningkat secara linier dari 0 di awal menjadi yang dibutuhkan pada kecepatan yang ditunjukkan. Energi kumulatif yang dibutuhkan adalah sekitar 10 Wh.

### Skuter Segway

Kami belajar tentang hasil tes yang sangat mengesankan dari skuter Segway yang dijelaskan di Bab 1. Ini berjalan sepanjang jalan mobil ke puncak Gunung Washington di negara bagian New Hampshire. Jalan ini dimulai pada ketinggian 1585 ft dan naik ke 6181 ft dalam jarak 7,4 mil. Nilai rata-rata keseluruhannya adalah 11,7 persen.

Karena penasaran dengan aspek teknis Segway, kami menganalisis kemampuan power train-nya. Kami membuat asumsi berdasarkan pengalaman kami dengan motor, baterai, ban, dan aerodinamika manusia untuk menghitung konsumsi energi dan tingkat daya yang diperlukan untuk pendakian semacam itu. Kami menggunakan model komputer terverifikasi pengujian kami yang sebelumnya membuat perhitungan serupa untuk desain sepeda bertenaga listrik kami. Kami memasukkan ke dalam model komputer aspek fisik jalan raya yang dipublikasikan, termasuk ketinggian dan jarak untuk masing-masing dari 58 panjang segmen. Pilihan panjang masing-masing segmen bervariasi dan dipilih berdasarkan keberangkatan dari kenaikan elevasi yang seragam. Panjang rata-rata sebuah segmen adalah sekitar 1 km. Tiga puluh lima persen segmen memiliki kemiringan kelas lebih dari 19 persen, 46 persen memiliki nilai antara 10 dan 19 persen, dan 4 persen segmen memiliki nilai antara 0 dan 5 persen. Segmen yang tersisa panjangnya memiliki lereng yang menurun.

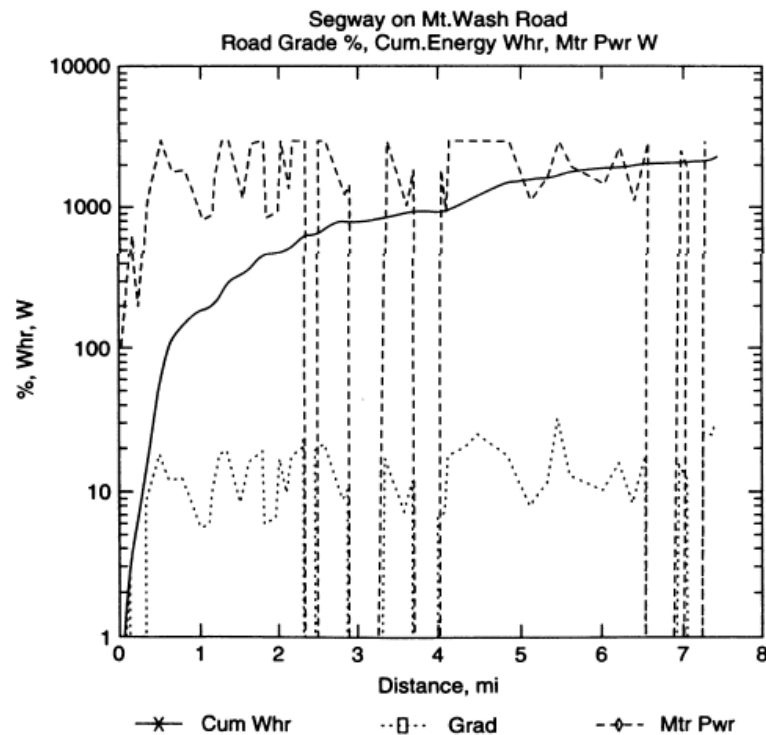
Parameter lain untuk pemodelan adalah nilai asumsi untuk tahanan guling roda, berat pengendara, area depan pengendara, koefisien hambatan, kondisi atmosfer standar tanpa angin, efisiensi sistem yang bervariasi dengan kemiringan jalan, dan kecepatan Segway yang bervariasi dengan grade jalan. Kecepatan Segway diasumsikan linier dengan kemiringan yang bervariasi dari 12 mph (19,3 kmph) pada kemiringan 0 persen hingga 2,5 mph (4,0 kmph) pada kemiringan 25 persen. Saat motor diberi beban, kecepatannya berkurang. Asumsi yang tersisa adalah:

Berat pengendara	165 lb
Koefisien tarik	1
Daerah depan	7.45 ft <sup>2</sup>
Koefisien bergulir	0,005
Kekuatan stabilisasi Segway	0 W

Efisiensi sistem berkisar dari 65 persen pada kemiringan jalan 0 persen, hingga 10 persen pada kemiringan jalan 20 persen, dan konstan 10 persen untuk kemiringan lebih dari 20 persen. Dalam demonstrasi ini, kemiringan jalan sedemikian rupa sehingga peringkat 4-hp gabungan dari dua motor Segway terlampaui lebih dari 30 persen dalam 33 persen segmen panjang yang dianalisis. Pada beberapa kesempatan, peringkatnya dilampaui hingga 50 persen. Segway pasti memiliki desain termal yang baik, atau kita mungkin salah dalam asumsi kita dan khususnya melebih-lebihkan kecepatan yang ditempuh. Hasil analisis, yang dirangkum dalam Gambar 2.5, menunjukkan energi kumulatif yang digunakan untuk jarak yang ditempuh, serta kemiringan jalan dan daya motor. Jarang terjadinya nilai negatif digunakan dalam perhitungan tetapi tidak diplot.



Dengan asumsi bahwa baterai hidrida logam nikel digunakan dan paket baterai dikatakan telah diganti enam kali, kami menemukan bahwa total konsumsi energi 2490 Wh akan disuplai dengan tujuh set baterai yang baru diisi. Hal ini menyebabkan perkiraan kapasitas baterai 355 Wh. Dengan menggunakan karakteristik kepadatan energi yang khas untuk baterai seperti 130 Wh/L dan 60 Wh/kg, kami menemukan bahwa paket baterai memiliki berat sekitar 6 kg, atau 13 lb, dan menempati volume sekitar 2,7 liter, atau 167 inci<sup>3</sup>. Ini mengasumsikan bahwa setiap paket baterai sepenuhnya habis dan energi yang dapat diabaikan itu digunakan untuk menstabilkan Segway.



**Gambar 2.5** Performa skuter selama perjalanan mendaki Mount Washington Road.

Perjalanan di medan datar menggunakan asumsi yang sama menghasilkan konsumsi energi 19,3 Wh/mile pada 12 mph dan 12,1 Wh/mile pada 8 mph. Menggunakan jangkauan maksimum 11-mil, kami menemukan bahwa paket baterai memasok 212 Wh untuk kecepatan perjalanan yang lebih tinggi. Terbukti, ini adalah kedalaman pelepasan 60 persen. Pada kecepatan yang lebih rendah, Segway seharusnya dapat menempuh jarak 17 mil (27 km).

## **BAB 3**

### **SUMBER LISTRIK UNTUK SEPEDA**

Baterai on-board pada sepeda listrik adalah komponen penggerak utama kendaraan ini ketika kinerja yang andal, masa pakai kendaraan yang lama, dan biaya per mil yang rendah diperlukan. Baterai telah digunakan untuk menyimpan energi selama beberapa dekade. Baru-baru ini, baterai penyimpan energi untuk pesawat ruang angkasa, pesawat terbang, dan aplikasi militer harus memenuhi peningkatan urutan besarnya dalam kemampuan penyimpanan energi dan waktu hidup. Baterai yang menggunakan proses elektrokimia baru dikembangkan dan diuji di lingkungan yang parah untuk membuktikan masa pakainya. Program penelitian dan pengembangan ini menghasilkan baterai yang ditingkatkan secara signifikan yang tersedia untuk menggerakkan sepeda listrik. Beberapa baterai baru ini didasarkan pada proses elektrokimia yang kompleks dan memerlukan voltase pengisian yang dikontrol dengan tepat. Dalam bab ini kami menjelaskan perkembangan baru ini sehingga pembaca dapat (1) memilih baterai yang paling memenuhi persyaratan kinerja, keandalan, dan biaya siklus hidup, (2) menentukan atau merancang kontrol pengisian daya baterai, dan (3) mengidentifikasi dan memperbaiki penyebab kekurangan atau kegagalan yang mungkin dihadapi selama masa pakai baterai.

#### **3.1 PENDAHULUAN**

Dalam paragraf pendahuluan, pertama-tama kita meninjau persyaratan penggerak sepeda dan kinerja baterai yang digunakan di masa lalu untuk sepeda propulsi. Kemudian kami merangkum topik yang harus dipertimbangkan dalam analisis di mana baterai berkinerja tinggi yang baru dibandingkan dengan baterai timbal-asam dan nikel-kadmium yang digunakan sebelumnya. Misalnya, baterai lithium ion Hitachi Maxeli dapat bertahan selama 25.000 siklus pengisian daya. Juga beratnya kurang dari seperempat berat baterai timbal-asam yang memiliki kapasitas penyimpanan energi yang sama. Pada sepeda yang kadang-kadang digunakan untuk perjalanan jarak pendek, baterai timbal-asam yang lebih murah mungkin merupakan pilihan terbaik. Untuk perjalanan harian, baterai timbal-asam mungkin harus diganti setiap tahun. Baterai lithium ion bisa bertahan selama beberapa dekade.

Kami memperkenalkan subjek elektrokimia baterai dengan meringkas fitur penyimpanan energi yang sesuai dari baterai timbal-asam, yang masih digunakan untuk menghidupkan mesin mobil. Sel timbal-asam memberi daya pada sepeda yang telah kami instrumen untuk mengukur konsumsi energi propulsi di mendaki bukit yang memiliki berbagai tingkat dan dalam perjalanan di jalan raya dengan berbagai permukaan jalan. Namun, baterai timbal-asam itu berat dan masa pakainya terbatas ketika dayanya habis selama setiap penggunaan. Akibatnya, baterai timbal-asam tidak cocok untuk menyimpan energi di kendaraan ruang angkasa, sehingga baterai nikel-kadmium, nikel-logam hidrida, dan nikel-hidrogen dikembangkan untuk pesawat ruang angkasa yang mengorbit bumi. Baterai pesawat ruang angkasa ini terlalu mahal untuk penggerak sepeda listrik.

Kebutuhan akan baterai yang ringan dan tahan lama yang menyimpan daya dalam peralatan komunikasi telah memotivasi program pengembangan di seluruh dunia yang kini

memproduksi jenis baterai baru. Contohnya adalah baterai lithium-ion, yang sekarang diproduksi massal dan memenuhi kebutuhan ini. Namun, sel litium sangat sensitif terhadap suhu, dan sel dapat rusak jika diisi daya secara berlebihan. Pengontrol pengisian daya sirkuit terpadu yang canggih, yang dijelaskan dalam Bab 4, dapat mencegah kerusakan baterai akibat suhu sel yang tidak terduga.

Pada bagian berikut, kami menjelaskan fitur terkait baterai yang, bila dikontrol dengan benar, telah memberikan layanan bertahun-tahun pada satelit yang mengorbit bumi dengan sukses. Kemudian kami mengevaluasi baterai baru yang, meskipun rumit, memberikan kinerja luar biasa yang berkaitan dengan penggunaannya dalam menggerakkan sepeda listrik untuk jarak tempuh yang jauh antara pengisian baterai. Kandidat terbaik adalah baterai lithium ion. Di antara sistem penyimpanan energi baru yang memiliki potensi untuk penggerak sepeda adalah baterai nikel-hidrogen, baterai perak-seng, dan baterai natrium-sulfur.

Dalam Bagian 3.3 kami menjelaskan kinerja sel bahan bakar. Prototipe pembangkit listrik sel bahan bakar berbahan bakar hidrogen pernah dipasang di New York City dan Tokyo karena efisiensinya lebih tinggi daripada efisiensi yang tersedia di pembangkit listrik turbin uap yang membakar batu bara. Pembangkit listrik siklus gabungan terbaik saat ini mengubah energi dalam gas alam menjadi tenaga listrik dengan efisiensi lebih dari 65 persen. Akibatnya, pengembangan sel bahan bakar untuk digunakan dalam penggunaan pembangkit listrik telah berakhir. Pengembangan sel bahan bakar kemudian diarahkan ke aplikasi pesawat ruang angkasa, dan misi bulan berawak ditenagai dengan sel bahan bakar yang mengonsumsi hidrogen yang juga menghasilkan air sebagai produk sampingan.

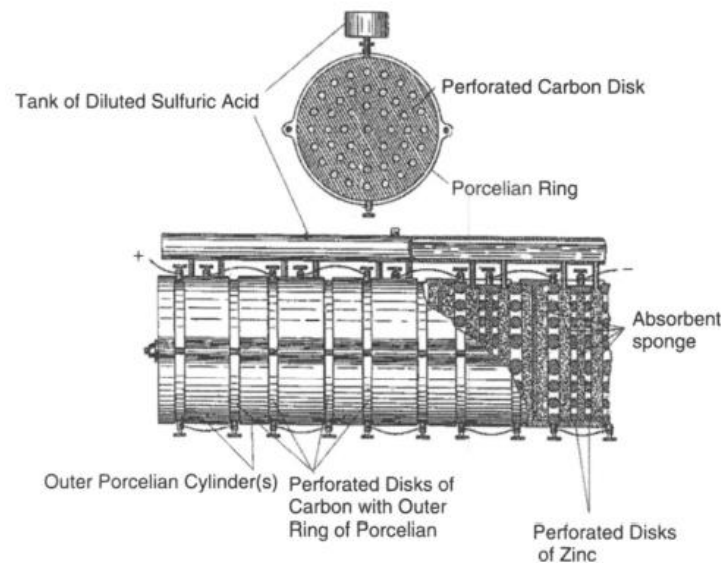
Infrastruktur yang akan mendukung armada kendaraan berbahan bakar hidrogen akan rumit. Pengembangan saat ini adalah untuk mengirimkan bahan bakar amoniak ke kendaraan. Unit katalitik pembawa kendaraan sederhana akan melepaskan hidrogen dari amonia. Bahan bakar hidrogen akan merepotkan untuk dibawa dengan sepeda, tetapi sel bahan bakar seng-udara baru, yang sedang diuji di mobil dan bus, mungkin memberi daya pada sepeda listrik. Pengisian bahan bakar hanya membutuhkan pengurusan elektrolit yang mengandung seng dan menuangkan elektrolit segar dan bubuk seng ke dalam sel.

### **Baterai Rieyele Electric 1895**

Pada tanggal 27 Januari 1894, Hosea W. Libbey dari Boston, Massachusetts, mengajukan paten [1] untuk baterai seng-karbon yang ia gunakan dalam sepeda listrik yang ia temukan pada tahun 1897. Baterai silinder ditunjukkan pada Gambar 3.1. Dia juga memiliki rencana untuk memasang baterai di atas mobil troli, memanjang dari satu ujung ke ujung lainnya. Namun, dalam penemuan sepedanya, ia menunjukkan baterai memiliki bagian bawah berbentuk persegi panjang yang sempit dan bagian atas berkubah. Itu untuk masuk ke dalam bingkai segitiga sepeda antara pengendara sepeda dan tabung penyangga depan.

Setiap sel dalam baterai Libbey berisi sepasang cakram karbon berlubang yang terhubung ke terminal positif. Setiap piringan dipisahkan, dengan spons penyerap, dari sepasang piringan seng berlubang yang membentuk terminal negatif baterai. Spons direndam dengan asam sulfat encer. Asam disimpan dalam silinder sempit di atas baterai dan digunakan oleh operator seperlunya untuk memberi makan spons setetes demi setetes. Rakitan tidak akan bocor bahkan jika sepeda terbalik. Secara berkala, baterai dapat dibongkar untuk

membersihkan disk untuk mengembalikan daya awalnya. Baut memanjang yang melewati tab di bagian luar selungkup silinder porselen menyatukan sel.



**Gambar 3.1** Penemuan baterai karbon-seng dari tahun 1895 oleh Hosea Libbey. (Setelah Libbey [1].)

### 3.2 PERSYARATAN BATERAI UNTUK MENGHIDUPKAN SEPEDA LISTRIK

Memilih baterai untuk aplikasi tertentu adalah prosedur rekayasa sistem di mana a11 persyaratan didefinisikan dan diukur. Kemudian semua data yang tersedia terkait dengan alternatif pemenuhan kebutuhan aplikasi dianalisis. Konfirmasi tes dilakukan bila diperlukan. Setelah itu alternatif terbaik dapat direkomendasikan untuk diadopsi. Prosedur ini dijelaskan dalam Bab 6. Performa sepeda listrik yang dibutuhkan memengaruhi baterai tempat energi disimpan. Misalnya, sepeda listrik yang dirancang untuk melakukan perjalanan belanja singkat ke toko kelontong dan membawa beban berat kembali ke tempat tinggal pemiliknya dapat menjalankan fungsinya dengan baterai timbal-asam.

Di sisi lain, baterai timbal-asam yang mengandung energi yang dibutuhkan untuk perjalanan sehari antara pengisian daya tidak praktis pada sepeda karena akan terlalu berat. Baterai yang digunakan untuk perjalanan sehari-hari berkecepatan tinggi sejauh 20 mil antara klakson dan tempat kerja juga perlu membawa energi yang cukup besar. Untuk penggunaan ini, biaya baterai lithium ion Hitachi Maxeli per hari bisa jadi tidak berarti. Dalam uji hidup, kinerja baterai ini hanya menurun sebesar 20 persen setelah 25.000 siklus pengisian-pengosongan. Jika itu mendukung perjalanan setiap hari setelah diisi daya setiap malam, maka sepeda itu harus diganti dengan sepeda listrik setelah 60 tahun digunakan.

#### Persyaratan

Persyaratan berikut perlu diukur untuk proses pemilihan baterai:

- Performa sepeda listrik yang diperlukan dalam hal jarak tempuh dengan pengisian daya baterai penuh, bobot baterai yang diizinkan, dan daya yang diperlukan untuk bepergian saat tidak ada daya pedal yang disediakan
- Massa maksimum sepeda, pengendara, dan baterai

- Bukit terjal yang harus didaki, kemiringan dan panjangnya, kecepatan panjat yang dibutuhkan, dan seberapa besar tenaga pedal yang tersedia
- Kisaran suhu di lingkungan pengoperasian sepeda
- Masa pakai baterai minimum yang diperlukan dalam layanan charge-discharge
- Jenis layanan lain untuk sepeda mungkin digunakan, seperti ping toko lokal, perjalanan ke tempat kerja, tur mingguan, dan tur bulanan atau tahunan jarak jauh

Pertimbangan lain yang dapat mempengaruhi pemilihan baterai termasuk keinginan pribadi untuk kemudahan perjalanan dan pentingnya memaksimalkan penghematan biaya energi.

### **Ketidakpastian Pemilihan Baterai**

Beberapa data yang diperlukan untuk proses pemilihan baterai sepeda listrik mungkin tidak tersedia. Misalnya, Mitsubishi melaporkan masa pakai siklus pengisian-pengosongan 35.000 untuk sel ion litium 100-Ah-nya ketika dikosongkan hingga 30 persen dari kapasitasnya. Pada akhir kehidupan mereka masih menghasilkan 75 Ah di setiap debit. Namun, keseimbangan sel canggih dan kontrol batas tegangan sel mungkin digunakan dalam pengujian yang menghasilkan hasil ini.

Kontrol pengisian baterai sirkuit terpadu yang menjamin masa pakai baterai ini mungkin tersedia untuk sel pertama yang tersedia secara komersial. Lima tahun kemudian kontrol biaya yang lebih rendah dapat diadopsi. Misalkan kontrol asli gagal setelah 20.000 siklus pengisian-pengosongan. Penempatan malam tidak tersedia, jadi baterai dan pengontrol baru mungkin harus dibeli. Juga persyaratan jalur sepeda antara klakson dan tempat kerja dapat berubah seiring kenaikan harga bensin dan lebih banyak jalan raya yang diubah menjadi jalur sepeda. Pemilik mungkin berganti pekerjaan dan pindah ke komunitas lain di mana dia bersepeda antara horne dan tempat kerja. Selama masa pakainya, baterai yang diadopsi mungkin menunjukkan penurunan kapasitas yang tidak terduga yang tidak terjadi selama uji masa pakainya yang dipercepat.

Pendekatan rekayasa sistem terhadap kemungkinan perubahan tak terduga adalah dengan menentukan kapasitas baterai yang setidaknya 20 persen lebih tinggi dari yang ditunjukkan oleh prosedur analitis. Hal ini menyebabkan sepeda membawa beban baterai ekstra, yang mungkin hanya beberapa ons jika menggunakan baterai lithium. Biaya tambahan daya pengisian daya baterai untuk mendorong beban ekstra ini mungkin hanya beberapa sen per hari.

### **Perbandingan Energi Terukur pada Mobil Listrik**

Program pengembangan mobil listrik dunia menghasilkan data yang berkaitan dengan pemilihan baterai sepeda. Kekurangan bahan bakar yang akan datang, yang jarang dipublikasikan, mempercepat penelitian dan pengembangan alternatif untuk transportasi bertenaga bensin di mobil listrik.

Tahun 2003 Michelin Challenge Bibendum, kompetisi 3 hari antara mobil listrik terbaru di Infineon Raceway di Sonoma, California, memberikan data yang berguna tentang biaya bahan bakar untuk kendaraan listrik. Dari 50 mobil listrik dan truk ringan yang berlaga di ajang ini, pemenangnya adalah tZero, mobil sport elektrik dua kursi yang dibuat oleh AC Propulsion [2]. Paket baterainya terdiri dari 8600 sel lithium ion, masing-masing sel berdiameter 18 mm (0,71 inci). Panjang 655 mm (2,58 inci). tZero memenangkan uji kecepatan perjalanan dengan menempuh 100 mil (160 km) pada kecepatan 50 mph (80 km/h). Dalam putaran lain, ia telah

menempuh jarak 280 mHes (450 km) dengan sekali pengisian daya baterai. Ia dapat menempuh jarak 153 mil (246 km) dengan menggunakan 33,8 kWh, yang merupakan energi dalam 1 galon bensin. Kendaraan listrik ini jelas mengurangi biaya perjalanan. Namun, masih berkontribusi terhadap polusi udara dan konsumsi minyak bumi nasional karena minyak bumi adalah sumber energi umum untuk pembangkit listrik.

21,7 kWh daya listrik yang dibutuhkan untuk roda ekonomi tZero dapat dihasilkan dari bahan bakar minyak yang melepaskan 146.900 Btu panas per galon yang dibakar. Energi dalam 1 kWh sama dengan 3410 Btu, jadi 1 gal minyak dapat menghasilkan 25,8 kWh dari pembangkit listrik yang 60 persen efisien. Jadi, untuk menghasilkan 21,7 kWh yang dibutuhkan tZero untuk menempuh jarak 101 mil pada 45 rnhp, ditambah rugi-rugi transmisi dan distribusi daya, pembangkit listrik harus membakar dan melepaskan karbon dioksida dari setidaknya 1 gal minyak.

Kita dapat menyimpulkan bahwa mobil listrik dapat mengurangi jumlah minyak bumi yang dikonsumsi oleh perjalanan mobil di suatu negara. Konsumsi minyak bumi untuk perjalanan akan menjadi nol jika kendaraan bertenaga baterai diisi ulang dengan tenaga dari pembangkit listrik tenaga nuklir. Mengganti mobil dengan sepeda listrik akan mengurangi konsumsi minyak bumi secara signifikan, bahkan jika daya isi ulang baterainya berasal dari pembangkit listrik berbahan bakar minyak. Sepeda listrik dapat menempuh jarak sekitar 2100 km (1300 mil) dengan 21,7 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga minyak bumi dari 1 gal minyak bumi.

### **3.3 KARAKTERISTIK BATERAI YANG SESUAI UNTUK PROPULSI SEPEDA LISTRIK**

Komponen kunci dari sepeda listrik yang berguna adalah baterai di mana energi disimpan untuk menambah tenaga pedal. Jenis baterai yang tersedia berkisar dari timbal-asam, yang dapat menghasilkan 20 Wh/kg berat baterai, hingga baterai lithium ion baru yang dapat menghasilkan 160 Wh/kg. Laboratorium penelitian telah membangun sel lithium yang menghasilkan hingga 400 Wh/kg [3]. SAFT America telah mengembangkan sel VLE tipenya yang menampilkan energi spesifik 195 Wh/kg. AGM Batteries Limited telah memperoleh 235 Wh/kg dalam sel 6-Ah 36550 yang didasarkan pada bubuk logam lithium stabil (SLMP). Perlindungan kelebihan muatan elektronik dalam sel mendeteksi dan menyimpangkan arus muatan saat sel terisi penuh [4]. Banyak faktor yang harus dipertimbangkan dalam memilih jenis baterai untuk sepeda listrik karena persyaratannya yang kompleks. Misalnya, kegagalan baterai selama perjalanan melalui lalu lintas yang padat atau mendaki bukit yang curam dapat menjadi peristiwa yang serius.

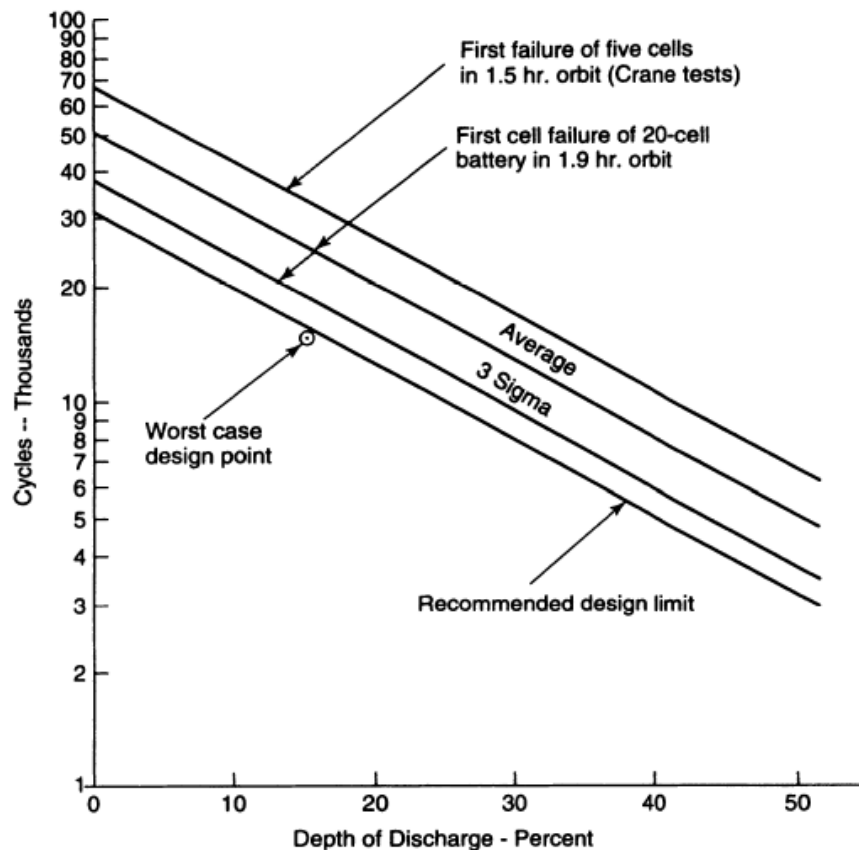
Baterai dengan masa pakai yang singkat dalam siklus pengisian-pengosongan akan membutuhkan penggantian yang sering, yang meningkatkan biaya siklus hidupnya. Baterai yang berat membutuhkan energi untuk mengangkutnya ke atas bukit dengan sepeda. Energi ini harus dihisap oleh musisi pengendara sepeda atau dari energi yang dibawa dalam baterai. Masa pakai baterai yang lama dicapai dalam baterai yang ringan dengan sirkuit kontrol pengisian daya yang canggih yang mencegah pengisian sel yang berlebihan dalam baterai. Baterai yang tersedia saat ini dapat diganti di pasar dengan baterai yang lebih baik, yang memerlukan kontrol pengisian daya yang canggih. Kontrol pengisian daya yang lebih lama mungkin tidak lagi tersedia.

Masalah kompleks, seperti pemilihan jenis baterai untuk sepeda listrik, paling baik diselesaikan dengan prosedur pengambilan keputusan dirgantara yang disebut "rekayasa sistem", yang dijelaskan dalam Bab 6. Langkah pertama dalam prosedur ini adalah menghitung semua kebutuhan sistem yang sedang dikembangkan. Langkah kedua adalah membuat desain alternatif yang memenuhi persyaratan ini dengan kinerja dan keandalan yang diperlukan serta risiko terukur yang diidentifikasi untuk masing-masing rancangan. Langkah ketiga adalah menghitung biaya siklus hidup setiap desain dan menghitung semua risiko yang terlibat. Pilihan terbaik, dengan risiko yang disebutkan, kemudian ditawarkan kepada otoritas pembuat keputusan.

#### **Kandidat Rattery untuk Propulsi Electric Rieyele**

Program eksplorasi ruang angkasa dan komunikasi satelit dunia telah mendukung pengembangan intensif baterai ringan dengan keandalan tinggi untuk kendaraan dirgantara. Misalnya, satelit yang mengorbit Bumi awal menggunakan baterai nikel-kadmium. Mereka memiliki masa pakai yang singkat, sekitar 3000 siklus pengisian-pengosongan jika 50 persen dari kandungan energinya diekstraksi selama setiap pelepasan. Mengganti satelit yang tidak berguna membutuhkan satelit baru yang biaya peluncurannya Rp 450.000.000 pound. Pengujian selama bertahun-tahun di Laboratorium Riset Angkatan Laut AS menunjukkan bahwa masa pakai baterai nikel-kadmium dapat diperpanjang hingga masa pakai satelit dengan menghabiskan hanya 15 persen dari energi baterai nikel-kadmium yang tersimpan selama setiap periode terik matahari dari satelit orbit (Gambar. 3.2).

Produk awal yang signifikan dari penelitian kekuatan pesawat ruang angkasa ini adalah baterai nikel-hidrogen, yang dapat dikosongkan sepenuhnya di setiap periode okultisme matahari, Kehidupan 37.000 siklus pengisian-pengosongan telah diperoleh. Baterai nikel metal-hidrida diikuti, dan pada tahun 2004 baterai polimer lithium memenuhi syarat untuk penggunaan ruang angkasa. Sel bahan bakar hidrogen/oksigen digunakan di pesawat ruang angkasa berawak dan di Stasiun Luar Angkasa Internasional. Kebutuhan baru akan sumber energi listrik ringan dengan keandalan tinggi datang dari produsen komputer jinjing, peralatan komunikasi, dan alat bantu navigasi portabel. Ketersediaan tautan data satelit Bumi menghasilkan pasar yang besar untuk produk komunikasi dan navigasi kelas berat ini. Kebutuhan konsekuen untuk sumber daya keandalan tinggi yang ringan untuk aplikasi ini memotivasi program pengembangan baterai lithium di seluruh dunia yang intens.



**Gambar 3.2** Masa pakai belut nikel-kadmium, bila diukur dalam siklus pengisian-pengosongan, akan berkurang jika baterai benar-benar habis di each cycle. (Dari H. Oman, Buku Pegangan Rekayasa Sistem Energi, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.)

Pabrik sekarang memproduksi secara massal sel ion litium kecil yang memiliki kandungan energi spesifik yang tinggi dan masa pakai yang lama dalam layanan pengisian daya. Produk populer dari pengembangan ini adalah sel lithium ion tipe 18650, yang diproduksi oleh banyak pabrik. Diameternya 18 mm (0,71 inci) dengan panjang 65 mm (2,58 inci). Kandungan energi tipikalnya, saat terisi penuh, adalah 169 Wh/kg. Sel-sel ini sedang dirakit menjadi baterai untuk aplikasi lain yang bahkan termasuk mobil listrik seperti tZero. Kandidat baterai terbaik untuk menyimpan energi penggerak listrik untuk sepeda listrik tercantum dalam Bagian 3.2.7. Baterai timbal-asam mendorong mobil listrik pada awal abad kedua puluh dan masih digunakan untuk penggerak truk pengangkat listrik. Mereka juga digunakan untuk memberikan daya yang memulai mesin mobil. Namun, bobotnya yang lebih tinggi, yang setara dengan 20 hingga 40 Wh/kg, membuatnya tidak praktis untuk kebanyakan sepeda seperti baterai berenergi lebih tinggi lainnya. Juga, umur jaminan tipikal mereka untuk penggunaan mobil biasanya hanya 38 hingga 60 bulan sejak tanggal pembelian.

#### **Kontrol Pengisian Daya Baterai Sepeda Berumur Panjang**

Baterai timbal-asam berventilasi di masa lalu memiliki masa pakai yang dapat diterima untuk layanan pelepasan muatan di klakson, mobil, dan pesawat terbang. Overcharge akan mengelektrolisis menjadi hidrogen dan oksigen air yang diencerkan asam sulfat dalam elektrolit baterai. Gas hidrogen dan oksigen ini akan melewati lubang ventilasi di tutup sel ke atmosfer. Pemilik baterai harus secara berkala memeriksa baterainya dengan hidrometer dan



menambahkan air ketika elektrolit hampir habis. Masa pakai baterai bergantung pada prosedur ini untuk memastikan kualitas elektrolit baterai.

Industri baterai menanggapi kebutuhan pemeliharaan ini dengan mengembangkan baterai timbal-asam yang disegel. Setiap sel memiliki katup pelepas tekanan di tutupnya. Selama overcharge, proses elektrolisis menghasilkan hidrogen dari air pada elektroda negatif. Hidrogen ini kemudian melayang ke ruang di atas elektroda positif. Tekanan gas hidrogen meningkat hingga cukup tinggi untuk dikeluarkan hidrogen melalui katup pelepas tekanan di penutup sel. Oksigen yang dihasilkan pada pelat timbal berpori positif akan mengalir melalui elektrolit ke elektroda timbal negatif. Namun, elektroda negatif yang terisi penuh sudah ditutupi dengan timbal oksida dan tidak dapat menyerap oksigen lagi. Surplus oksigen ini kemudian hanyut kembali melalui elektrolit ke elektroda positif, di mana ia memasuki pori-pori elektroda itu dan menyumbatnya dengan timbal oksida. Ini menurunkan kapasitas penyimpanan energi baterai yang disegel ke tingkat di mana baterai harus diganti.

Baterai timbal-asam yang digunakan untuk menyimpan energi di instalasi utilitas listrik memiliki kontrol yang merasakan pengisian yang berlebihan dan berhenti mengisi ulang sebelum pengisian yang berlebihan dapat mulai mengelektrolisis elektrolit. Namun, membawa timbal yang relatif berat dalam baterai timbal-asam dengan sepeda tidak sepraktis dulu. Kita sekarang dapat menyimpan elektron dalam logam yang jauh lebih ringan seperti lithium. Komponen sirkuit terpadu yang canggih dapat secara efektif mengontrol pengisian dan pemakaian baterai lithium ion.

Mengevaluasi Alternatif Penyimpanan Energi untuk Penggerak Bicyc/e Komponen terpenting dalam sepeda listrik bertenaga baterai adalah baterai yang memasok daya penggerak. Berbagai macam elektrokimia baterai tersedia untuk dipilih dalam aplikasi ini. Setiap elektrokimia memiliki fitur unik yang memengaruhi (1) kandungan energi baterai dalam watt-jam per kilogram, (2) masa pakai dalam hal jumlah siklus pengisian-pengosongan, (3) biaya pertama dan biaya siklus hidup, dan (4) keunikan fitur seperti kemampuan untuk bertahan hidup dalam kondisi habis.

Pada bagian berikut, pertama-tama kita tinjau (1) karakteristik terkait dari baterai terbaik untuk penggerak sepeda listrik, (2) prosedur pengujian yang diadopsi, dan (3) batasan penerapan setiap jenis baterai untuk sepeda listrik. Kami kemudian mencari jenis baterai lain untuk menemukan baterai terbaik untuk memenuhi berbagai persyaratan jangkauan dan kinerja sepeda listrik.

Elemen penting dalam mobil listrik bertenaga baterai adalah efisiensi keseluruhan yang mencakup efisiensi pengisian baterai, serta efisiensi baterainya untuk menyimpan energi untuk motor yang menggerakkan roda mobil. Semua kerugian daya menambah biaya yang harus dibayar ke utilitas listrik yang memasok daya. Jika tenaga surya digunakan untuk mengisi ulang baterai, area panel surya yang mahal harus cukup besar untuk mengirimkan semua kehilangan energi sistem serta energi yang menggerakkan kendaraan.

Evaluasi calon baterai untuk menggerakkan sepeda listrik melibatkan banyak faktor yang tidak dipublikasikan oleh produsen sepeda. Misalnya, baterai yang mengontrol start, penyalan, dan penerangan mobil mungkin merupakan baterai dengan biaya terendah yang tersedia. Namun, literatur penjualannya tidak akan mengungkapkan masa pakai siklus di bawah IO<sub>ü</sub> jika benar-benar habis dalam setiap siklus pengisian-pengosongan.

Hasil penelitian dan pengembangan dari program pengembangan baterai yang didanai dengan baik adalah alat yang berguna bagi perancang sistem penyimpanan energi untuk sepeda listrik. Dalam paragraf berikut kami merangkum data yang berkaitan dengan desain, konstruksi, dan kinerja sepeda listrik. Beberapa kesimpulan umum dari penelitian awal dalam program penyimpanan energi dirantara ini adalah:

- Masa pakai peralatan penyimpan energi baru selama 20 tahun sulit ditentukan dalam uji 1 tahun.
- Baterai penyalan-pencahayaan-start yang digunakan dalam mobil memiliki masa pakai, bila dikosongkan dalam-dalam, 100 siklus pengisian-pengosongan.
- Baterai nikel-kadmium dan nikel-kadmium dapat dibuat untuk bertahan setidaknya 30 tahun

Definisi Jenis Baterai, Komponen, dan Performa Baterai dikembangkan di banyak negara, menggunakan elektrokimia yang berbeda, dan untuk berbagai tujuan. Akibatnya, kinerja dan masa pakai baterai sering digambarkan dengan istilah yang tidak biasa. Dalam paragraf berikut, kami menjelaskan istilah-istilah yang digunakan untuk menentukan kinerja baterai dan komponen baterai apa yang memengaruhi kinerja berbagai jenis baterai. Efisiensi Efisiensi penyimpanan energi adalah energi yang diperoleh kembali dari mekanisme penyimpanan dibagi dengan energi yang dikirim ke sana. Misalnya, dalam baterai pencukur puncak utilitas publik, kerugian harus mencakup kerugian pada transformator dan penyearah yang mengisi baterai, inverter yang membuat arus bolak-balik (ac) keluar dari keluaran baterai arus searah (dc), serta sebagai baterai dan kontrol kerugian. Efisiensi Coulomb adalah ampere-jam yang diberikan oleh baterai dibagi dengan ampere-jam yang dibutuhkan untuk mengisi ulang.

Baterai Penyimpanan Baterai penyimpanan adalah kombinasi dari elektroda positif, yang kadang-kadang disebut katoda selama pelepasan, dan elektroda negatif, yang disebut anoda selama pelepasan. Elektroda ini, ditambah elektrolit, diatur untuk menerima arus muatan dari sumber daya dc dan memberikan daya ke beban saat pemakaian. Sel baterai adalah unit yang memiliki satu atau lebih pelat negatif secara paralel dan satu atau lebih pelat positif secara paralel, semuanya direndam dalam elektrolit yang sama. Dua atau lebih sel yang dihubungkan secara seri disebut baterai. Sel tunggal juga sering disebut baterai. Di antara baterai penyimpanan terkecil adalah yang dipasang di papan sirkuit komputer untuk menjaga memori akses acak tetap hidup. Beberapa baterai terbesar dipasang di kapal selam untuk memasok tenaga penggerak saat kapal tenggelam. Baterai penyimpanan telah berevolusi untuk memenuhi persyaratan aplikasi. Bat teries yang dirancang untuk satu aplikasi belum tentu cocok untuk aplikasi lain. Misalnya, baterai penyalan penyalan awal tidak akan bertahan lama dalam layanan traksi. Fitur energi penting dari baterai adalah:

- Baterai dapat memiliki efisiensi hampir 100 persen coulomb karena setiap coulomb muatan diperoleh kembali selama pengosongan. Namun, beberapa baterai perlu sering diisi ulang.
- Tegangan pengisian selalu lebih tinggi dari tegangan pemakaian pada keadaan pengisian tertentu. Perbedaan tegangan, yang tergantung pada kerapatan arus, mewakili kerugian.

- Masa pakai baterai, dalam hal jumlah siklus pengisian-pengosongan, umumnya bervariasi dengan kedalaman pengosongan di mana pelepasan yang dalam mempersingkat masa pakai siklus.
- Harga baterai dipengaruhi oleh biaya bahan dan teknologi manufaktur. Harga timah telah bervariasi dengan faktor 2 selama setahun.

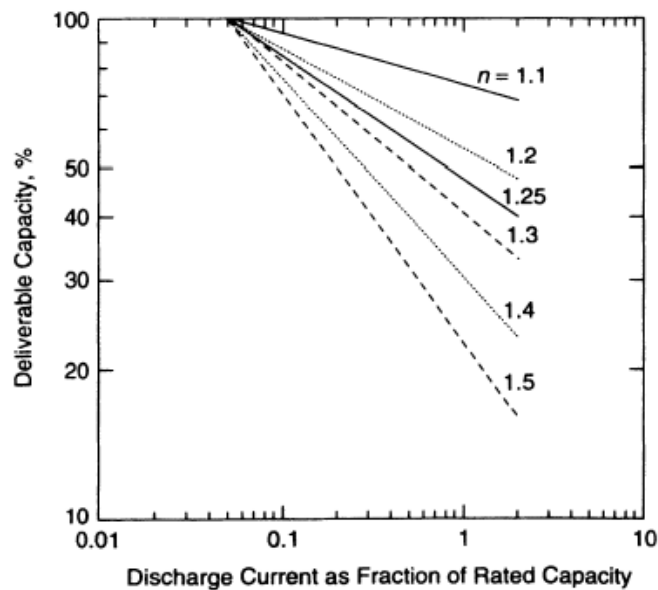
Kapasitas Energi Baterai Meskipun seseorang ingin mendefinisikan kapasitas energi suatu sumber sebagai nilai tetap yang diberikan, sebenarnya tidak. Tampaknya untuk setiap sumber energi yang dapat dibayangkan, semakin cepat Anda menarik energi darinya, semakin sedikit yang dapat dipasok sepenuhnya. Ini termasuk manusia yang dapat mengirimkan sejumlah energi untuk waktu yang berbanding terbalik dengan jumlah daya yang dikirimkan. Ini juga berlaku untuk baterai, sel bahan bakar, dan generator listrik.

Kapasitas baterai biasanya diukur dalam ampere-jam pada suhu dan laju pengosongan tertentu. Seringkali kapasitas baterai saat ini dikutip sebagai  $C/x$ , di mana  $C$  adalah kapasitas ampere-jam baterai dan  $x$  dalam jam. Jika arus konstan 50 A akan benar-benar melepaskan sel 500 Ah dalam 10 jam, maka arus ini disebut laju  $C/10$ . Tersedia eapacity selama periode pelepasan, biasanya selama 6, 8, atau 20 jam, dinyatakan sebagai nilai ampere-jam. Kapasitas baterai biasanya dipengaruhi oleh suhu, dengan penurunan kapasitas saat suhu diturunkan. Juga berkaitan dengan penunjukan efisiensi baterai adalah tegangan akhir pengosongan terendah yang dapat diterima.

Kadang-kadang baterai timbal-asam dikatakan mencapai titik akhir masa pakainya ketika kapasitas ampere-jam yang tersedia adalah 80 persen dari kapasitas pengenal. Baterai yang dirancang untuk layanan eycling dapat meningkatkan kapasitasnya selama beberapa ratus mata pertama, jadi kadang-kadang kapasitas aktualnya bisa lebih dari kapasitas nominalnya. Kedalaman pengosongan dinyatakan sebagai persen dari daya ampere-jam baterai yang dikeluarkan selama satu pengosongan. Misalnya, pelepasan baterai dengan kedalaman 60 persen membutuhkan 60 Ah dari baterai 100-Ah, menyisakan 40 Ah dalam baterai. Seseorang dapat berharap untuk menarik arus listrik dari baterai pada laju ampere tertentu selama periode waktu yang bergantung pada peringkat baterai. Baterai akan menghasilkan lebih sedikit ampere-jam jika lebih banyak arus ditarik daripada nilai pengenal. Ini dikenal sebagai efek Peukert. Versi sederhana yang dapat diterapkan untuk baterai timbal-asam, tidak termasuk efek suhu, adalah:

$$C_p = I^n T \quad (3.1)$$

di mana  $C_p$  adalah kapasitas dalam ampere-jam,  $I$  adalah aliran arus dalam ampere,  $n$  adalah eksponen Peukert, dan  $T$  adalah waktu dalam jam. Pengalaman R. L. Proctor [5] adalah bahwa baterai timbal-asam pelat datar akan memiliki  $n$  1,25 hingga 1,3. Baterai gel dan beberapa baterai pelat spiral akan memiliki  $n$  serendah 1,1. Plot dari persamaan ini dengan suku-suku yang dinormalisasi ke tingkat kapasitas baterai ditunjukkan pada Gambar 3.3.



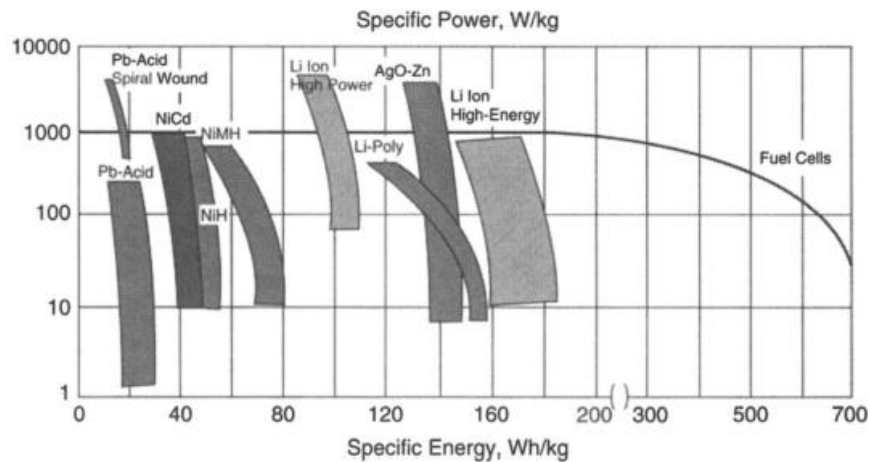
**Gambar 3.3** Kapasitas baterai versus laju pengosongan berdasarkan efek Peukert. (Setelah Pengawas [5].)

Arus pelepasan yang ditarik oleh motor pada sepeda listrik akan bervariasi sesuai dengan beban motor tergantung pada banyak variabel. Angin, berat, dan kemiringan jalan adalah yang utama, seperti yang kami tunjukkan di Bab 2. Secara umum, tampaknya tidak diinginkan untuk mengoperasikan baterai pada 10 persen dari kapasitas ampere-jamnya. Hasilnya adalah daya tahan baterai yang lama dan jarak tempuh yang jauh tetapi dengan biaya bobot yang tinggi. Praktiknya telah beroperasi di wilayah 50 hingga 100 persen kapasitas untuk level travel. Orang akan melihat bahwa dalam iklan sepeda listrik jarak tempuh seringkali sama dengan nilai kecepatan. (Sepertinya ini juga berlaku untuk mobil listrik.) Ini menyiratkan bahwa baterai habis dalam waktu 1 jam. Jadi, baterai digunakan pada tingkat perkiraan yang sama dengan 100 persen dari kapasitasnya.

Baterai yang dirancang untuk servis bersepeda dapat ditingkatkan kapasitasnya selama beberapa ratus siklus pertama, sehingga terkadang kapasitas aktualnya dapat melebihi kapasitas terukurnya. Kita melihat dari Gambar 3.3 bahwa untuk baterai timbal-asam gel, ampere-jam yang dapat dikirim dapat mencapai sekitar 75 persen dari peringkat kapasitas baterai. Ini tidak mewakili pengiriman energi karena tegangan turun saat arus ditarik. Produk dari keduanya terintegrasi dari waktu ke waktu mewakili energi yang dapat dikirimkan. Ini bukan nilai yang telah ditentukan sebelumnya karena beban variabel dan kondisi suhu selama penggunaan. Seseorang dapat merujuk ke grafik yang serupa dengan yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Mereka menggambarkan energi yang tersedia yang dinormalisasi ke berat baterai untuk nilai daya tertentu yang diambil dari berbagai jenis baterai yang ditampilkan.

Dengan menggunakan materi di Bab 2, seseorang dapat memperkirakan total energi yang diinginkan untuk mencapai rentang perjalanan tertentu. Dengan nilai ini seseorang dapat memilih jenis baterai dan selanjutnya berat baterai percobaan awal. Mengetahui penggunaan sepeda akan menentukan perkiraan daya rata-rata yang akan diambil dari baterai. Mungkin akan berada di wilayah nilai rata-rata 100 hingga 150 W. Menggunakan berat baterai awal dan membaginya menjadi nilai daya rata-rata menentukan di mana harus masukkan sumbu daya

spesifik dari grafik pada Gambar 3.4. Perpotongan dengan kurva baterai menentukan energi tertentu. Jika nilai ini tidak sama dengan yang ditentukan pada awalnya, seseorang perlu mengulangi prosesnya secara iteratif.



**Gambar 3.4** Densitas penyimpanan energi vs. kepadatan daya plot Ragone. (Dari Kenneth A. Burke, Sel Bahan Bakar untuk Aplikasi Ilmu Luar Angkasa, dalam Prosiding Konferensi Teknik Konversi Energi Internasional, Portsmouth, VA, AIAA 2003-5938.)

### Baterai Lead-Acid -Batasnya untuk Propulsi Eleetrie Ricyele

Baterai timbal-asam, yang menggerakkan mobil dan bahkan sepeda abad kesembilan belas pertama, adalah produk penyimpanan energi paling umum dan berbiaya terendah yang tersedia saat ini. Hampir semua mobil, bus, dan truk membawa baterai timbal-asam untuk menghidupkan mesin dan menyalakan lampu saat mesin tidak menyala di malam hari. Baterai ini digunakan untuk menghidupkan mesin mobil setelah Charles F. Kettering menemukan starter listrik pada tahun 1912, dan mereka masih digunakan di sebagian besar kendaraan bertenaga mesin. Pasar penggantian yang besar untuk baterai ini memungkinkan produsen mereka untuk mempertahankan jalur produksi yang efisien yang membuat harga penggantian baterai ini tetap rendah. Banyak baterai starter mesin dengan masa pakai lebih lama telah ditemukan, tetapi pabrikannya belum mampu bersaing dengan baterai timbal-asam untuk servis starter mesin mobil.

Persyaratan baru penyimpanan energi dalam rudal dan pesawat ruang angkasa memotivasi program pengembangan intensif dalam penyimpanan energi. Baterai timbal-asam mendorong torpedo yang diluncurkan dari kapal selam. Anggota kru tersedia untuk terus memantau status pengisian baterai torpedo, membuat kegagalan daya penggerak torpedo jarang terjadi. Rudal seperti Minuteman dan Peacekeeper membutuhkan baterai dengan keandalan tinggi yang siap diluncurkan atas perintah yang datang setelah bertahun-tahun disimpan dalam silo peluncuran. Baterai yang berhasil untuk misil-misil ini tidak dapat digunakan untuk propulsi sepeda karena waktu peluncuran misil yang singkat, dan pengisian ulang baterai setelah penerbangan tidak diperlukan.

Orang yang sedang merancang sepeda listrik baru, atau hanya memilih baterai untuk penggerak sepeda listrik, perlu memahami karakteristik calon baterai yang berkaitan dengan aplikasinya. Misalnya, baterai timbal-asam terbaik dapat menyimpan 20 Wh/kg berat baterai untuk tenaga penggerak. Performanya, jika diturunkan dari data uji terkait, dapat dikonfirmasi

dengan elektrokimia analisis. Pemasok baterai lithium jenis baru dapat mengklaim kemampuan usia penyimpanan energi sebesar 150 Wh/kg. Namun, data pengujian yang ditawarkan mungkin tidak mencakup kinerja baterai ini pada tingkat daya pelepasan variabel yang diperlukan dalam penggerak sepeda listrik. Penerapan analisis elektrokimia dalam mengevaluasi data ini dapat mengungkapkan bahwa baterai tertentu memiliki kemungkinan yang masuk akal untuk memenuhi persyaratan propulsi sepeda listrik, atau kemungkinannya sangat kecil untuk memenuhi persyaratan ini. Perancang kemudian dapat menolak baterai baru ini atau memasukkan pengujian yang sesuai dalam program pengembangannya.

Salah satu contoh sederhana mengilustrasikan kisaran kinerja yang harus dievaluasi oleh perancang sepeda dalam proses perancangannya. Baterai timbal-asam khas yang benar-benar habis selama setiap perjalanan sepeda dapat bertahan selama 100 siklus pengisian-pengosongan. Maka harus diganti dengan baterai baru. Baterai lithium ion yang lebih mahal bisa bertahan selama 20 tahun dalam layanan yang sama. Biaya per tahun dalam layanan sepeda listrik bisa jauh lebih rendah daripada biaya per tahun untuk baterai timbal-asam yang lebih berat dari mana hanya 30 persen dari kandungan energinya yang dikonsumsi sebelum diisi ulang.

Beberapa dekade pengembangan baterai timbal-asam telah menghasilkan prosedur analisis elektrokimia yang memungkinkan perancang propulsi sepeda untuk menggunakan uji terbatas dan data teoretis untuk memprediksi kinerja baterai dalam servis sepeda listrik. Dalam menjelaskan analisis elektrokimia ini, kami menggambarkan penggunaannya dengan aplikasi dalam memprediksi kinerja baterai timbal-asam. Misalnya, baterai timbal-asam telah diisi dan dikosongkan pada berbagai suhu internal. Analisis elektrokimia sekarang dapat mereproduksi secara akurat kinerja baterai yang diamati pada suhu ini.

Agar pembaca dapat memahami penyebab potensial dari kekurangan baterai, pertama-tama kami meninjau proses elektrokimia yang terjadi pada baterai timbal-asam saat diisi dan dikosongkan. Kami kemudian menjelaskan penyebab kegagalan baterai timbal-asam, dan bagaimana produsen baterai ini untuk layanan non-otomotif mampu mengembangkan baterai timbal-asam yang memiliki masa pakai yang cukup lama dalam aplikasi tertentu seperti sepeda listrik.

### **Baterai Lead-Acid: Penggunaan dan Batasan Kinerja**

Baterai timbal-asam dirakit dari bahan berbiaya rendah dan telah melayani aplikasi penyimpanan energi dengan baik, tetapi alternatif baru sedang tersedia untuk menggantikan baterai timbal-asam untuk banyak kebutuhan penyimpanan energi. Contoh berikut mengilustrasikan berbagai aplikasi baterai masa lalu. Baterai timbal-asam dapat dibangun dengan jalur arus internal resistansi rendah dengan menggunakan konduktor timbal tebal. Konstruksi ini memungkinkan mereka untuk memberikan daya tinggi untuk waktu yang singkat dalam memulai mesin mobil dan pesawat. Bobotnya yang tinggi tidak menjadi masalah yang berarti jika dibawa dengan kendaraan beroda. Mereka juga digunakan untuk menyimpan energi untuk beban kritis yang harus dioperasikan selama pemadaman listrik.

Baterai timbal-asam juga digunakan untuk menggerakkan truk forklift yang mengangkut kargo untuk jarak pendek di pabrik dan gudang. Bobot baterai berguna untuk mengimbangi bobot beban yang dibawa pada garpu kendaraan. Kereta kecil bertenaga baterai

juga dibuat untuk mengangkut personel di gedung-gedung pabrik besar. Baterai ini dapat sering diisi ulang, sehingga tidak perlu mendukung jarak tempuh yang jauh.

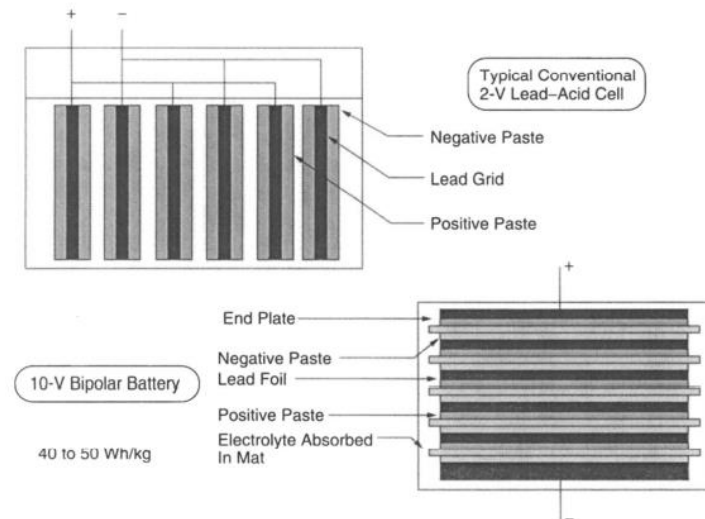
Sebuah mobil hybrid dapat memberikan kinerja yang baik dalam mil per galon bensin yang dikonsumsi karena (1) mesin tidak harus berukuran untuk kinerja daya puncak yang jarang dibutuhkan, dan karenanya lebih ringan, dan (2) mesin dapat dijalankan dengan daya konstan saat dibutuhkan dan dapat dimatikan setiap kali mobil berhenti. Program pengembangan baterai timbal-asam yang intensif dan dibiayai dengan baik untuk propulsi hibrida dimulai di Amerika Serikat. Namun, mobil hibrida yang dikembangkan di negara lain menggunakan baterai baru berperforma tinggi tanpa timbal, dan menghasilkan penghematan bahan bakar mil per galon yang lebih baik. Selain itu, baterai timbal-asam masih memiliki waktu terbatas dalam siklus pengisian-pengosongan dan dengan cepat menurun jika dibiarkan kosong.

Sejarah baterai timbal-asam ini menunjukkan bahwa mereka perlu dievaluasi dengan cermat kapan mereka dapat digunakan untuk menggerakkan sepeda listrik. Untuk beberapa mil perjalanan sepeda harian di layanan lokal, baterai timbal-asam, bahkan dengan masa pakainya yang terbatas, mungkin merupakan komponen penyimpanan energi dengan biaya terendah. Untuk perjalanan jarak jauh, baterai timbal-asam tidak memenuhi syarat sebagai sumber tenaga penggerak karena harus menyimpan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan massanya sendiri seperti halnya sepeda dan pengendaranya. Juga, baterai, jika hanya sebagian habis, harus diganti setiap 2 tahun atau lebih karena telah kehilangan kapasitas penyimpanan energi. Salah satu baterai lithium baru bisa bertahan bertahun-tahun dalam layanan charge-discharge harian. Dalam paragraf berikut, kami merangkum karakteristik propulsi sepeda terkait dari baterai timbal-asam yang tersedia saat ini.

#### **Aktivitas f/elektrokimia dalam Pengisian dan Pelepasan Baterai**

Baterai timbal-asam adalah kotak yang berisi sel-sel yang terhubung seri. Sebuah sel 2.2-V dari sel timbal-asam adalah perakitan pelat positif dan negatif. Setiap pelat terdiri dari kisi-kisi timbal yang di atasnya ditekan partikel timbal yang menciptakan area permukaan berpori besar di mana reaksi elektrokimia berlangsung. Setiap pelat positif terikat pada bus utama yang menghubungkan pelat-pelat ini ke terminal positif baterai.

Pelat negatif juga terikat pada bus utama yang menghubungkannya ke terminal negatif baterai. Sebuah membran isolasi, dimana hanya ion hidrogen yang dapat mengalir, ditempatkan di setiap ruang antara pelat positif dan negatif (Gbr. 3.5). Baterai timbal-asam terdiri dari sel-sel yang terhubung seri yang berada dalam wadah terpisah. Misalnya, baterai 12-V memiliki 6 sel.



**Gambar 3.5** Baterai timbal-asam konvensional vs. bipolar. (Dari John A. Wertz, Pengembangan Baterai Lead-Acid Bipolar dengan Bahan Berlapis, Prosiding IEEE Konferensi Baterai Tahunan ke-15 tentang Aplikasi dan Kemajuan, 11-14 Januari 2000.)

Setelah sel dirakit, sel diisi dengan asam sulfat encer ( $H_2SO_4$ ), yang membentuk timbal-sulfat pada setiap pelat sel. Menghubungkan terminal positif pengisi daya 2.4-V ke pos positif sel, dan terminal pengisi daya negatif ke pos negatif sel, kemudian mengisi daya sel baterai timbal-asam. Arus yang mengalir dari pengisi daya ini menyebabkan sulfat pada pelat positif terurai menjadi timbal dioksida yang melapisi pelat. Arus ini juga meningkatkan densitas asam sulfat dalam elektrolit. Ion hidrogen bermuatan positif juga dilepaskan. Pelat bermuatan negatif menarik ion ini, yang melayang melalui pemisah ion-transparan ke pelat negatif sel. Di sana ia bergabung dengan timbal sulfat pada permukaan pelat untuk membentuk asam sulfat, sehingga meninggalkan pelat permukaan timbal yang bersih. Elektron negatif dari ion berangkat ke sirkuit yang membawanya ke terminal negatif pengisi daya.

Tegangan keluaran pengisi daya baterai secara nonnally dibatasi ke nilai yang mengubah seluruh kandungan timbal sulfat pada terminal positif berlapis menjadi asam sulfat. Jika tegangan pengisi baterai tidak dibatasi, arus pengisian kemudian akan mengelektrolisis air di dalam sel menjadi hidrogen dan oksigen. Ini akan menguras elektrolit yang tersedia, dan dalam sel tertutup dapat meningkatkan tekanan internal ke tingkat yang merusak.

Baterai timbal-asam unik karena kedua pelat setidaknya sebagian timbal, dan, ketika baterai habis, kedua pelat ditutupi dengan timbal sulfat. Selama pelepasan sel, sirkuit eksternal menerima elektron dari pelat negatif baterai. Mereka diproduksi oleh asam sulfat yang membentuk timbal sulfat pada permukaan pelat negatif. Pelat ini juga melepaskan ion hidrogen positif yang melayang melalui pemisah ke pelat positif yang menyerap elektron dari beban. Elektron yang datang ini menggabungkan asam sulfat dengan timbal oksida untuk membentuk timbal sulfat pada pelat positif. Baterai menjadi benar-benar habis ketika tidak ada lagi permukaan oksida timbal yang tersedia untuk reaksi ini. Pelat positif biasanya terdiri dari partikel timbal yang ditekan bersama untuk menciptakan luas permukaan sekitar 50 kali hasil kali panjang dan lebar pelat, kali 2 jika kedua sisi pelat berada dalam elektrolit. Perhatikan



bahwa selama pelepasan, untuk setiap pasangan elektron yang bersirkulasi melalui sirkuit eksternal, satu atom timbal di elektroda negatif dan satu di pelat positif menjadi timbal sulfat.

Selama pengisian, pelat negatif direduksi menjadi timbal murni, dan pelat positif menjadi timbal oksida (Gambar 3.5). Arus pengisian mengembalikan kondisi baterai timbal-asam yang kosong dengan mengubah permukaan pelat positif menjadi timbal dioksida dan permukaan pelat negatif menjadi timbal murni. Setelah echarge penuh tercapai, pada 2,5 V per sel dalam baterai timbal-asam biasa, sel menjadi elektrolyzer, memecah air menjadi oksigen di pelat positif dan hidrogen di pelat negatif. Di sana oksigen bergabung dengan timbal murni dan asam sulfat, secara efektif melepaskan pelat negatif sehingga tidak dapat melepaskan hidrogen. Baterai dengan pelat negatif yang didesain berlebihan memancarkan sangat sedikit gas selama pengisian berlebih, sehingga dapat disegel, membentuk baterai bebas perawatan.

Asam sulfat yang digunakan dalam baterai timbal-asam diencerkan untuk mencapai berat jenis sekitar 1,250 dalam baterai yang terisi penuh. Dalam beberapa baterai elektrolit yang kelaparan, elektrolit memiliki berat jenis 1,310 pada pengisian penuh, turun menjadi 1,150 pada akhir pengosongan. Keadaan pengisian baterai timbal-asam dapat disimpulkan dengan mudah dari kerapatan elektrolit, fitur yang tidak tersedia dalam nikel-kadmium atau sel lain dengan elektrolit alkali. Aktivitas elektrokimia dalam pengisian dan pengosongan baterai timbal-asam dijelaskan secara lebih rinci pada halaman 379-384 di [5].

### **Penyempurnaan dan Batasan Baterai**

Lead-Acid Masa pakai yang lama tersedia dalam baterai timbal-asam, tetapi dengan harga yang mahal. Kunci dari baterai kendaraan yang ringan adalah memaparkan sebanyak mungkin permukaan timbal ke asam sulfat untuk reaksi elektrokimiawi. Pabrikasi memiliki cara untuk membuat pelat timah sepon yang memiliki banyak luas permukaan tetapi sangat lemah sehingga harus didukung oleh kisi-kisi timah untuk membentuk pelat. Grid juga berfungsi sebagai pengumpul arus. Ketebalan kisi dan paduan yang digunakan memengaruhi masa pakai baterai. Timbal murni tahan korosi tetapi terlalu lemah secara struktural untuk sebagian besar baterai. Paduan grid lead dengan kalsium atau antimon memberikan kekuatan grid, tetapi paduan mempengaruhi kinerja dan masa pakai baterai. Misalnya, paduan antimon di pelat negatif mendorong pembentukan hidrogen.

Baterai timbal-asam dapat dirancang untuk biaya produksi yang rendah. Kisi-kisinya akan memiliki luas penampang minimum, konsisten dengan penurunan tegangan yang diizinkan pada arus keluaran yang ditentukan. Bahan dengan biaya terendah akan digunakan untuk separator, dan paduan terkuat akan digunakan untuk bagian timbal. Di sisi lain, baterai dengan pelat timah murni bertahan selama lebih dari 30 tahun dalam layanan telepon siaga. Baterai ini besar dan mahal untuk kapasitas ampere-jamnya. Masa pakai baterai yang lama dapat diperoleh dengan biaya yang wajar dengan bahan dan teknologi yang sekarang tersedia. Sebagai contoh, J.S. Enochs mampu mendapatkan daya tahan baterai sebesar 20.000 umur charge-discharge dengan kedalaman debit 80 persen di setiap siklusnya [6]. Dia telah menggunakan timah nonantimonial dalam elektrodanya.

### **Mengadaptasi Perbaikan Lead-Acid untuk Penggerak Kendaraan Listrik**

Baterai timbal-asam telah digunakan untuk menggerakkan mobil listrik, tetapi mesin saluran bensin yang mudah diisi ulang menjadi, dan masih, sumber daya paling populer untuk menggerakkan mobil dan truk. Juga, masa pakai baterai timbal-asam yang berguna telah

dibatasi. Misalnya, baterai timbal-asam yang menghidupkan mesin mobil umumnya memiliki garansi hidup sekitar 5 tahun. Mereka umumnya gagal sebelum jaminan kedaluwarsa, sehingga pengguna mendapat kredit untuk beberapa bulan masa pakai yang tidak digunakan ketika dia membeli baterai pengganti. Sebaliknya, baterai nikel-besi Edison bertahan selama beberapa dekade siklus charge-discharge dalam layanan truk forklift.

Pengenalan mobil hybrid baru-baru ini di pasar luar negeri memotivasi pengembangan intensif baterai timbal-asam untuk aplikasi ini. Lusinan makalah di setiap konferensi baterai menjelaskan inovasi dan pengujian yang menunjukkan peningkatan dalam masa pakai siklus pengisian-pengosongan baterai timbal-asam dan menjanjikan kinerja yang lebih baik lagi. Kemudian muncul pengembangan lithium ion dan baterai baru lainnya dengan masa pakai yang lama dan kinerja ringan yang tidak dapat ditandingi oleh baterai timbal-asam.

Contoh potensi penggunaan baterai timbal-asam untuk jarak pendek propulsi adalah kendaraan Ford Motor Company yang dikembangkan oleh organisasi THINK Technologies. Produk tersebut adalah mobil listrik Think Neighborhood dan sepeda listrik Think yang ditenagai oleh baterai asam gel-lead 24-V. Namun, kendaraan ini tidak masuk ke produksi. Begitu pula dengan mobil hybrid yang dikembangkan dan diuji oleh General Motors. Baterai timbal-asam bukanlah pilihan terbaik untuk menggerakkan sepeda listrik karena bobotnya yang berat.

### **Baterai Nikel-Kadmium**

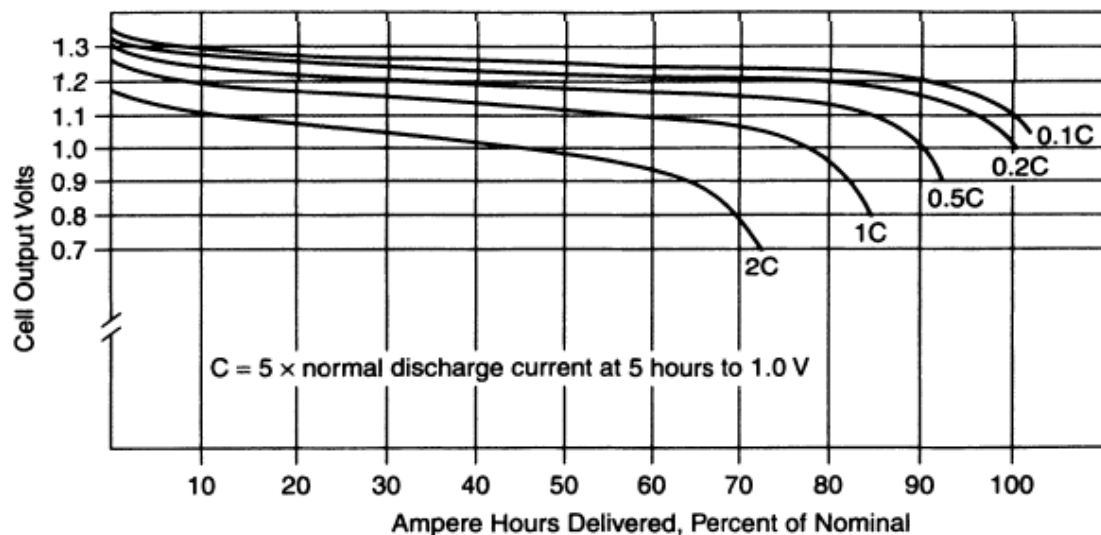
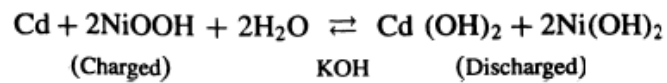
Sel nikel-kadmium umumnya dibuat dalam dua bentuk: (1) unit bundar yang berisi elektroda dan pemisah yang digulung dan (2) unit prismatic tempat pelat dan pemisah ditumpuk. Elektrolitnya adalah air yang mengandung 25 hingga 35 persen kalium hidroksida terlarut. Sel dapat disegel, tetapi sebagian besar sel ditujukan untuk penggunaan terestrial sehingga memiliki perangkat pelepas tekanan.

Fitur energi baterai nikel-kadmium berikut:

- Baterai nikel-kadmium akan menyimpan hingga dua kali energi yang dapat disimpan dalam baterai timbal-asam dengan berat yang sama, tetapi baterai nikel-kadmium lebih mahal .
- Baterai nikel-kadmium pelat saku dengan elektrolit pekat akan memiliki output pada - 40 °F, suhu di mana baterai timbal-asam tidak dapat digunakan.
- Masa pakai baterai lebih dari 30.000 siklus pengisian-pengosongan telah dicapai dengan kedalaman pengosongan yang rendah.
- Tegangan pengisian variabel yang diperlukan untuk baterai nikel-kadmium membuat mereka tidak nyaman untuk layanan di mana mereka mengapung di saluran yang mereka suplai daya ketika sumber daya utama gagal.

Sumber data kinerja yang berguna untuk baterai nikel kadmium adalah Manual Aplikasi NASA, [7]. Tegangan sel untuk berbagai laju pelepasan C ditunjukkan pada Gambar 3.6 sebagai fungsi dari ampere-jam nominal yang dikirim. Desain Baterai Nikel-Kadmium Baterai nikel-kadmium tipikal memiliki elektroda positif yang terdiri dari substrat nikel sinter yang dilapisi dengan nikel hidroksida. Menyerap elektron dari sirkuit eksternal selama pengisian mengubah permukaan menjadi NiOOH. Setiap elektron mengubah satu molekul. Elektroda negatif juga memiliki substrat nikel tetapi ditutupi dengan logam kadmium saat diisi. Pengosongan

mengubah permukaan menjadi kadmium hidroksida, melepaskan dua elektron dari setiap atom kadmium yang dikonversi. Persamaan kimianya adalah:



**Gambar 3.6** Tegangan terminal sel nikel-kadmium turun saat konten ampere-hour dikirim selama pelepasan. (Dari H. Oman, Buku Pegangan Rekayasa Sistem Energi, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.)

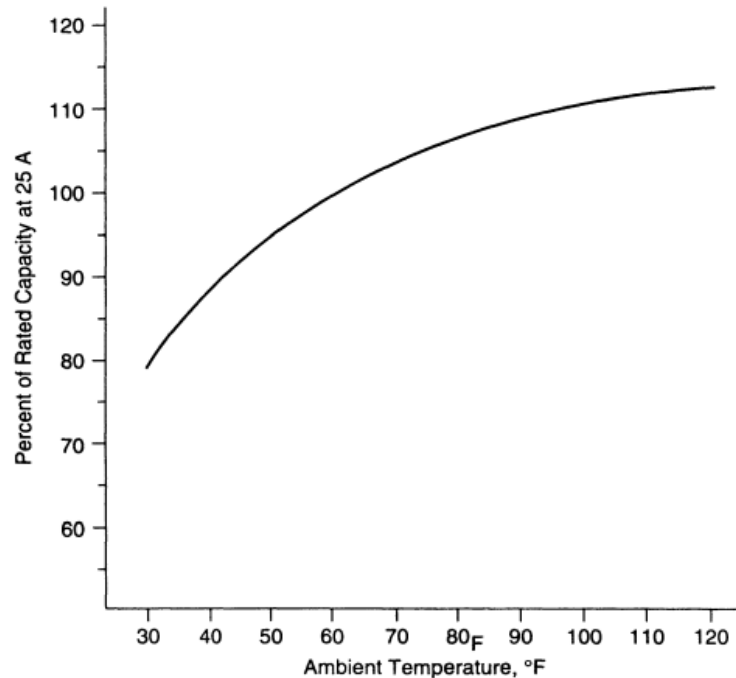
Energy Research Corporation yang dirancang untuk V.S. Bureau of Mines baterai nikel-kadmium yang menggantikan baterai timbal-asam yang digunakan sejak tahun 1930-an untuk menyalakan lampu tutup penambang [8]. Kinerja Nikel-Kadmium pada Suhu Rendah Baterai nikel-kadmium dapat digunakan pada suhu yang terlalu rendah untuk baterai timbal-asam.

Namun, tegangan pengisian dan pengosongan bervariasi menurut suhu, sehingga baterai yang beroperasi pada suhu yang bervariasi memerlukan pengisi daya yang mendeteksi suhu baterai dan membias tegangan pengisian dengan tepat. Juga, beban harus menerima tegangan yang bervariasi dengan suhu saat baterai habis. Tegangan pengisian dan pengosongan untuk sel General Electric 1.5-Ah dipetakan dengan suhu sebagai parameter pada Gambar 3.7.

Siklus Pengisian-Pengosongan Masa Pakai Baterai Nikel-Kadmium Pabrik menilai baterai pada ampere-jam yang dapat diberikannya sebelum mencapai tegangan cutoff, seringkali 1,0 V, pada laju yang dihitung untuk menghabiskan baterai dalam waktu yang ditentukan waktu. Saat mengirimkan konten terukurnya, kapasitas penyimpanan baterai bisa mencapai 55 Ah/kg. Namun, masa pakai siklus pengisian-pengosongan baterai akan pendek jika setiap kali baterai terisi penuh.

Sid Gross, seorang spesialis baterai pesawat ruang angkasa, menggunakan kurva, seperti pada Gambar 3.2, untuk memilih ukuran baterai. Misalnya, jika ia membutuhkan baterai untuk pesawat ruang angkasa ketinggian rendah yang mengorbit Bumi setiap 90 menit sekali selama 3 tahun, masa pakai baterai yang diperlukan (L) adalah 17.520 siklus.

Dari Gambar 3.2 ia menemukan bahwa kedalaman pelepasan 14 persen sesuai dengan umur yang dibutuhkan. Menggunakan baterai dengan rating 31 Wh/kg memberikan kinerja aktual 4,3 Wh/kg.



**Gambar 3.7** Sel General Electric ini telah dirancang untuk beroperasi pada suhu serendah - 20°C. (Dari H. Oman, Buku Pegangan Rekayasa Sistem Energi, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.)

Begitulah harga untuk umur panjang. Untuk debit yang lebih dalam, hubungan perkiraan untuk kehidupan sel  $L$  adalah:

$$L = 10^{(4.7 - D/42)} \quad (3.2)$$

di mana  $D$  adalah kedalaman pelepasan dalam persen, dapat digunakan. Misalnya, untuk kedalaman debit 70 persen, masa pakainya sekitar 1080 siklus.

Data tentang siklus hidup charge-discharge baterai nikel-kadmium mahal untuk diperoleh. V.S. Pusat Dukungan Senjata Angkatan Laut Angkatan Laut di Crane, Indiana, telah menguji sel nikel-kadmium untuk penggunaan ruang angkasa selama beberapa dekade. Setiap pengujian membutuhkan 10 hingga 50 sel karena pada setiap suhu harus ada jumlah sampel yang signifikan secara statistik. Kadang-kadang umurnya panjang, misalnya 10 sampai 25 tahun, dan teknologi yang menghasilkan sel-sel yang sukses berubah selama bertahun-tahun pengujian.

#### **Keandalan Baterai Nikel-Kadmium**

Sebuah contoh menggambarkan keandalan baterai nikel-kadmium untuk pesawat ruang angkasa. Secara tradisional, baterai yang berlebihan telah digunakan untuk menghindari hilangnya fungsi pesawat ruang angkasa jika sebuah sel gagal. Mekanisasi redundansi yang ringan adalah dengan menambahkan sel ekstra atau sel secara seri pada

baterai sehingga jika salah satu sel mengalami korsleting, baterai akan tetap menghasilkan tegangan minimum. Beberapa baterai memiliki dioda untuk mem-bypass sel yang gagal dalam mode rangkaian terbuka.

Thomas Dawson dari D.S. Air Force Space Division, dalam merencanakan satelit FLTSATCOM masa depan, bertanya-tanya apakah redundansi ini diperlukan. Dia mewawancarai insinyur proyek yang bertanggung jawab atas enam pesawat ruang angkasa dan menemukan bahwa selama 107,2 tahun operasi satelit tidak ada kegagalan sirkuit terbuka [9]. Satu satelit telah mengalami empat sel pendek dalam 33 tahun satelit. Dua lainnya tidak mengalami kegagalan sel baterai dalam 53 tahun operasi satelit, dengan masa pakai satelit terlama melebihi 8 tahun. Mayor Dawson menyimpulkan bahwa daripada memasang dioda bypass, uang dan berat lebih baik digunakan untuk menambah berat baterai yang mengurangi tekanan pada baterai dan meningkatkan masa pakainya. Menghilangkan elektronik bypass sel baterai juga meningkatkan keandalan rakitan baterai dari 0,9691 menjadi 0,998.

Nickel Battery Cast Baterai nikel-kadmium lebih mahal daripada baterai timbal-asam. Sebagai contoh, nikel berharga sekitar Rp 45.000 per pon. Kadmium, produk sampingan dari pemurnian zine, berharga Rp 22.500 per pon. Timbal adalah sekitar 25 sen per pon. Dalam mencari baterai murah untuk mobil listrik, M. Klein dan A. Charkey membangun baterai nikel-kadmium untuk kendaraan listrik dengan menggunakan teknik yang telah dikembangkan untuk baterai lampu penambang [10].

Baterai nikel-kadmium Klein memberi daya pada Saab dengan bobot 2550 pon. Jangkauan perjalanan adalah 75 mil. Dengan baterai yang ditingkatkan, mobil akan memiliki berat £ 2180 dan memiliki jangkauan 100 mil. Namun, Klein melihat mobil listrik menjadi kompetitif dengan mobil bermesin pembakaran internal yang menghasilkan 27,5 mpg hanya ketika harga bensin mencapai Rp 3.675 gallon.

### **Gas Logam dan Baterai Pesawat Luar Angkasa Lainnya**

Baterai nikel-hidrogen adalah baterai gas-logam yang sukses yang sekarang digunakan di satelit orbit sinkron COMSAT. Sel nikel-hidrogen seperti sel nikel-kadmium, kecuali bahwa elektroda kadmium digantikan oleh elektroda platinum yang mengkonsumsi gas hidrogen selama pelepasan dan mengembangkan hidrogen saat diisi. Tekanan hidrogen bisa mencapai 200 kg/cm<sup>2</sup> ketika belut terisi penuh. Hughes Aircraft Company, menggunakan desain sel yang dikembangkan untuk V.S. Angkatan Udara, telah menguji sel-sel nikel-hidrogen 25-Ah pada kedalaman pelepasan 80 persen untuk 7000 siklus pengisian-pengosongan. Kapasitas yang diamati pada saat itu, dilaporkan oleh E. Levy, berada di kisaran 23 hingga 30 Ah [11]. Sel nikel-kadmium pada kedalaman pelepasan 80 persen hanya akan bertahan sekitar 1000 siklus pengisian-pengosongan.

Baterai nikel-kadmium canggih dapat menghasilkan 55 Wh/kg pada kedalaman pengosongan 100 persen. Baterai nikel-hidrogen dapat menghasilkan 65 Wh/kg. Sel baru-baru ini memiliki tujuan hidup 30.000 siklus pengisian-pengosongan [12]. Meskipun baterai nikel-hidrogen yang dapat diisi ulang bagus untuk pesawat ruang angkasa, mereka tidak selalu berguna untuk penggunaan terestrial. Mereka memang membutuhkan katalis platinum, yang menambah biaya mereka. Redox Flow Battery Menyimpan Energi dalam Cairan Baterai aliran redoks, dikembangkan di NASA Lewis Research Center, menyimpan energi dalam elektrolit

dari mana energi diekstraksi dengan elektroda karbon. Elektrolit dapat disimpan dalam tangki, yang dapat dibuat sebesar yang dibutuhkan untuk energi yang akan disimpan.

K. Nozaki dan rekan-rekannya mengembangkan peningkatan dan membangun unit 30-sel 1-kW yang mereka uji. Dengan simulasi komputer berdasarkan data uji, mereka memperkirakan efisiensi masuk dan keluar 80 persen untuk unit 1-MW yang mereka rencanakan untuk dibangun [13]. Dalam memilih bahan elektroda mereka telah menyaring 100 jenis karbon sebelum mengadopsi karbon yang dirajut dari selulosa. Tidak ada katalis yang dibutuhkan. Elektrolit positif adalah besi klorida yang dilarutkan dalam asam klorida. Elektrolit negatifnya adalah kromium klorida, juga dilarutkan dalam asam klorida. H. L. Steele dan L. Wein dari Jet Propulsion Laboratory mencantumkan baterai redoks sebagai mekanisme biaya terendah yang berpotensi untuk menyimpan energi dalam kimia elektro [12]. Mereka memperkirakan bahwa biaya awal baterai redoks akan menjadi 20 persen dari biaya baterai timbal-asam.

### **Baterai Lithium Ion Memberikan Umur Panjang dengan Berat Rendah dalam Propulsi Sepeda Listrik**

Perubahan konsentrasi elektrolit yang terjadi selama pengisian dan pengosongan baterai nikel-kadmium mirip dengan baterai timbal-asam. Namun, sel ion lithium tidak mengandung elektrolit cair. Di dalamnya selembar litium dijepit di antara pelat positif oksida kobalt dan pelat negatif grafit. Pengisian mengubah permukaan pelat positif menjadi litium kobalt oksida dan permukaan pelat negatif menjadi litium karbonat. Hasilnya, tidak ada masalah kebocoran elektrolit, dan setiap sel dapat disegel secara permanen selama pembuatannya. Juga, sel ion litium tidak perlu diorientasikan sehubungan dengan arah gravitasi dalam vebikel atau aplikasi lain.

Baterai lithium ion yang kokoh berhasil mendorong Spirit dan Peluang penjelajah Mars saat mereka menjelajahi planet ini setelah selamat dari tekanan kompleks yang dimulai dengan getaran intens selama peluncurannya dari Bumi. Baterai disimpan dengan pelepasan kecil yang terjadi selama pantai gravitasi nol dari Bumi ke Mars. Deselerasi intens dan getaran tembakan roket untuk dimasukkan ke orbit Mars diikuti. Deselerasi lebih lanjut terjadi saat turun di Mars Lander. Di permukaan planet, baterai diisi ulang dengan tenaga surya. Spirit dan Opportunity bertenaga baterai lithium-ion kemudian berkeliaran di permukaan Mars untuk membantu memecahkan misteri ilmiah.

Konfigurasi Alternatif Baterai Lithium Ion Yang diproduksi massal adalah sel lithium ion tipe-18650 yang menggerakkan peralatan komunikasi. Setiap sel berdiameter 18 mm (0,71 inci) dan panjang 65,5 mm (2,58 inci). Massa sel biasanya sekitar 13,5 g. Akibatnya, pengembangan baterai lithium ion berdaya tinggi berkembang dalam dua arah. Pertama kali terlibat perakitan Sel lithium ion tipe-18650 ini menjadi rangkaian seri yang dihubungkan ke modul paralel yang menghasilkan arus yang dibutuhkan dan memiliki kandungan energi yang diperlukan selama beberapa jam. Modul-modul ini kemudian dihubungkan secara seri untuk membentuk baterai yang memberikan tegangan dan energi yang dibutuhkan dengan kedalaman pelepasan yang menghasilkan masa pakai baterai yang dibutuhkan. Keuntungan dari pendekatan ini adalah (1) sel tipe-18650 yang diproduksi secara massal memiliki keandalan yang terbukti tinggi, (2) masa pakai hingga 50.000 siklus pengisian-pengosongan telah ditunjukkan, dan (3) biaya sel menurun karena semakin banyak perusahaan mulai

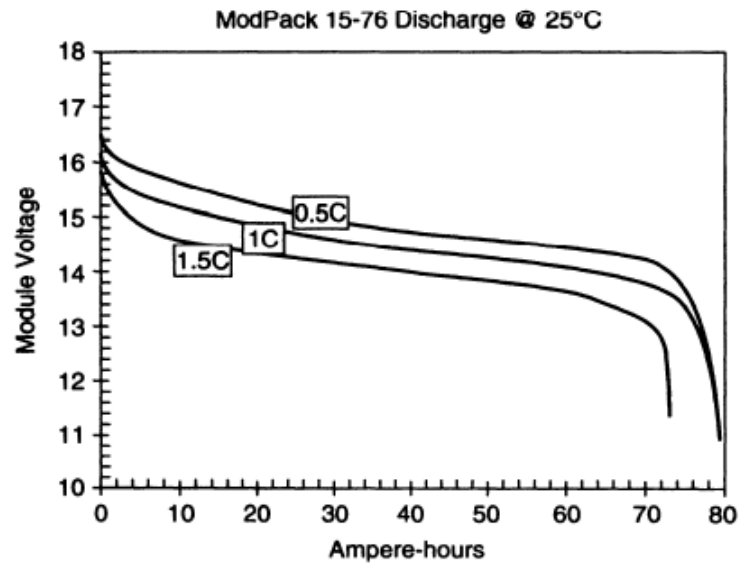
memproduksinya, Namun, baterai jenis ini memerlukan kontrol internal yang canggih untuk mencegah kemungkinan kegagalan tunggal dari penonaktifan baterai.

Arah pengembangan baterai kedua adalah membangun sel lithium ion yang lebih besar sehingga baterai baru akan memiliki lebih sedikit sel daripada baterai timbal-asam, nikel-kadmium, atau nikel-logam hidrida dengan tegangan terminal yang sama. Ini memerlukan perancangan dan pengujian sel baru untuk mengonfirmasi kinerjanya dalam hal siklus pengisian-pengosongan.

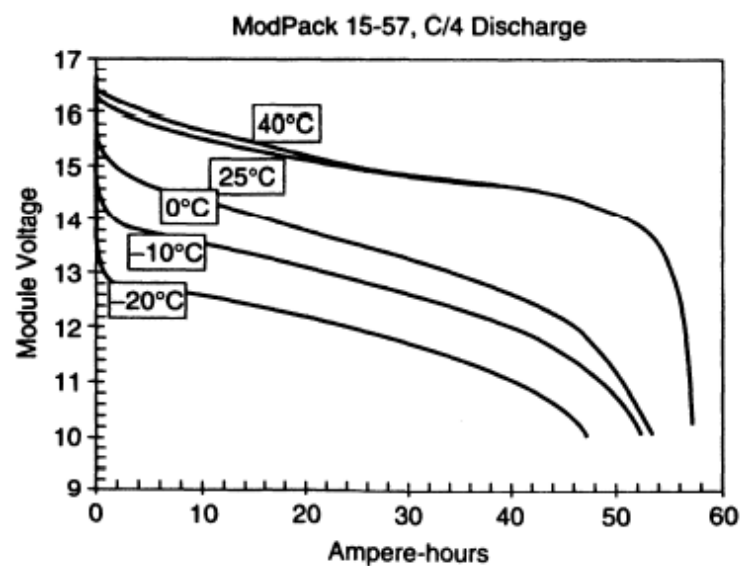
Komponen kunci dari sepeda listrik yang berguna adalah baterai di mana energi disimpan untuk menambah tenaga pedal. Jenis baterai yang tersedia berkisar dari timbal-asam, yang dapat menghasilkan 20 Wh/kg berat baterai hingga baterai lithium ion baru yang dapat menghasilkan 160 Wh/kg. Laboratorium penelitian bahkan telah membangun sel lithium yang menghasilkan hingga 400 Wh/kg [3]. SAFF America telah mengembangkan sel VLE tipenya yang memiliki energi spesifik 195 Wh/kg. Baterai AGM Terbatas telah memperoleh 235 Wh/kg dalam sel 6-Ah 36550 yang didasarkan pada bubuk logam lithium stabil (SLMP). Perlindungan kelebihan muatan elektronik dalam sel mendeteksi dan menyimpangkan arus muatan saat sel terisi penuh [4].

Saft America mengembangkan sel lithium berdaya tinggi baru dalam program pembagian biaya dengan Kemitraan untuk Kendaraan Generasi Baru (PNGV) dan V.S. Departemen Energi. N. Raman menggambarkan hasil pekerjaan ini [14]. Spesifikasi sel untuk sel 4-Ah berdaya sangat tinggi ini untuk operasi pada 25°C dirangkum dalam Tabel 3.1. Ketika dibuang pada 500 A ke dalam beban, itu menghasilkan 82 persen dari kapasitas pengenalnya dan suhunya tidak naik di atas 40 °C. Pengujian menunjukkan bahwa sel dapat memenuhi persyaratan cold-cranking pada -30 °C dan dapat memberikan daya yang dibutuhkan bahkan setelah 30 hari penyimpanan pada 25 °C.

Baterai Lithium Ion Diuji dalam Mendorong Bieyele Listrik Pada Konferensi Sumber Daya ke-41 pada tahun 2004 Stephen S. Eaves menggambarkan baterai lithium ion 76-Ah baru yang dibuat dari sel ion Li 18650 komersial kecil dengan menggunakan arsitektur modular paralel masif [15]. Ia mengilustrasikan teknologinya dengan ion lithium ModPack, sebuah baterai reetangular dengan dimensi panjang sekitar 30 cm, lebar 23 cm, dan tebal 8,3 cm yang beroperasi pada 14,8 V, dengan kapasitas 76 Ah. Di dalam ModPack ini, sel-sel lithium dihubungkan secara paralel dan seri untuk mencapai kapasitas dan tegangan yang ditentukan. Akhirnya banyak modul dihubungkan secara seri untuk mendapatkan tegangan baterai yang diinginkan. Sirkuit elektronik tertanam secara andal menyeimbangkan kapasitas sel individu dalam modul, dan sistem manajemen baterai pengawasan memungkinkan pengguna untuk menghubungkan baterai dengan benar ke bus aplikasinya. Sirkuit kontrol modular memiliki kemampuan untuk menonaktifkan bagian modul yang berisi sel yang gagal dengan hanya sedikit kehilangan kapasitas modul, sehingga memberikan tingkat keandalan yang tinggi. Menggunakan sel ion Li komersial yang diproduksi secara massal menghindari biaya untuk membeli sel yang lebih besar yang belum diproduksi secara massal. Tegangan pelepasan ModPack selama uji pelepasan diplot pada Gambar 3.8 dan 3.9.



**Gambar 3.8** Tegangan keluaran baterai Modpack saat dikosongkan dengan laju 0,5 C, 1 C, dan 1,5 C. (Dari Stein [17].)



**Gambar 3.9** Tegangan keluaran baterai Modpack pada berbagai suhu saat dikosongkan pada C/4. (Dari Stein [17].)

Menguji Sepeda Listrik Bertenaga Lithium Ion ModPack Sepeda listrik, yang diproduksi oleh eGo Vehicles Corp. of Providence, Rhode Island, telah mengikuti kompetisi Tour De Sol yang diselenggarakan oleh Asosiasi Energi Berkelanjutan Timur Laut. Itu didukung oleh baterai timbal-asam dan memiliki kecepatan tertinggi 32 km/h. Dalam kontes jarak tempuhnya adalah 32 km. Mengganti baterai timbal-asam dengan baterai ion ModPack Li mengurangi berat trotoar sepeda dari 55 menjadi 48 kg, meningkatkan kecepatannya menjadi 50 km/h, dan lebih dari dua kali lipat jangkauan perjalanannya menjadi 90 km. Ini menghabiskan 21 Wh/km saat bepergian dengan kecepatan hingga 50 km/jam dalam jarak 90 km dengan sekali pengisian baterai. Biaya energi listrik untuk perjalanan 90 km (56 mil) ini sekitar 16 sen.

Rincian perbandingan kinerja ada pada Tabel 3.1. Tidak ditunjukkan perbedaan yang signifikan dalam masa pakai kedua baterai dalam layanan charge-discharge. Sel Li ion 18650



yang dibangun ke dalam ModPack yang buruk bertahan lebih dari 20.000 siklus pengisian-pengosongan dalam pengujian sebelumnya. Sel li ion 18650 juga telah dipasang ke dalam baterai yang menggerakkan mobil listrik dua penumpang tZero, yang menghabiskan energi listrik 33,8 kWh dalam perjalanan sejauh 153 mil (246 km). Detail kinerja tZero dijelaskan di Bagian 3.2.3.

Masalah kompleks, seperti pemilihan jenis baterai untuk sepeda listrik, paling baik diselesaikan dengan prosedur pengambilan keputusan dirgantara yang disebut rekayasa sistem, yang dijelaskan dalam Bab 6. Langkah pertama dalam prosedur ini adalah menghitung semua persyaratan dari sistem yang sedang dikembangkan. Langkah kedua adalah membuat desain alternatif yang memenuhi persyaratan ini dengan kinerja dan keandalan yang diperlukan, dan mengukur risiko yang diidentifikasi untuk setiap desain. Langkah ketiga adalah menghitung biaya siklus hidup setiap desain dan menghitung semua risiko yang terlibat. Pilihan terbaik, dengan risiko yang disebutkan, kemudian ditawarkan kepada otoritas pembuat keputusan.

**Tabel 3.1** eGo Bicycle dengan Baterai Lead-Acid dan Li ion

Model	eGo Cycle 2	eGo XR
Curb weight, kg	54.5	46.8
Battery weight, kg	22.7	15.1
Battery energy, Wh	720	1900
Nominal voltage, V	24	30
Top speed, km/h	40	50
Range, km	32	90

Memperkirakan Kapasitas Sel Lithium Setelah 35.000 Siklus Pengisian-Pengosongan Bagaimana kinerja baterai lithium ion setelah 7 tahun di orbit rendah Bumi? Badan Antariksa Eropa telah merencanakan pada tahun 1999 penggunaan baterai lithium ion di pesawat ruang angkasa seperti itu, jadi tes kehidupan dimulai pada Mei 1999, pada enam sel 100-Ah yang diproduksi oleh Mitsubishi Electric Corporation. Spesifikasi baterai ini dirangkum dalam Tabel 3.2. Sel-sel yang diuji telah melewati 35.000 charge-discharge dengan kedalaman debit 30 persen di setiap siklus. Ambil fumi Inoue meringkas data yang diperoleh di Energi Internasional Kedua Konferensi Rekayasa Konversi pada tahun 2003 [16].

**Tabel 3.2** Spesifikasi Sel Li Ion LED 100 Ah

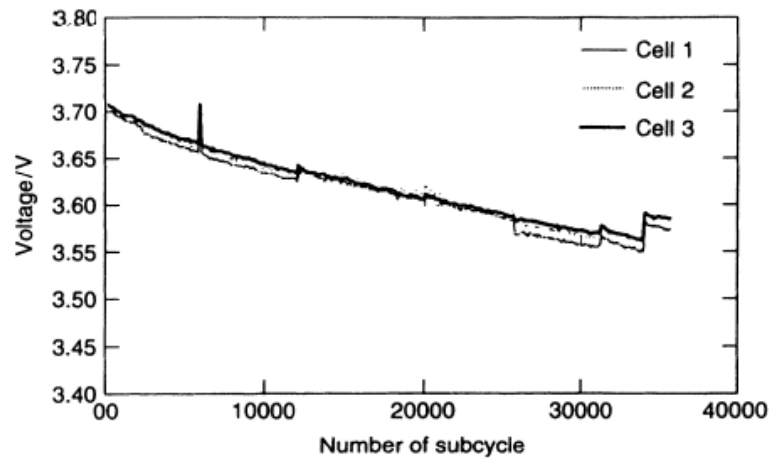
Parameter	Specification
Shape	Elliptic cylindrical
Dimensions, $H \times W \times T$ , cm	20.8,13, 5
Mass, kg	2.79
Case material	Aluminum alloy
Positive electrode	Lithium cobalt dioxide
Negative electrode	Carbon
Separator	Microporous film
Electrolyte	Li salt <sup>a</sup>
Nominal discharge voltage	3.7
Specific energy, Wh/kg	133

Kapasitas setiap sel diukur pada suhu 20°C sebelum uji hidup dan secara berkala selama uji hidup. Setiap pengukuran kapasitas didahului oleh muatan arus konstan 25 A, diikuti oleh muatan tegangan konstan 3,98 V. Kapasitas setiap sel pertama kali diukur pada arus 20-A (C15), dan kemudian setelah diisi ulang pada arus 50-A (e/2).

Baterai 4 dikosongkan pada 60 A selama 30 menit, dibiarkan pada rangkaian terbuka selama 10 detik, dan kemudian diisi ulang pada arus 25 A. Ini diikuti awalnya dengan pengisian 3,95 V selama 85 rnin. Tegangan dinaikkan menjadi 3,98 V setelah 16.000 siklus. Suhu baterai dijaga pada 20 ° C. Plot Inoue dari tegangan pengosongan akhir dalam baterai 4 setelah 35.000 siklus pengisian-pengosongan ditunjukkan pada Gambar 3.10. Tegangan tiga sel perwakilan telah menurun dari 3,7 menjadi 3,55 V selama 35.000 siklus pengujian charge-discharge.

Mitsubishi telah mengembangkan sel-sel ini untuk baterai 40 kWh yang dapat digunakan pada kendaraan listrik hibrida. Persyaratannya mencakup masa manfaat 300.000 siklus pengisian-pengosongan, masing-masing memiliki pulsa daya 25-kW. Target biaya baterai adalah \$500 per baterai. Masa Depan Perbaikan Ion Lithium Masa pakai yang lama dan bobot baterai lithium ion yang rendah menjadikannya pilihan terbaik untuk banyak aplikasi penyimpanan energi. Namun, biaya tinggi mereka membatasi daya jual mereka. Biaya mereka pasti akan menurun karena teknologi baru diterapkan untuk memproduksi unsur-unsur tanah jarang yang dibutuhkan dalam sel-sel ini.

Dalam propulsi sepeda listrik, persyaratan dasarnya adalah bobot yang rendah dan biaya masa pakai yang rendah, baterai Lithium ion unggul dalam hal ini. Biaya bahan bakar akan meningkat setelah produksi minyak dunia mencapai puncaknya, dan pengguna kemudian akan bersedia membayar mahal untuk sebuah sepeda di mana baterai yang menyimpan energi propulsi memiliki masa pakai yang diprediksi selama puluhan tahun.



**Gambar 3.10** Selama 35.000 siklus pengisian-pengosongan, tegangan akhir pelepasan turun dari 3,7 V per sel menjadi 3,55 V. (Dari Inoue et al. [16].)

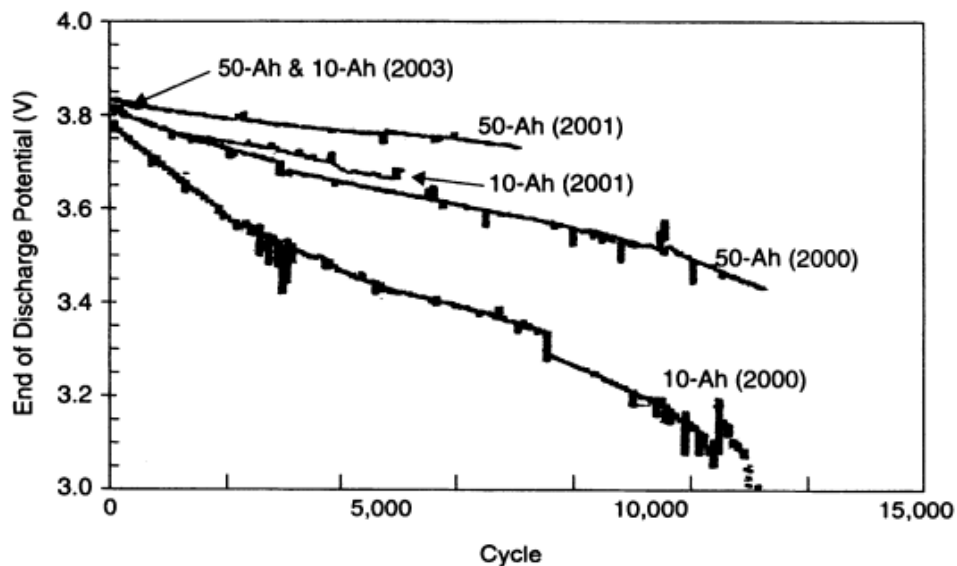
Sel Lithium Ion Ringan dalam Aluminium Case Cells yang dibuat untuk aplikasi luar angkasa harus memenuhi persyaratan yang mencakup getaran intens, akselerasi, guncangan, dan suhu, ditambah kemampuan untuk membawa beban berlebih dalam keadaan darurat. Brian J. Stein menjelaskan kemajuan di Mine Safety Appliances Company dalam mengembangkan sel ion lithium dalam kasus yang memenuhi persyaratan ini [17]. Hal ini menyebabkan pertimbangan aluminium dan titanium sebagai bahan ringan dengan kepadatan 2,70 dan 4,51 g/cm<sup>3</sup>. Baja tahan karat memiliki berat 8,03 g/cm<sup>3</sup>, Mengganti baja tahan karat dalam belut 10-Ah akan menghasilkan penghematan berat 13 persen dan peningkatan 15 persen dalam kepadatan energi gravimetri sel.

Komponen penting dari perakitan sel adalah kasusnya. Paduan casing yang dievaluasi meliputi paduan titanium dan aluminium 1100, 3003, dan 6061. Paduan 3003 dipilih karena kemurniannya yang tinggi minimal 98,20 persen dan karena memiliki 1,0 hingga 1,5 persen magnesium yang memberikan kekuatan ekstra 20 persen. Casing berdinding tipis dengan dimensi yang tepat diperlukan untuk membatasi tumpukan elektroda dengan benar dan memberikan jarak antarelektroda yang konsisten di seluruh tumpukan elektroda selama siklus. Casing bisa dibuat sebagai rakitan fabrikasi-las dua bagian. Casing yang dibuat dalam dipilih karena keandalannya yang tinggi. Integritas struktur unit berulang kali konsisten dalam dimensi, dan biaya struktur unit lebih rendah daripada struktur yang dilas. Pengujian menunjukkan bahwa kasus paduan aluminium memenuhi persyaratan korosi. Tes keamanan termasuk getaran, korsleting, dan efek overcharge.

Sel prototipe yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 3.11. Hasil uji siklus charge-discharge, pada sel 10- dan 50-Ah, diplot pada Gambar 3.12. Mereka menunjukkan bahwa pada kedalaman pelepasan 40 persen, sel 10- dan 50-Ah memiliki kehilangan kapasitas yang cukup rendah setelah 10.000 siklus pengisian-pengosongan. Penulis menyimpulkan bahwa program ini menghasilkan sel lithium ion yang lebih ringan dengan semua karakteristik kinerja mekanik dan elemen belut kecil yang dirakit menjadi perangkat keras baja tahan karat.



**Gambar 3.11** Rumah aluminium ringan menambah kekasaran pada ion lithium IO-Ah ce1!. (Dari Brian J. Stein (17) .) Direproduksi dengan izin dari Perusahaan Peralatan Keselamatan Tambang.



**Gambar 3.12** Sel ion lithium 10- dan 50-Ah baru menawarkan masa pakai 10 tahun dalam perjalanan harian dengan sepeda listrik. (Dari Brian J. Stein (17).) Direproduksi dengan izin dari Perusahaan Peralatan Keselamatan Tambang.

### Seng, Natrium, dan Bauer Seng Lainnya

Seng adalah elektroda berbiaya rendah berenergi tinggi dalam baterai primer, seperti sel kering biasa. Seng juga telah menjadi elektroda yang sukses dalam baterai primer perak-seng yang menghasilkan lebih dari 100 Wh/lb. Baterai ini dapat dirancang untuk mengirimkan energinya dalam beberapa menit, membuatnya berguna untuk rudal, kendaraan peluncur, dan torpedo. Baterai tingkat debit tinggi seperti itu sering dibuat sedemikian rupa sehingga elektrolit dimasukkan sesaat sebelum digunakan.

Pengembangan baterai isi ulang perak-seng dan nikel-seng hanya berhasil sebagian. Selama pengisian, seng dilapisi dari larutan, dan cenderung membentuk dendrit melalui lubang kecil pada bahan yang memisahkan pelat. Lubang kecil tampaknya menyediakan jalur resistansi rendah yang menarik pertumbuhan dendrit. Beberapa baterai perak-seng telah mencapai lebih dari 100 siklus pengisian-pengosongan. Baterai nikel-seng telah bertahan 700 siklus tetapi tidak secara konsisten. Baterai Sodium Sulphur untuk Efisiensi 100 persen Coulomb Baterai sodium sulfur telah dikembangkan untuk mobil listrik. Keunggulan mereka

adalah kepadatan daya yang tinggi, yaitu sekitar 110 Wh/kg. Kerugiannya adalah suhu operasinya adalah 350 ° F, yang membutuhkan oven.

Douglas M. Allen memutuskan untuk menguji baterai ini untuk kemungkinan digunakan dalam pesawat ruang angkasa, di mana isolasi vakum yang sangat baik tersedia untuk oven. Hasil tes sangat dramatis. Pada 4 Agustus 1984, jumlah siklus pengisian-pengosongan pada kedalaman pengosongan 80 persen telah mencapai 2.400, tanpa kehilangan kinerja yang terlihat [18]. Tegangan pengisian lebih tinggi dari tegangan pelepasan, sehingga efisiensi keseluruhan adalah 80 persen. Tegangan rangkaian terbuka sel-sel ini adalah 2,07 V.

Pengembangan Baterai Departemen Energi AS untuk Kendaraan Listrik dan Hibrida The V.S. Tanggapan Departemen Energi (DOE) terhadap krisis minyak bumi yang akan datang adalah program baru, Efisiensi Energi dan Energi Terbarukan. Program ini dijelaskan pada sesi pleno, "Teknologi Penyimpanan Energi Tingkat Lanjut-Aplikasi dan Status Potensial" pada Konferensi Teknik Konversi Energi Internasional Pertama pada tahun 2003. Tujuan program, yang dijelaskan oleh James A. Barnes dalam presentasi lisan, adalah untuk membuat kendaraan listrik bertenaga baterai dan hibrida praktis [19]. Tantangan utama dari program ini yang dikutip oleh Barnes adalah biaya, toleransi penyalahgunaan, dan masa pakai baterai. Di antara tujuan jangka panjang komersial baterai yang memberi daya pada kendaraan listrik 40 kW dalam program ini adalah sebagai berikut:

Daya spesifik selama pelepasan hingga kedalaman 80 persen:	400 Wh/kg
Siklus hidup dengan 80 persen kedalaman debit	1000 siklus
Siklus hidup dengan 30 persen kedalaman debit	2670 siklus
Waktu pengisian ulang normal	3 hingga 6 jam
Pengisian daya tingkat tinggi, dari status pengisian 40 hingga 80 persen	15 mnt

### 3.4 SEL BAHAN BAKAR UNTUK MENGHIDUPKAN SEPEDA LISTRIK

Efisiensi konversi energi lebih dari 90 persen telah dicapai dalam sel bahan bakar hidrogen-oksigen. Manfaat dari efisiensi ini diilustrasikan oleh seorang penulis Brasil yang menggambarkan solusi untuk masalah yang dimiliki utilitas mereka dalam memasok daya puncak selama sore hari. Penghuni apartemen dan klakson dapat membantu memasok daya selama periode daya puncak ini dari sel bahan bakar. Pada malam hari mereka dapat mengelektrolisis air menjadi hidrogen dan oksigen untuk sel bahan bakar mereka. Utilitas dapat memberi penghargaan kepada para pembantu ini karena mereka akan menghindari biaya pembangunan pembangkit listrik baru yang beroperasi hanya selama periode beban puncak.

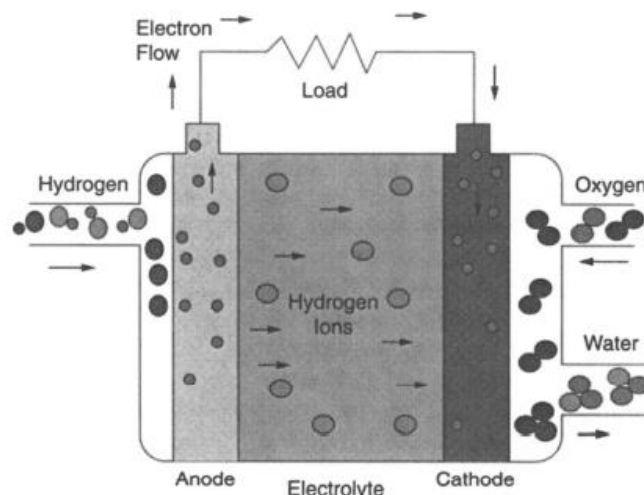
Sel bahan bakar yang mengonsumsi gas terkompresi atau cair memiliki daya yang dihasilkan secara efisien untuk pesawat ruang angkasa berawak. Sel bahan bakar belum praktis untuk pembangkit listrik permukaan bumi karena menyimpan dan mengangkut hidrogen sulit, dan katalis platinum yang dibutuhkan mahal. Sekarang teknologi baru membuat sel bahan bakar praktis untuk menyalakan kendaraan listrik. Misalnya, hidrogen yang dapat diekstraksi dari gas alam sekarang dapat disimpan secara kompak dalam hidrida.

Sel bahan bakar juga dapat berjalan dengan bahan bakar cair. Bus bertenaga sel bahan bakar prototipe sedang beroperasi.

Efisiensi tinggi yang dimungkinkan dengan sel bahan bakar dapat membuat sepeda bertenaga sel bahan bakar praktis untuk perjalanan jarak jauh, serta untuk perjalanan lokal, selama era pascapetroleum mendatang. Pada bagian berikut, kami meninjau dasar-dasar sel bahan bakar dan bagaimana mereka dapat digunakan untuk menopang sepeda listrik. Masalah saat ini adalah tingginya biaya bahan bakar hidrogen dan sulitnya membawanya dengan sepeda. Kemungkinan solusi untuk masalah ini dievaluasi.

### Dasar-Dasar Penghasil Tenaga Listrik Sel Bahan Bakar

Sel bahan bakar pada dasarnya adalah sel elektrokimia, seperti sel baterai, yang terdiri dari dua pelat yang dipisahkan oleh elektrolit. Elektroda negatif, yang menyumbangkan elektron ke sirkuit eksternal, juga disebut anoda selama pengosongan. Reaksi pada elektroda negatif disebut oksidasi. Elektroda positif atau katoda menyerap elektron dari beban eksternal. Reaksi di katoda disebut reduksi. Bantuan memori adalah "kucing merah" untuk reduksi yang terjadi di katoda.



**Gambar 3.13** Dalam sel bahan bakar, elektron hidrogen terpisah dari ionnya di anoda negatif, kemudian mengalir melalui beban eksternal, dan akhirnya bergabung kembali dengan ionnya di katoda untuk membentuk air. (Dari S. Johnny Fu, Ansoft Corporation dari presentasi yang dibuat di Boeing, Kent, WA "Workshop, 2002," hal, 36.)

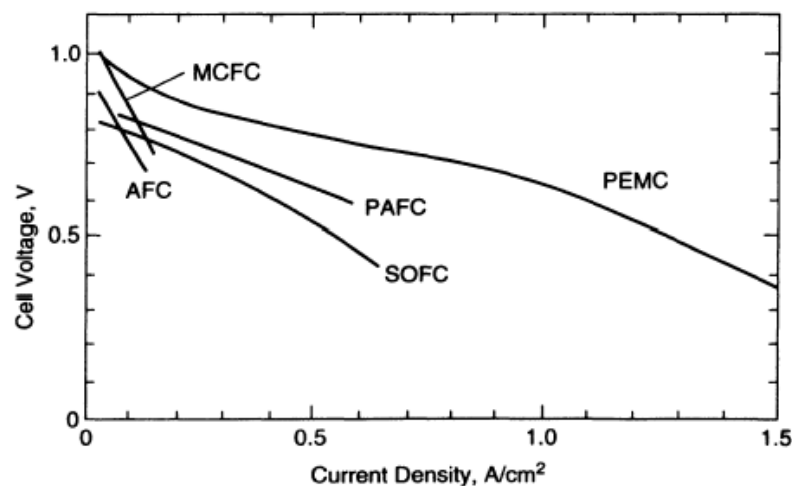
Sel bahan bakar tipikal adalah kotak dengan elektroda yang dikatalisis, saluran gas, saluran pendingin, dan elektrolit yang mengubah energi kimia dari gas yang masuk, biasanya hidrogen dan oksigen, menjadi tenaga listrik. Biasanya, sel bahan bakar lebih efisien dan kompak jika reaksi berlangsung di bawah tekanan beberapa atmosfer dan suhu di atas titik didih air. Dasar-dasar sel bahan bakar hidrogen membran proton-elektron (PEM) dirangkum dalam Gambar 3.13. Hidrogen memasuki sisi kering pelat anoda, dan elektronnya dilepaskan dari atom hidrogen sebelum memasuki elektrolit. Elektron mengalir melalui beban ke katoda sel. Ion hidrogen, setelah meninggalkan elektronnya di anoda, mengalir melalui elektrolit ke katoda, di mana mereka bersatu kembali dengan elektronnya dan bergabung dengan gas oksigen untuk membentuk air yang mengalir keluar dari selo.

Reaktan yang masuk ke sel bahan bakar disebut bahan bakar dan oksidator. Bahan bakarnya biasanya hidrogen, berasal dari tangki, hidrida, atau dari bekas yang mengubah

metanol atau metana menjadi hidrogen. Oksidator biasanya oksigen murni atau udara. Karakteristik volt/ampere keluaran dari sel bahan bakar tipikal diplot pada Gambar 3.14. Kurva "PMFC" ini untuk sel dengan membran proton-elektron khas yang memisahkan anoda dari katoda. Sebagian besar sel bahan bakar dibangun di sekitar membran pertukaran proton-elektron.

Fitur energi sel bahan bakar meliputi:

- Konversi bahan bakar dan oksidator menjadi tenaga listrik bukanlah proses mesin panas, sehingga batas efisiensi Camot tidak berlaku.
- Sel bahan bakar telah menjadi sumber daya yang sukses untuk pesawat ruang angkasa berawak di mana daya dibutuhkan selama fase misi dorong dan masuk kembali, serta selama pelayaran. Hidrogen dengan kemurnian tinggi diperlukan untuk bahan bakar di sel bahan bakar pesawat ruang angkasa.
- Sel bahan bakar telah memasok daya komersial dan utilitas, tetapi keunggulan ekonomi sel bahan bakar dibandingkan sumber daya alternatif belum terbukti.
- Katalis tipe platinum umumnya diperlukan dalam sel bahan bakar.
- Hidrogen sulit disimpan, sehingga sel bahan bakar terestrial sering dirancang untuk menggunakan metana atau bahan bakar cair. Pembaharu yang diperlukan akan menambah kompleksitas dan kerugian di pembangkit listrik. Hidrogen juga dapat disimpan dalam amonia cair, dan katalis yang baru ditemukan dapat memisahkan amonia untuk melepaskan gas hidrogen untuk sel bahan bakar yang menggerakkan sepeda listrik.



**Gambar 3.14** Efisiensi sel bahan bakar, ketika membawa arus beban tertentu, adalah tegangan pada arus beban dibagi dengan tegangan pada arus nol. Pada arus tinggi efisiensinya rendah. AFC adalah sel bahan bakar asam, PEMFC adalah sel bahan bakar penukar proton, PAFC adalah sel bahan bakar asam fosfat, SOFC adalah sel bahan bakar oksida padat, dan MCFC adalah sel bahan bakar karbonat molten, (Dari S. Johnny Fu, Ansoft Corporation dari presentasi yang dibuat di Boeing, Kent, WA, "Lokakarya 2002," hal. 34.)

Kehilangan energi yang melekat setidaknya 17 persen terjadi ketika hidrogen dan oksigen diubah menjadi air. Parameter kinerja utama sel bahan bakar adalah tegangan dan kepadatan arus. Biaya sel bahan bakar terkait dengan area elektroda, jadi desainer mencari kepadatan arus yang tinggi. Setiap reaksi sel bahan bakar memiliki tegangan teoritis dan

*Sepeda Listrik: Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan (Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom, M.Kom.)*

tegangan yang dapat dicapai. Selisih dari tegangan ini merupakan rugi-rugi yang berasal dari bahan bakar. Tugas perancang sel bahan bakar adalah menemukan kompromi terbaik dari katalis yang mahal, konfigurasi sel yang cerdas, suhu operasi, dan alat bantu yang canggih. Kinerja sel tunggal biasanya diplot dalam bentuk voltase sebagai fungsi ampere/kaki persegi, atau miliampere/sentimeter persegi. Efisiensi adalah rasio keluaran daya sel dengan nilai kalor bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya ini.

### **Kinerja Sel Bahan Bakar**

Kinerja sel bahan bakar diukur dalam laju panas, yang dinyatakan sebagai nilai kalor yang lebih tinggi dari bahan bakar yang dikonsumsi dalam menghasilkan 1 kWh listrik. Sel bahan bakar yang 100 persen efisien hanya akan mengkonsumsi 3412 Btu/kWh bahan bakar. Pabrik United Technology 4,8 MW di Tokyo Electric memiliki tingkat bahan bakar 9600 Btu/kWh. V.S terbaik pembangkit uap pada tahun 1983 memiliki tingkat bahan bakar 8987 Btu/kWh. Pada tahun 2003 pembangkit listrik tenaga uap siklus gabungan terbaik memiliki efisiensi 60 persen, dan konsumsi bahan bakarnya hanya 5690 Btu/kWh. Biaya konstruksinya adalah Rp 7.500.000/kW output daya.

Kinerja elektrokimia sel bahan bakar diplot dalam volt sebagai fungsi rapat arus, biasanya dalam ampere/kaki persegi. Energi yang dilepaskan ketika hidrogen dan oksigen bergabung dalam pembakaran sesuai dengan output 1,48 V dari sel bahan bakar jika air adalah produk dan 1,23 V jika uap. Tegangan tidak dapat dicapai karena ireversibilitas proses elektroda, polarisasi aktivasi, dan konsentrasi atau gradien aktivitas di elektroda.

Tujuan dari pengembang sel bahan bakar adalah untuk mendapatkan tegangan praktis tertinggi dari sel. A. J. Appleby, dari Electric Power Research Institute, dalam makalah yang dipresentasikan dalam sesi sel bahan bakar di Orlando, Florida, mengembangkan nilai untuk tegangan ini [20]. Dia berasumsi bahwa biaya tetap tahunan sel bahan bakar adalah Rp 3.000.000/kW per tahun, dan pembangkit akan memiliki ketersediaan 5.000 jam per tahun. Jika bahan bakar, gas alam, berharga Rp 105.000/juta Btu, maka peningkatan 40 mV memberikan perubahan biaya listrik keseluruhan yang sama dengan penurunan biaya modal pembangkit listrik sebesar 7,5 persen.

Biaya Tinggi Pengangkutan dan Pengiriman Masalah pasokan Hidrogen Hidrogen telah diukur tetapi belum terpecahkan. Pada 11.600 psi energi dalam volume tertentu hidrogen adalah 10,2 megajoule per liter (MJ/L) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3. Itu hanya sepertiga dari energi dalam bensin atau metana pada 11.600 psi.

Gas alam dihasilkan dari sumur bor dan dikompresi di kepala sumur untuk dikirim ke konsumen melalui pipa. Pipa memiliki luas penampang dan ketebalan dinding yang memungkinkannya mengirimkan jumlah energi yang dibutuhkan ke tujuan penerima gasnya. Pastikan bahwa output kompresor diubah menjadi hidrogen dari prosesor, dan batas tekanan pipa tidak terlampaui. Kemudian energi yang dikirim ke agen pengguna dalam hidrogen hanya akan menjadi sepertiga dari energi dalam gas alam yang dikirim sebelumnya. Juga, banyak karbon perlu dikirim keluar dari lokasi kepala sumur di mana hidrogen diekstraksi dari metana dan hidrokarbon lainnya dalam gas alam.



**Tabel 3.3** Kepadatan Energi Berbagai Bahan Bakar

Fuel	State	Pressure (psi)	Energy Density (MJ/Li)
Gasoline	Liquid	Ambient	33.5
Methane	Gas	11,600	32.5
Propane	Liquid	Ambient	25.2
Methanol	Liquid	Ambient	17.5
Hydrogen	Gas	11,600	10.2
Hydrogen	Gas	2,900	8
Hydrogen	Liquid	~200 <sup>a</sup>	10
Methane	Gas	2900	2.5

Sumber: John R. Wilson, Mengapa (Tidak) Hidrogen? Asosiasi Kendaraan Listrik, Peristiwa Terkini, Nov-Des 2003.

<sup>a</sup> Pada suhu -240 °C.

Hidrogen dengan biaya terendah saat ini adalah produk sampingan dari kilang minyak. Produksi minyak bumi dunia diperkirakan mencapai puncaknya pada tahun 2005, dan berkurang setiap tahun setelah itu, Dengan demikian biaya hidrogen yang diperoleh dari penyulingan minyak bumi dapat diperkirakan akan meningkat. Hidrogen dapat diproduksi di stasiun pengisian bensin dengan mengelektrolisis air. Sumber utama hidrogen dapat berupa proses elektrokimia suhu tinggi yang menggunakan energi panas dari batu bara untuk menciptakan reaksi produksi hidrogen yang juga melepaskan banyak karbon dioksida.

Energi matahari juga dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen. Sebuah array surya dengan 34 persen sel surya efisien dapat mengirimkan energi output ke elektroliser yang dapat menghasilkan hidrogen dengan efisiensi lebih dari 80 persen. Daun tanaman menggunakan energi dari foton 3-eV untuk menghasilkan hidrogen yang mereka ubah menjadi hidroearbons. Namun, kurang dari 30 persen spektrum matahari memiliki energi yang cukup untuk mengekstraksi hidrogen dari air secara langsung. Sel surya memang menangkap energi bahkan dari lampu hijau yang dipantulkan daun tanaman. Pembangkit listrik tenaga nuklir adalah sumber energi yang jelas untuk elektrolisis air untuk produksi hidrogen. Negara-negara, seperti Cina, sekarang membangun lebih banyak pembangkit listrik tenaga nuklir.

### **Tenaga Sel Bahan Bakar untuk Sepeda Listrik**

Hidrogen cair dan oksigen dibawa dalam tangki terisolasi di era ruang angkasa berawak di mana mereka digabungkan dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan tenaga listrik yang dibutuhkan. Panas yang bocor ke tangki gas cair akan menyebabkan gas mendidih dan menghasilkan tekanan tinggi, sehingga tangki hidrogen dan oksigen disimpan dalam wadah berinsulasi termal. Lapisan-lapisan insulasi reflektif memisahkan tangki berisi gas cair dari lingkungan hangat di pesawat ruang angkasa. Untuk menghindari perpindahan panas oleh arus udara konveksi, lapisan insulasi reflektif harus dievakuasi. Vaeuum sudah tersedia di pesawat ruang angkasa tetapi tidak tersedia di bicycle.

Opel Zafira bertenaga sel bahan bakar, minivan lima penumpang, adalah mobil kecepatan maraton yang telah dibangun untuk Olimpiade 2000. Tenaga penggeraknya dari motor ac 75-hp memungkinkannya berakselerasi dari 0 hingga 60 mph (96 km/h) dalam 16

detik. Kecepatan tertingginya adalah 84 mph (135 km/h). Kompresor udara memasok oksigen ke tumpukan sel bahan bakar. Pasokan hidrogennya diekstraksi oleh bekas dari metanol dan kemudian disimpan sebagai cairan dalam tangki pada suhu  $-253^{\circ}\text{C}$ . Tangki baja tahan karat yang dapat menyimpan 2,27 lb (5 kg) hidrogen cair berdiameter 1 kaki (30 cm) dan panjang 3,25 kaki (1 m). Insulasi fiberglass berlapis-lapis mengelilingi tangki. Paket baterai tegangan tinggi di bawah lantai belakang Zafira melengkapi daya sel bahan bakar saat daya puncak untuk akselerasi diperlukan.

### **3.5 SUMBER DAYA LISTRIK BARU TERBAIK UNTUK PROPULSI SEPEDA**

Pada tahun 1999 kami menggunakan baterai timbal-asam pada sepeda listrik yang kami gunakan untuk mengukur daya yang diperlukan untuk perjalanan sepeda listrik di jalan raya, jalan raya, dan di atas bukit yang tinggi. Baterai timbal-asam adalah sumber energi penggerak kami yang paling praktis saat itu. Kebutuhan kendaraan bertenaga listrik yang berkembang pesat dewasa ini telah menghasilkan pengembangan sumber tenaga penggerak yang baru dan lebih baik yang dijelaskan pada bagian berikut.

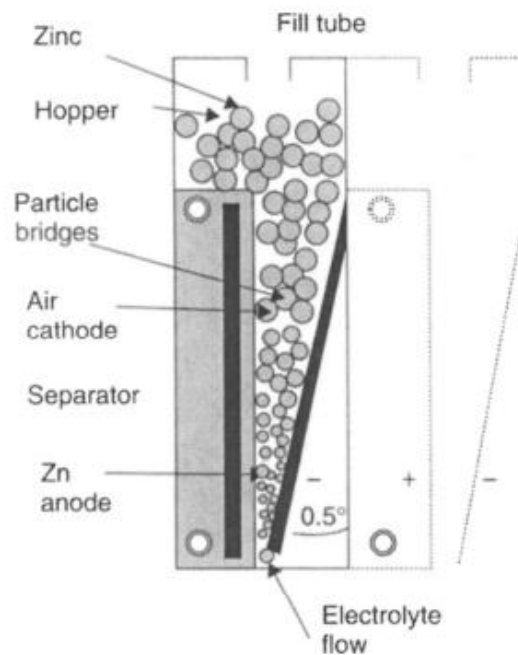
#### **Daya Sel Bahan Bakar Udara Seng untuk Sepeda Listrik**

Sebuah sepeda listrik yang didorong oleh sel bahan bakar yang menggunakan hidrogen dari tangki dan oksigen dari udara akan memiliki efisiensi yang memungkinkan perjalanan 1000 mil dengan menggunakan energi yang setara dengan 1 galon bensin. Namun, hidrogen baik dalam tangki bertekanan tinggi atau wadah cair kriogenik bisa jadi sulit dibawa dengan sepeda.

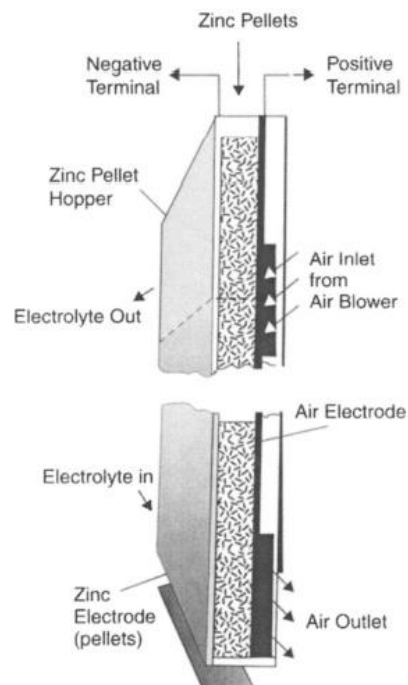
Bahan bakar belut yang baru dikembangkan yang berjalan di atas bubuk zine, ditambah oksigen dari udara, bisa menjadi sumber tenaga untuk sepeda listrik. Ini telah diuji dalam menyalakan bus yang berlari ratusan mil melalui Pegunungan Alpen di Eropa. Bubuk seng dimasukkan ke dalam belut sampai sel terisi penuh dengan seng oksida (Gbr. 3.15). Pengisian ulang membutuhkan pemompaan elektrolit yang mengandung seng-oksida dan menggantinya dengan elektrolit segar. Zine kemudian diekstraksi dari seng oksida dengan elektrolisis, yang bahkan dapat ditenagai oleh susunan sel surya. Di daerah terpencil, wadah bubuk zine dapat disimpan untuk menyalakan sepeda pada hari berawan.

Dalam desain lain pelet seng dijatuhkan ke bagian atas sel bahan bakar seng-udara, antara pelat negatif dan positif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16. Elektrolit disuntikkan ke bagian bawah sel dan beredar keluar di bagian atas sel. Oksigen disuplai di udara yang dihembuskan melewati bagian luar pelat positif, yaitu karbon yang melaluinya oksigen dapat mengalir. Dalam satu versi sel, pelet seng dimasukkan ke dalam hopper dan melayang ke bawah dalam elektrolit saat mereka kehilangan seng ke dalam elektrolit.

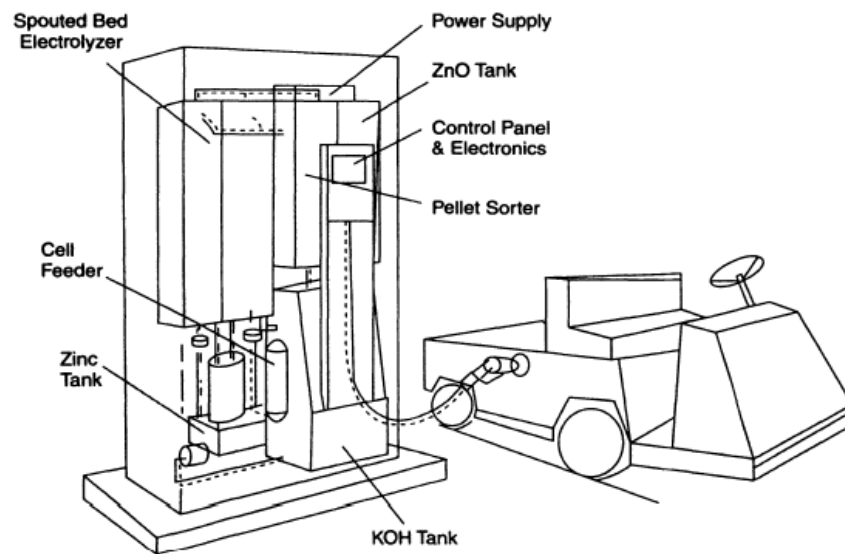
Kekuatan logam telah dikembangkan dan diuji stasiun pengisian bahan bakar kendaraan yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. Elektrolit yang mengandung seng dipompa keluar dari rakitan sel bahan bakar kendaraan dan disalurkan ke "elektroliser unggun bertunas." Selang lain di stasiun pengisian bahan bakar ini mengirimkan elektrolit segar dan pelet seng ke dalam tangki kendaraan. Kendaraan kemudian meninggalkan stasiun, dan elektroliser melanjutkan untuk memisahkan seng dari elektrolit, menggunakan tenaga listrik lokal dalam proses yang memulihkan seng.



**Gambar 3.15** Sel bahan bakar zinc-air yang mengandung elektrolit menerima pelet zinc dari hopper dan oksigen dari udara yang dikirim melalui eathode oleh blower. (Dari Stuart Smedley, Metallic Power Ine., Carlsbad, CA, "Sel Bahan Bakar Udara Seng untuk Kendaraan Industri dan Khusus," Desember 2000.)



**Gambar 3.16** Dalam sel bahan bakar zine-air ini, elektrolit mengalir ke atas dan membersihkan area belut dari seng oksida, yang terbentuk sebagai daya yang dihasilkan di zona aktif dalam Gell bahan bakar. (Di depan N. J. Cherepy, R. Krueger, dan J. F. Copper. Sel Bahan Bakar ZinlAir untuk Kendaraan Listrik, Laboratorium Nasional Lawrence Livermore, Livermore, CA.)

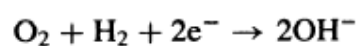


**Gambar 3.17** "Stasiun pengisian bahan bakar" menyedot elektrolit yang mengandung zincate dalam kendaraan bertenaga sel bahan bakar. Kemudian mengisi ulang tangki kendaraan dengan elektrolit segar dan bubuk seng. Elektroliser "spouted bed" menggunakan daya utilitas untuk memulihkan seng dari cairan yang diterima. (Dari Stuart Smedley, ARegenerative Zinc Air Fuel Cell untuk Kendaraan Industri dan Khusus, Konferensi Baterai Tahunan ke-15 IEEE tentang Aplikasi dan Kemajuan.)

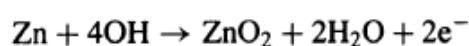
Elektrokimia Sel Udara Seng Sebuah anoda umum untuk senter primer dan sel lainnya adalah seng, logam berlimpah yang harganya sekitar 50 sen dolar. Ini memberikan output 1,2 hingga 1,7 V per sel yang nyaman karena sengnya dioksidasi menjadi seng oksida atau seng klorida. Reaksi seng-oksigen berguna karena hanya anoda, elektrolit, dan katoda karbon yang tidak bereaksi yang diperlukan. Ini adalah reaksi dalam baterai "sel udara" yang digunakan pada radio tabung vakum awal. Hal ini juga digunakan dalam baterai seng-udara yang diproduksi oleh McGraw Edison untuk sinyal kereta api, beacon terapung es, repeater radio, dan pelampung lepas pantai. Pelampung sulit untuk diservis, dan kebutuhan untuk mengisi ulang baterai penyimpanan akan menambah kerumitan tugas.

Baterai zinc-air dapat dibuang setelah digunakan. Pada pelampung, di mana baterai penyimpanan timbal-asam dengan berat tertentu harus diisi ulang setiap 6 bulan, baterai seng-udara dengan berat yang sama akan menghasilkan daya selama 5 tahun.

Baterai zinc-air menggunakan elektroda karbon berpori untuk mengirimkan oksigen dari udara ke dalam elektrolit (Gambar 3.16). Di sini oksigen bereaksi dengan air, menerima elektron dari sirkuit eksternal, untuk membentuk ion hidroksil:



Ion hidroksil berdifusi melalui elektrolit ke anoda seng untuk reaksi oksidasi ini:



Pada elektroda negatif empat OH<sup>-</sup> ion dikonsumsi untuk setiap dua yang dihasilkan pada elektroda positif. Elektron yang dilepaskan berjalan melalui sirkuit eksternal ke katoda karbon, memberikan energi ke beban. Konsumsi seng terkait dengan arus yang dikirim. Satu gram mol seng adalah berat atomnya, 65,38, dinyatakan dalam gram. Satu gram mol suatu unsur memiliki  $6,0225 \times 10^{23}$  atom, dan satu elektron bernilai  $1,602 \times 10^{-19}$  coulomb. Dengan konstanta ini kami menghitung konsumsi,  $C_z$ , seng dalam baterai, mencatat bahwa setiap atom menyumbangkan dua elektron ke reaksi.

$$C_z = \frac{2 \times 6.02252 \times 10^{23} \text{ electrons} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ coulombs} \times \text{mole}}{\text{mole} \times \text{electron} \times 65.38 \text{ g}}$$

$$= 2951.57 \text{ C/g}$$

Satu ampere-jam adalah 3600 ampere-detik, sehingga gram zine memberikan:

$$\frac{2951.57 \text{ C/g}}{3600 \text{ C/Ah}} = 0.82 \text{ Ah/g}$$

Ini setara dengan 820 Ah/kg (372 Ah/lb), dan pada 1,2 V/sel, 984 Wh/kg (446 Wh/lb).

### Baterai Gas-Zinc

Baterai zinc-air menghasilkan sekitar 1 Wh untuk setiap gram seng yang dikonsumsi. Reaksi seng dengan klorin dan bromin melepaskan lebih banyak energi, sehingga memberikan tegangan yang lebih tinggi daripada yang disebutkan di atas. Baterai semacam itu juga disebut sel bahan bakar hibrida karena satu elektroda adalah gas dan lainnya adalah logam. Kami pernah mengevaluasi baterai tersebut untuk aplikasi yang membutuhkan banyak megawatt jam energi yang tersimpan. Pasangan elektrokimia ini telah dikembangkan untuk kemungkinan baterai sekunder di mobil listrik.

Marti Klein dari Energy Research Corporation mengembangkan bagi kami konsep baterai seng-bromin. Salah satu konsepnya memiliki elektroda seng-slab yang dikonsumsi sebagai baterai yang memberikan energi. Dalam baterai lempengan seng, ruang elektrolit melebar saat seng bereaksi dan terbawa dalam larutan. Ini meningkatkan resistansi internal baterai dan karenanya kerugian internalnya. Alternatif yang disarankan oleh Klein adalah mengirimkan seng ke baterai dalam bentuk bubuk. Brom mudah disimpan, berbentuk cair pada suhu hingga 138°F pada tekanan atmosfer normal. Sel-sel seng-bromin akan melepaskan diri, sehingga baterai harus digunakan dalam beberapa minggu setelah diaktifkan.

Baterai utama seng klorin-gas diadaptasi untuk kami dari pengembangan mobil listrik oleh Energy Development Associates di Madison Heights, Michigan. Baterainya memiliki seng dalam penampang berbentuk sisir. Elektroda bon mobil di ruang antara gigi sisir dibangun dengan saluran klorin. Kandungan energi baterai terbatas pada kandungan sengnya. Prinsip yang sama digunakan dalam baterai 500-kWh load-leveling perusahaan untuk penggunaan utilitas.

### Baterai Lithium

Litium, logam ringan reaktif, telah berhasil dikemas ke dalam adonan yang menghasilkan lebih dari 200 Wh/lb (440 Wh/kg). V.S. Angkatan Udara telah mensponsori pengembangan unit-unit besar untuk aplikasinya, dan spin-off adalah baterai tahan lama untuk jam tangan, radio darurat, senter, telepon, dan komputer laptop. Kandungan energi yang dapat diekstraksi dari baterai lithium berbanding terbalik dengan jumlah daya yang diekstraksi dari baterai. Misalnya, sel Altus AL 1700-500 akan menghasilkan 500 Ah pada hampir konstan 3,5 V jika dilepaskan selama 500 jam pada 1 A. Jika arus dinaikkan menjadi 6,25 A, sel hanya mengalirkan 300 Ah dengan tegangan jatuh yang cepat (Gambar 3.18).

Baterai lithium memiliki sekitar seperempat kepadatan energi TNT. Kecelakaan dalam pengembangan awal baterai lithium memotivasi penelitian yang menyebabkan baterai gagal aman. Misalnya, Altos telah menguji sel lithium tionil kloridanya dalam setiap skenario kecelakaan yang mungkin terjadi, termasuk kejutan, getaran, tusukan, benturan, kebakaran, tegangan balik, dan pengisian paksa. Tidak ada bencana yang terjadi. Harga harus dibayar untuk baterai lithium yang ringan. Misalnya, baterai AL 1700-2000, bagus untuk 200 Wh/lb, harganya mulai dari Rp 37.500.000 hingga Rp 75.000.000, tergantung pada kuantitas dan konfigurasi. Pada Rp 37.500.000, harganya Rp 4.800.000/kWh. Sel zine-air berharga sekitar Rp 225.000/kWh.

### **Teknologi Pembangkit Listrik Sel Bahan Bakar Dapat Menjadi Sumber Daya untuk Kendaraan Listrik**

Efisiensi sel bahan bakar meningkat dan biaya menurun. Karena sel bahan bakar tidak dibatasi oleh efisiensi siklus panas Camot hingga sekitar 60 persen, pada akhirnya efisiensi sel bahan bakar akan melebihi efisiensi pembangkit listrik konvensional. Keuntungan dari pembangkit sel bahan bakar adalah dapat dibeli dalam jumlah kecil yang dapat dipasang di dekat beban dan dioperasikan secara otomatis. Ini memperkenalkan kemungkinan usaha kecil dan bahkan tempat tinggal yang menghasilkan tenaga mereka sendiri. Menggunakan daya ini sebagai sumber daya pengisian baterai kendaraan listrik pada akhirnya dapat mengurangi polusi udara serta biaya pengoperasian. Pembangkit Listrik Sel Bahan Bakar Perkiraan biaya pembangkit listrik sel bahan bakar berkisar antara Rp 9.000.000 hingga Rp 15.000.000/kW. Eost yang berarti akan tersedia ketika tanaman diproduksi dalam jumlah yang wajar.

Sel bahan bakar yang dikembangkan untuk utilitas publik menggunakan gas alam, metanol, dan produk minyak bumi untuk bahan bakar. Bahan bakar ini biayanya 3 sampai 5 kali lipat dari batubara pada basis energi. Jadi pembangkit uap pembakaran batubara adalah alternatif logis untuk sel bahan bakar. Pembangkit batubara yang hanya 38 persen efisien dapat mengalahkan pembangkit sel bahan bakar yang mengkonsumsi hidrogen yang 50 persen efisien, dari sudut pandang biaya bahan bakar. Keuntungan dari pembangkit sel bahan bakar adalah dapat dibeli dalam jumlah kecil yang dapat dipasang di dekat beban dan dioperasikan secara otomatis. Juga, kehilangan panas di pembangkit batubara umumnya tidak tersedia untuk pelanggan. Bisnis atau tempat tinggal dengan sel bahan bakar pembakaran gas alam 40 kW bisa mendapatkan air panas dari kerugian sel bahan bakar.

### **3.6 SUMBER DAYA PROPULSI SEPEDA YANG HARUS DIPERHATIKAN**

Kekurangan minyak bumi yang akan datang untuk bahan bakar transportasi dunia memotivasi pengembangan kendaraan efisiensi tinggi secara intensif. Misalnya, produksi

minyak bumi di Amerika Serikat telah melewati puncaknya, dan saat ini Amerika Serikat mengimpor lebih dari setengah minyak bumi yang dikonsumsi. Negara-negara lain mengambil langkah-langkah untuk mengurangi konsumsi minyak mereka. Sebagai contoh, pertumbuhan produksi sepeda listrik China telah melewati angka satu juta per tahun. Tenaga penggerak dihasilkan di pembangkit listrik tenaga air Sungai Yangtze 18-GW dan pembangkit listrik tenaga nuklir baru. Sebuah pabrik baru memproduksi sel lithium ion untuk sepeda listrik.

Intensitas pengembangan sumber daya baru untuk penggerak kendaraan digambarkan oleh Prosiding Konferensi Sumber Daya ke-41 setebal 547 halaman yang diadakan pada 14-17 Juni 2004 (18). Penulis 147 makalah teknis menggambarkan hasil dari program penelitian dan pengembangan yang mencari teknologi yang lebih efisien dan praktis untuk memproduksi dan menyimpan energi, terutama dalam mengevaluasi konsep-konsep baru. Misalnya, hidrogen adalah bahan bakar yang dapat diubah secara efisien menjadi tenaga listrik untuk menggerakkan kendaraan. Namun, hidrogen mahal untuk disimpan dan diangkut ke stasiun pengisian bahan bakar dan tidak nyaman untuk dibawa di kendaraan pengguna. Amonia, yang terdiri dari atom hidrogen dan nitrogen, relatif mudah diangkut. Satu makalah menggambarkan program penelitian di mana katalis ditemukan untuk mengekstraksi hidrogen dari amonia secara efisien dan mengirimkannya ke sel bahan bakar. Penemuan ini, jika praktis, dapat merevolusi transportasi kendaraan bermotor.

## **BAB 4**

### **PENGISIAN BATERAI**

Kami menguji baterai timbal-asam untuk menentukan masa pakainya dengan mengosongkannya sepenuhnya dan kemudian mengisinya kembali ke kondisi terisi penuh di setiap siklus pengisian-pengosongan. Pada akhir 50 siklus pengisian-pengosongan, kami memiliki baterai mati. Teknologi pengisian baterai baru yang canggih adalah kunci penggunaan baterai yang efisien dan ekonomis untuk penggerak kendaraan. Pada bagian berikut, kami (1) menghitung untuk setiap baterai profil unik dalam tegangan, arus, dan kedalaman pengosongan yang memberikan masa pakai baterai yang lama dan (2) membahas kontrol pengisian baterai otomatis baru yang memungkinkan masa pakai yang lama.

#### **4.1 SEJARAH TEKNOLOGI PENGISIAN BATERAI**

Gaston Plante menemukan baterai timbal-asam pada tahun 1859. Pada tahun 1900 ada lebih banyak mobil listrik daripada mobil bertenaga mesin di Amerika Serikat. Namun, pemilik segera mengetahui bahwa membeli Ford Model T jauh lebih murah daripada mengganti baterai yang rusak di kendaraan listrik. Kemudian pada tahun 1912 Charles F. Kettering menemukan starter listrik bertenaga baterai timbal-asam untuk mesin mobil. Starter ini didukung oleh baterai timbal-asam. Selanjutnya generator sikat dan komutator pada mobil menggantikan magneto pada mobil. Perancang mobil tidak memahami persyaratan untuk masa pakai baterai yang lama, sehingga bahkan saat ini baterai timbal-asam untuk mobil memiliki jaminan masa pakai sekitar 60 bulan.

Perang Dingin membawa persyaratan untuk kekuatan pascaserangan di silo rudal dan pos komando. Kemudian, setelah analisis serius, dan bahkan dalam pengujian di mana satu baterai timbal-asam meledak, kami mempelajari batas-batas teknologi baterai timbal-asam. Kemudian muncul kebutuhan untuk memberi daya pada satelit yang mengorbit Bumi selama transit yang sering terjadi melalui bayangan Bumi ketika sinar matahari dari susunan sel surya tidak tersedia. Analisis dan pengujian intensif selama bertahun-tahun mengungkapkan bahwa baterai nikel-kadmium dapat bertahan selama bertahun-tahun jika tidak lebih dari 30 persen energi yang disimpan baterai dikonsumsi di setiap gerhana. Biaya peluncuran baterai nikel-kadmium yang besar ini memotivasi pengembangan baterai yang intensif. Baterai nikel-logam hidrida sekarang dapat memberi daya pada satelit Bumi selama beberapa dekade di orbit Bumi.

#### **4.2 FUNGSI DASAR PENGISI DAYA BATERAI**

Untuk memahami persyaratan pengisi daya baterai, kami meninjau karakteristik kinerja baterai yang memerlukan kontrol pengisian daya untuk mencapai masa pakai yang lama. Fungsi dasar dari kontrol pengisian baterai adalah:

- Saat disuplai dengan daya ac umum, baterai sepeda diisi ulang hingga kondisi terisi penuh setelah sepeda listrik digerakkan.
- Lakukan pengisian ulang ini dengan cara yang mempertahankan masa pakai baterai yang dapat digunakan dalam layanan propulsi.



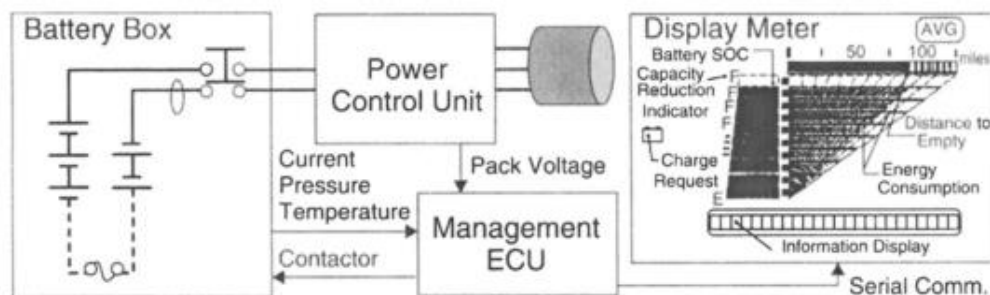
Voltmeter tidak dapat menunjukkan status pengisian baterai yang sebenarnya karena tegangan terminal di sebagian besar baterai bervariasi dengan beban dan suhu baterai. Oleh karena itu, kontrol pengisian daya harus mengintegrasikan aliran arus, selama pengisian dan pengosongan, untuk melacak status pengisian daya baterai untuk menunjukkan status pengosongan. Pengatur muatan yang menggunakan sirkuit terpadu yang dirancang khusus untuk menjalankan fungsi ini telah dikembangkan. Kontroler ini tersedia secara komersial dengan harga yang wajar.

Pengendara sepeda perlu menyadari status pengisian baterai pada sepedanya sehingga ia dapat menghindari baterai habis sepenuhnya, yang mengurangi masa pakai baterai. Misalnya, Honda EV Plus membawa "unit elektronik manajemen" yang menunjukkan kepada pengemudi jarak perjalanan yang tersedia dengan status pengisian baterai (Gbr. 4.1). Ini juga melaporkan faktor "pengurangan kapasitas" yang menunjukkan penuaan baterai. Fungsi tambahan dari pengisian baterai akan melaporkan kepada pengendara sepeda, selama perjalanannya, status pengisian baterai, dan memperingatkan hirn ketika kondisi baterai benar-benar habis mendekati.

### 4.3 KARAKTERISTIK BATERAI YANG BERKAITAN DENGAN PENGISIAN DAYA

Fitur pengisian baterai yang penting adalah:

- Tegangan pengisian selalu lebih tinggi dari tegangan pemakaian pada keadaan pengisian tertentu. Perbedaan tegangan, yang tergantung pada kerapatan arus, mewakili kerugian.



**Gambar 4.1** Honda EV Plus membawa "unit elektronik manajemen" yang menyediakan tampilan jarak perjalanan yang tersedia bagi pengemudi dengan status pengisian baterai, dan data lainnya.

- Masa pakai baterai dalam hal jumlah siklus pengisian-pengosongan umumnya bervariasi menurut kedalaman pengosongan. Debit dalam mempersingkat masa pakai bersepeda.

Perbedaan karakteristik calon baterai untuk penggerak sepeda listrik dirangkum dalam Tabel 4.1. Tegangan terminal jenis baterai apa pun bervariasi dengan arus, selama aktivitas pengisian dan pengosongan. Nilai yang ditampilkan dalam tabel adalah nilai nominal. Tegangan ini pada tingkat arus yang berbeda juga bervariasi dengan suhu dengan cara yang unik untuk setiap jenis baterai. Baterai lithium memiliki masa pakai yang terbatas dalam pengisian/layanan pada saat bagan ini dibuat. Selanjutnya, penyebab masa pakainya yang

terbatas telah ditemukan, dan masa pakai lebih dari 25.000 siklus pengisian-pengosongan telah dibuktikan.

#### 4.4 PENGISIAN BATERAI LEAD-ACID

Sebuah sel baterai kosong ketika pelat negatif dapat mengirimkan elektron melalui konduktor ke pelat positif (katoda). Pelat baterai negatif timbal-asam (anoda), selama pelepasan, menyerap ion sulfat dari elektrolit, membentuk sulfat timbal dan melepaskan ion hidrogen yang melayang ke pelat positif untuk membentuk timbal sulfat dan air. Baterai benar-benar habis jika pelatnya dilapisi dengan timbal sulfat.

**Tabel 4.1** Karakteristik Bau Berkaitan dengan Pengisian Ulang <sup>a</sup>

Battery Type	Nominal Cell Voltage (V)	Nominal Charge Voltage (V)	Deeply Discharged State (V)	Depth of Discharge (%)	Life Cycles	Storage Capacity Loss
Lead-acid	2	2.4	1.5	20	1500	0.27%/day <sup>b</sup>
				80	80	0.174%/day <sup>c</sup>
						0.035%/day <sup>d</sup>
NiCd	1.2	1.4	0.8	20	500	1.56%/day <sup>e</sup>
				20	16500 <sup>h</sup>	
				80	625 <sup>h</sup>	
NiMH	1.2	1.4	0.8	20	500	1.56%/day <sup>e</sup>
				80	6000 <sup>h</sup>	
Lithium	3.4 <sup>g</sup>	4.2	2.5–2.7	20	1000	0.33%/day <sup>f</sup>
Zinc-air	1.2	Not applicable	0 <sup>i</sup>	Na	200	Na

- J. S. Enochs dan rekan-rekannya melaporkan mencapai lebih dari 2000 siklus pengisian-pengosongan dengan kedalaman pengosongan 80% dengan kisi-kisi timbal-kalsium-timah. (Dari J. S. Enochs, Baterai Lead-Acid Nonantimonial untuk Bersepeda Applications, Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS, 1984, hlm. 850-856.)
- Jaringan standar.
- Jaringan antimon rendah.
- Kisi timbal kalsium.
- Self-discharge tertinggi dalam 24 jam pertama, 60/0 untuk NiCd dan 9% NiMH.
- Termasuk 0,1%/hari untuk sirkuit perlindungan diri.
- Pada 50% kapasitas, 3,0 V pada kapasitas 200/0.
- Baterai NiCd aplikasi luar angkasa.
- Ketika seng dikonsumsi, tidak ada tegangan.

Pengisi daya sederhana untuk baterai timbal-asam mudah dirancang dan dibuat. Dia terdiri dari transformator yang mengurangi tegangan suplai daya publik dan penyearah yang mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah pada tegangan pengisian baterai. Pengisi daya murah tersedia di toko-toko yang menjual komputer, suku cadang perbaikan mobil, dan peralatan radio amatir.

Opsi yang tersedia untuk mengisi daya baterai propulsi sepeda timbal-asam menggambarkan berbagai karakteristik yang tersedia dalam teknologi pengisian daya baterai dan bagaimana kemungkinan manfaatnya dapat dievaluasi. Misalnya, baterai dapat diisi ulang dengan penyearah transformator yang dicolokkan ke stopkontak umum ac dan dirancang untuk mengalirkan semua arus yang diperlukan ke baterai untuk mempertahankan tegangan 2,4 V per sel hingga baterai terisi penuh dan tidak menerima arus lebih lanjut. Pada titik ini tegangan sel dipertahankan pada 2,37 V per sel.

Salah satu teknik umum untuk mengisi ulang baterai penyimpanan cukup menghubungkan terminal baterai ke sumber tegangan dc yang memiliki tegangan lebih besar dari tegangan baterai. Perbedaan tegangan ini akan menyebabkan arus pengisian mengalir melalui baterai dan membalikkan reaksi kimia yang terjadi selama pengosongan. Arus pengisian berkurang karena perbedaan tegangan antara tegangan pengisian dan tegangan baterai berkurang. Biasanya, tegangan echarging yang dipilih lebih besar dari tegangan nominal baterai untuk menyebabkan sedikit overcharge pada baterai. Baterai dianggap "diisi ulang" ketika baterai tidak memiliki arus tambahan. Kebanyakan eharger baterai memiliki ammeter, dan pengguna diinstruksikan untuk mematikan eharger ketika arus yang ditunjukkan jatuh ke nol. Teknik pengisian tegangan konstan ini relatif aman karena saat proses pengisian berlangsung, arus pengisian akan berkurang hingga hanya menjadi tiga roda. Pengisi daya tegangan konstan dirancang untuk pemulihan semalam dari baterai yang dilepas ke kondisi terisi penuh.

Alternatif untuk mengisi ulang baterai dengan cepat adalah pengisi daya arus konstan yang memvariasikan tegangan yang diberikan ke terminal baterai untuk mempertahankan arus konstan. Pengisi daya secara otomatis menaikkan tegangannya untuk menjaga arus mengalir konstan. Pengisi daya berisi pengontrol yang memantau arus dan tegangan baterai. Ketika baterai mencapai muatan penuh, pengontrol menghentikan pengisian daya segera. Jika tidak, pengisian yang berlebihan akan merusak baterai secara permanen dan bahkan mungkin mendidihkan elektrokimia baterai. Bert ness [1] menggunakan eurrent bypass eireuit terkontrol dalam sumber arus konstan. Arus pengisian dibagi antara baterai yang sedang diisi dan sirkuit bypass. Baik tegangan baterai dan suhunya digunakan dalam mengendalikan arus bypass.

Metode kontrol pengisian daya lainnya serupa dengan yang dijelaskan untuk baterai berbasis lithium dan nikel. Misalnya bentuk gelombang arus "ehopped" dapat mengubah nilai efektif arus pengisian. Kontrol listrik juga dapat membatasi pengisian ke tingkat "tetesan" rendah jika baterai telah benar-benar habis. Jika tidak, daya tahan baterai yang relatif rendah untuk kondisi baterai ini dapat membebani pengisi daya. Saat baterai diisi, resistansi ini meningkat sehingga arus pengisian penuh dapat diterapkan.

#### **4.5 DESAIN PENGISI DAYA UNTUK MASA PAKAI BATERAI YANG LAMA**

Masalah lain dengan pengisian baterai adalah bahwa suhu baterai biasanya naik selama siklus pengisian. Saat suhu baterai meningkat, reaktivitas kimianya meningkat. Reaktivitas kira-kira dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10°C dalam baterai timbal-asam. Lebih jauh lagi, saat suhu baterai meningkat, resistansi internalnya menurun sehingga baterai

akan menerima arus pengisian yang lebih tinggi pada tegangan pengisian yang diberikan. Bertness [1], menggunakan fungsi:

$$V = 14.32 - 0.024^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

sebagai tegangan yang akan diterapkan pada baterai timbal-asam mobil. Istilah  $^{\circ}\text{C}$  adalah suhu baterai dalam derajat Celcius (sama dengan atau lebih besar dari 0 untuk fungsi tegangan). Fungsi penurunan tegangan digunakan untuk mengurangi arus pengisian konstan bijaksana lainnya dengan meningkatnya suhu baterai. Jenis baterai timbal-asam lainnya dapat diisi dengan fungsi linier yang berbeda dengan mengubah nilai resistor di dalam pengisi daya Bertness. Jika tidak diatur, aliran arus yang meningkat akan menghasilkan pemanasan tambahan di baterai, yang selanjutnya mengurangi resistansi internalnya. Pemanasan baterai ini, yang diikuti dengan peningkatan arus pengisian baterai, dapat mengakibatkan kondisi pelarian yang dapat merusak baterai. Arus searah untuk charger diperoleh dari power conditioner. Pengkondisi daya yang memperbaiki arus sumber terhubung langsung ke catu daya ac publik. Kemudian mengubah daya menjadi frekuensi tinggi (biasanya di urutan 25 kHz) arus berdenyut yang melewati transformator step-down menjadi penyearah yang menghasilkan arus searah untuk mengisi baterai. Pendekatan ini mengurangi ukuran transformator karena mengubah daya frekuensi yang lebih tinggi.

Mengosongkan baterai kurang dari kapasitas penuh selama setiap penggunaan, ditambah kontrol pengisian daya yang canggih, dapat membuat baterai timbal-asam yang dirancang untuk penggerak sepeda memiliki masa pakai bertahun-tahun. Misalnya, baterai yang dibawa dengan sepeda harus jenis yang disegel untuk menghindari kerusakan yang dapat disebabkan oleh kebocoran elektrolit asam sulfat jika sepeda diletakkan miring atau tiba-tiba berakselerasi di jalan bergelombang atau saat bermanuver. Juga, sepeda mungkin dikendarai dalam cuaca dingin. Oleh karena itu, pengisi daya perlu mengenali bahwa baterai dingin dan memodifikasi profil keluaran tegangan-arusnya dengan tepat. Dengan menggunakan teknologi sirkuit terpadu yang tersedia saat ini, pengisi daya yang ringan dapat diprogram untuk membuat baterai memiliki masa pakai yang paling lama.

#### **4.6 PENGISI DAYA CERDAS UNTUK BATERAI NIKEL-KADMIUM, NIKEL-LOGAM HIDRID, DAN BATERAI LITHIUM BARU**

Ada keinginan yang berkembang oleh pengguna untuk mengisi baterai dengan cepat. Namun, baterai tidak bereaksi dengan cepat terhadap pengisian atau pengosongan. Semakin cepat baterai diisi, semakin sedikit energi total yang akan mereka terima sebelum mencapai batas tegangan atau suhu. Melampaui batas ini dapat menyebabkan kerusakan atau mengurangi masa pakai baterai.

Ada tiga rezim waktu untuk pengisian daya baterai: lambat, cepat, dan cepat. Laju lambat umumnya pada laju arus C/10 atau kurang, di mana C adalah nilai baterai dalam ampere-jam. Laju cepat umumnya pada laju arus sekitar C/3 dan laju cepat adalah C/1.5 atau lebih tinggi [2]. Angka ini sesuai dengan rentang waktu 10 jam atau lebih untuk "lambat", sekitar 3 jam untuk "tenang", dan 1 jam atau kurang untuk "cepat". Ada juga mode perawatan saat baterai terhubung ke pengisi daya saat tidak digunakan dalam waktu lama. Sistem

pengisian baterai telah berkisar dari jenis penyearah transformator sederhana hingga sistem kompleks yang memantau dan mengontrol fungsi pengisian daya. Untuk mengisi daya baterai NiCd, NiMH, dan lithium secara andal dan efisien dengan kecepatan tinggi memerlukan kontrol yang cermat dari operasi pengisian untuk menghindari kerusakan pada sel, terutama di bawah kondisi suhu lingkungan yang ekstrim.

### **Masalah 10 Mengatasi**

Salah satu karakteristik dari baterai sidat nikel-kadmium dan nikel-logam hidrida adalah jatuhnya muatan yang diterima selama proses pengisian. Tidak semua arus yang disuplai ke baterai dapat dipulihkan atau digunakan dalam reaksi ehemieal saat baterai diisi. Persentase arus masukan inkremental, atau muatan, yang dapat diperoleh kembali pada titik tertentu dalam siklus pengisian disebut sebagai penerimaan daya baterai. Muatan kumulatif yang diterima oleh baterai menentukan status pengisian baterai dalam hal persentase muatan penuh [3].

Untuk mengisi penuh sel-sel, sebanyak 160 persen kapasitas energi pengenalnya perlu diganti [4]. Energi pengisian ekstra ini dihamburkan sebagai panas. Panas yang ditambahkan dapat meningkatkan suhu belut ke titik kerusakan sel karena ketahanan termal baterai yang relatif tinggi. Umumnya, arus input eharging yang disuplai ke baterai harus dibatasi untuk mencegah kondisi overtemperature. Telah ditunjukkan bahwa pengisian baterai NiMH pada tingkat C/IO yang aman hanya 50 persen dari muatan yang diterima dalam waktu 10 jam [4].

Baterai membutuhkan 16 jam untuk mencapai muatan penuh pada tingkat C/IO. Pengisian arus yang lebih tinggi diperlukan untuk mempersingkat waktu pengisian daya, tetapi arus yang lebih tinggi juga meningkatkan suhu baterai. Untuk alasan ini, suhu baterai terkadang diukur dan digunakan untuk memicu pengurangan arus pengisian. Juga saat suhu baterai naik, penerimaan muatan menurun, seringkali mengakibatkan ketidakmampuan baterai untuk mencapai keadaan terisi penuh.

Faktor paling kritis dalam menentukan arus muatan maksimum yang diizinkan yang dapat dikirimkan dengan aman ke baterai ini adalah suhu dan status pengisian. Pada suhu rendah, tingkat rekombinasi oksigen berkurang secara signifikan. Ini membatasi arus overcharge yang diizinkan yang dapat diterapkan tanpa mengeluarkan sel jika terisi penuh. Pada suhu tinggi, panas yang dilepaskan oleh reaksi rekombinasi oksigen dapat menyebabkan suhu sel yang berlebihan yang menyebabkan kegagalan prematur bahan pemisah pelat dan kemungkinan korsleting berikutnya.

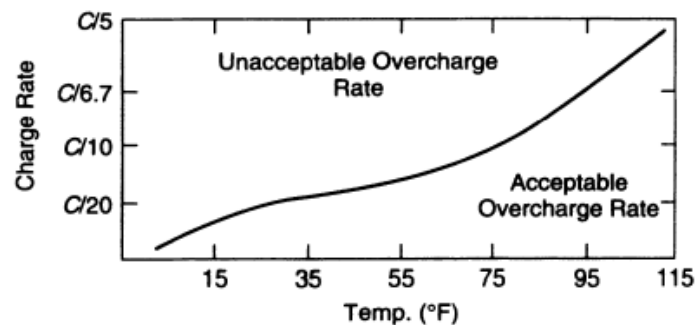
Baterai nikel-metal hidrida, khususnya, memiliki gradien kenaikan suhu yang sangat bervariasi dengan arus pengisian dan kapasitas yang sudah diisi.

Selain itu, baterai nikel-metal hidrida kurang tahan terhadap overcharge dibandingkan baterai nikel-kadmium. Jika diisi secara berlebihan, masa pakai baterai nikel-metal hidrida dipersingkat [5].

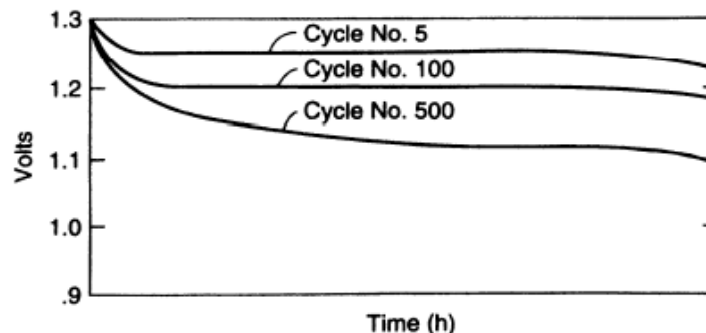
Gambar 4.2 menunjukkan contoh wilayah tingkat pengisian yang dapat diterima dan tidak dapat diterima sebagai fungsi suhu baterai. Jika terjadi pengisian yang berlebihan, arus akan menyebabkan pembentukan gas oksigen dengan hanya sejumlah kecil muatan yang sebenarnya disimpan di dalam sel. Jika laju pengisian terlalu tinggi, laju rekombinasi oksigen yang terjadi di dalam sel mungkin tidak cukup untuk mencegah tekanan internal yang berlebihan dan ventilasi sel, yang secara drastis mengurangi masa pakai sel. Jika baterai benar-

benar habis, pembangkitan oksigen minimal akan terjadi hingga baterai mendekati kondisi terisi penuh. Dan ketika baterai hampir terisi penuh, ia dapat dengan cepat memasuki kondisi pengisian berlebih dan memulai pembangkitan oksigen. Kesulitannya terletak pada penentuan yang akurat dari status pengisian sebelumnya untuk menghindari kerusakan pada baterai.

Pengosongan sel yang dangkal dan berulang-ulang menyebabkan masalah lain dengan sel NiCd. Debit dangkal yang berulang secara progresif mengurangi kapasitas sel. Gambar 4.3 mengilustrasikan hal ini.



**Gambar 4.2** Contoh daerah untuk sel nikel-kadmium dan nikel-logam hidrida dengan tingkat pengisian berlebih yang dapat diterima dalam hal kapasitas baterai sebagai fungsi suhu baterai [7].



**Gambar 4.3** Contoh yang menunjukkan pengurangan kapasitas sel NiCd setelah siklus pengosongan dangkal yang berulang [7].

Baterai berbasis lithium bisa berbahaya jika diisi daya secara berlebihan, berbeda dengan baterai berbasis timbal-asam atau nikel. Baterai timbal-asam yang diisi berlebih akan mengelektrolisis air yang diganti dengan mudah, dan baterai nikel-kadmium atau metal hidrida memiliki voltase yang berhenti naik saat terisi penuh. Namun, voltase sel baterai lithium-polimer terus meningkat bahkan saat diisi daya secara berlebihan, dan sel ion litium berisiko menghasilkan gas berlebih karena pengisian daya yang berlebihan atau pengosongan yang berlebihan. Logam litium bersifat eksplosif dalam air dan akan, dalam berbagai derajat, bereaksi dengan kelembapan di atmosfer. Baterai yang mengandung lithium telah diketahui meledak atau terbakar, meskipun desain keamanan yang lebih baru telah mengurangi kemungkinan terjadinya hal ini. Dalam sel baterai lithium-polimer, di mana ion lithium terkandung dalam polimer padat, tidak ada cairan untuk diuapkan. Pengisian daya yang berlebihan menghabiskan ion litium dari pelat, sehingga memutus sambungan listriknya.

Siklus hidup sel berkurang bahkan jika bencana tidak terjadi. Oleh karena itu, penghindaran tegangan overcharge dan arus overcharge selama pengisian sel berbasis lithium merupakan tujuan penting dalam penggunaan baterai tersebut.

Masalah lainnya adalah persamaan antar sel dalam baterai multisel. Ada banyak penyebab perbedaan antara sel dan, akibatnya, keadaan muatannya. Secara khusus, sel yang lebih besar sedang dikembangkan untuk aplikasi kendaraan listrik tidak konsisten dari sel ke sel seperti sel komoditas yang diproduksi secara massal di komputer laptop [6]. Beberapa sel dapat diisi daya secara berlebihan sementara yang lain kekurangan daya jika baterai diisi tanpa memperhatikan kondisi masing-masing sel. Untuk menghindari kondisi berbahaya ini, sel dapat dipantau secara individual sehingga tidak ada sel yang kelebihan muatan. Ketergantungan kritis pada tegangan untuk sel lithium membuat sel yang terhubung seri lebih sulit untuk ditangani karena tegangan pada setiap sel harus dipantau selama pengisian dan pengosongan. Tindakan diperlukan ketika sel tegangan tertinggi mencapai maksimum atau ketika sel tegangan terendah mencapai minimum. Mengurangi tegangan pengisian pada satu sel lithium hanya dengan 100 mV mengurangi kapasitasnya sebesar 10 persen atau lebih [7].

#### **Solusi Pengisian untuk Baterai Nikel-Kadmium dan Nikel-Metal Hidrida**

Cara pengisian baterai yang murah adalah dengan menggunakan pengisi daya trickle sederhana, yang mengembalikan baterai yang kosong ke pengisian penuh pada kecepatan sekitar  $C/10$  [2]. Pengisi daya ini, yang membutuhkan waktu pengisian setidaknya 10 jam, dapat digunakan untuk mengisi ulang baterai sepeda listrik jika pengguna berhati-hati. Pengisi daya sederhana ini harus dihidupkan dan dimatikan oleh pengguna. Namun, jika pengguna tidak hati-hati, baterai bisa over charge. Salah satu cara pengendaliannya adalah dengan menggunakan pengatur waktu yang mematikan pengisi daya trickle setelah kapasitas baterai yang dikonsumsi selama perjalanan yang digerakkan motor telah diganti.

Kriteria sederhana adalah mengasumsikan baterai digunakan pada beberapa fraksi rata-rata dari kapasitas  $C$  baterai per jam selama perjalanan. Pengguna kemudian akan mengatur timer untuk mematikan pengisi daya setelah waktu yang sama dengan 10 hingga 16 kali waktu perjalanan yang digerakkan motor. Teknik ini mungkin terutama berlaku untuk perjalanan ke tempat kerja. Energi yang dikonsumsi dalam perjalanan pulang pergi dengan motor selama setengah jam hampir dapat dipulihkan dengan pengisian trickle selama 8 jam. Komuter dapat mencolokkan pengisi daya trickle ketika dia tiba di tempat kerja dan mencabutnya di akhir hari kerja.

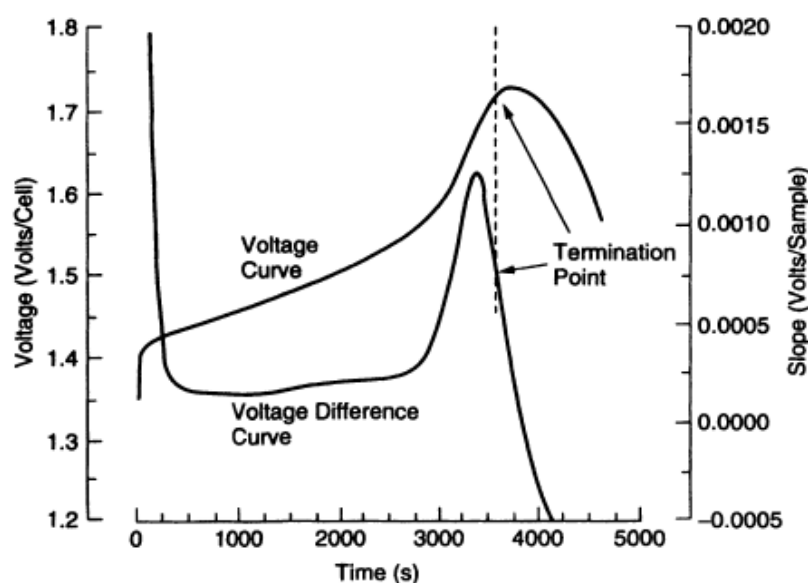
Pengisian baterai sering dicirikan oleh tiga fase: (1) fase pengisian awal di mana penerimaan muatan relatif tinggi, (2) fase pengisian menengah ketika penerimaan muatan menurun, dan (3) fase pengisian akhir. selama penerimaan muatan mendekati 0 persen dan baterai telah mencapai status pengisian penuh. Salah satu jenis rangkaian pengisi daya baterai konvensional menurunkan tingkat arus input yang disuplai ke baterai pada transisi antara fase tersebut, berdasarkan tegangan baterai. Namun, bahkan dengan pemilihan arus input yang cermat, teknik ini hanya dapat memberikan pengisian cepat yang konsisten dengan suhu baterai yang aman selama sebagian fase pengisian. Ini karena penerimaan muatan bervariasi terus menerus selama pengisian baterai. Dengan demikian, tingkat arus input yang konstan, tidak peduli seberapa hati-hati dipilih, tidak akan optimal di seluruh operasi pengisian daya [3].

Mendeteksi penyelesaian pengisian daya biasanya didasarkan pada pengukuran laboratorium dari karakteristik pengisian daya baterai dan suhu. Nilai-nilai ini kemudian digunakan dalam algoritme pengisian baterai yang disimpan dalam elektronik kontrol pengisi daya. Algoritma bervariasi di antara produsen dari yang sederhana hingga yang kompleks. Namun, dengan metode ini, jika jumlah sel baterai dalam kemasan baterai bertambah, sel baterai yang ditempatkan di bagian ujung kemasan baterai cenderung lebih dingin daripada sel di tengah.

Hasilnya adalah penyelesaian pengisian daya tidak dapat dideteksi berdasarkan satu suhu baterai saja. Selanjutnya, jika suhu sel dalam kemasan baterai menjadi semakin berbeda, masa pakai sel suhu yang lebih tinggi dipersingkat. Juga sel suhu yang lebih tinggi lebih sulit untuk diisi. Karena ini, kapasitas menjadi tidak seimbang di antara sel-sel, dan itu mungkin terjadi, misalnya, bahwa ada sel yang terisi 100 persen dan yang lain hingga 90 persen. Oleh karena itu, jika kapasitas paket baterai digunakan hingga 90 persen, beberapa sel akan memiliki kapasitas sisa 10 persen dan yang lainnya 0 persen. Sel-sel yang memiliki kapasitas sisa 0 persen dapat diisi ulang oleh sel-sel dengan kapasitas sisa 10 persen, dan masa pakai baterai akan dipersingkat.

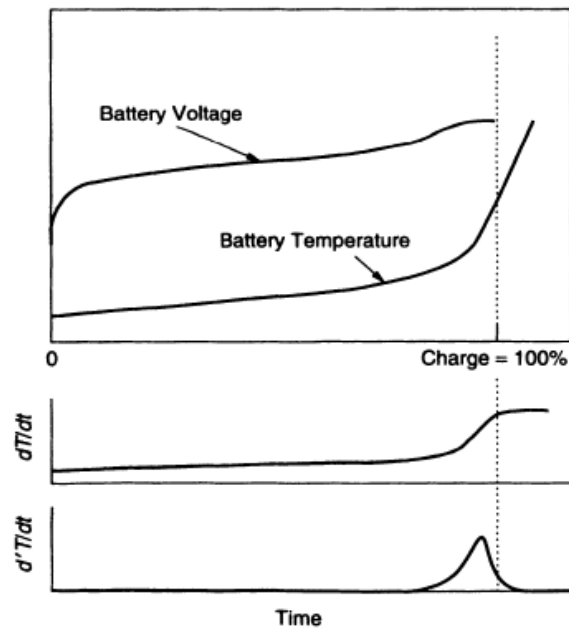
Pengisian Melalui Deteksi Vo/tage Berbagai metode telah diusulkan untuk mendeteksi kondisi baterai yang terisi penuh. Salah satunya adalah untuk sample tegangan baterai. Ketika tegangan puncak yang muncul pada periode penghentian pengisian terdeteksi, baterai dianggap telah mencapai kondisi terisi penuh. Prosedur ini, yang disebut metode deteksi vo/tage puncak, ditunjukkan pada Gambar 4.4. Metode lain adalah mendeteksi suhu baterai dan menghitung laju kenaikan suhu.

Ini disebut gradien kenaikan suhu. Ketika gradien kenaikan suhu telah melebihi nilai yang ditentukan sebelumnya, baterai dianggap terisi penuh. Metode ini disebut sebagai metode deteksi  $dT/dt$  (Gambar. 4.5) [5].



**Gambar 4.4** Ilustrasi deteksi perubahan tegangan baterai yang digunakan untuk pemutusan muatan. Kurva "perbedaan tegangan" adalah turunan pertama dari kurva tegangan. Ada sedikit waktu tunda dalam kurva derivatif. (Setelah George E Sage, Pengisi Daya Baterai Pulse-Charge, V.S. Patent 5.633.574, 27 Mei 1997.)





**Gambar 4.5** Ilustrasi tegangan baterai dan kenaikan suhu selama pengisian, perubahan suhu terhadap waktu ( $dT/dt$ ) dan perubahan  $dT/dt$ . Titik muatan 100 persen ditunjukkan [5].

Metode deteksi tegangan puncak, alternatif yang berpotensi murah, tidak cocok untuk baterai yang menunjukkan karakteristik pengisian daya baterai tanpa tegangan puncak yang jelas [5], seperti baterai lithium. Mengisi daya baterai NiMH dan NiCd dengan sumber tegangan yang disetel terlalu tinggi akan menghasilkan arus yang besar yang akan membebani baterai, merusak, dan mungkin menghancurkan baterai. Selain itu, sel NiMH dan NiCd memiliki koefisien temperatur tegangan negatif. Dalam harga terlalu mahal baterai memanas dan voltasenya berkurang, membuat masalah semakin sulit ditangani. Namun, baterai mobil timbal-asam, NiCd berventilasi, dan baterai serupa yang digunakan dalam aplikasi industri, karena karakteristiknya yang berbeda, cukup cocok untuk penginderaan tegangan [8].

Kontrol faktor tugas dan frekuensi pulsa pengisian, yang pada dasarnya mengubah energi pengisian, dapat dicapai dalam tiga tahap pengisian: (1) pengisian cepat, (2) pengisian lancip, dan (3) pengisian triekle, dapat dilakukan digunakan untuk memecahkan masalah yang terkait dengan penginderaan tegangan puncak [6]. Tahap pengisian cepat membawa tegangan baterai ke nilai yang telah ditentukan sebelumnya. Kemudian mati dan tetap mati sampai tegangan baterai turun ke nilai lain yang telah ditentukan sebelumnya pada titik mana ia menyala lagi. Proses berlanjut. Setiap kali baterai terakumulasi biaya, faktor tugas dari berdenyut secara alami berkurang.

Pengisian Melalui Kontrol Suhu Meskipun metode deteksi  $dT/dt$  diklaim lebih unggul daripada metode tegangan puncak, metode itu sendiri mungkin gagal mendeteksi kondisi baterai yang terisi penuh [5]. Dalam metode deteksi  $dT/dt$ , gradien kenaikan suhu dibandingkan dengan nilai kritis tetap. Dengan demikian, deteksi kondisi baterai yang terisi penuh dibuat berdasarkan, antara lain, hanya pada gradien kenaikan suhu. Faktor lain, seperti jenis baterai yang akan diisi, kondisi baterai, suhu baterai saat pengisian dimulai, arus pengisian, atau suhu sekitar, adalah tidak dipertimbangkan untuk menentukan kondisi terisi penuh. Faktor-faktor yang tidak dipertimbangkan tersebut dapat meningkatkan gradien

kenaikan suhu baterai lebih dari nilai yang dipilih sebelumnya, meskipun faktanya baterai belum mencapai kondisi terisi penuh. Dalam kasus seperti itu, pengisian daya dihentikan sebelum baterai terisi penuh, sehingga baterai kurang terisi. Di sisi lain, gradien kenaikan suhu baterai mungkin tidak meningkat lebih dari nilai kritis tetap, meskipun faktanya baterai telah mencapai kondisi terisi penuh. Dalam hal ini, baterai terisi penuh karena pengisian daya tidak akan berhenti meskipun baterai terisi penuh.

Pengisian daya yang berlebihan dapat menyebabkan elektrolisis elektrolit baterai. Tekanan gas yang dihasilkan dapat memaksa elektrolit bocor keluar dari baterai. Ini mempersingkat masa pakai baterai. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan lebih banyak parameter baterai, beberapa di antaranya dapat diperoleh dari pengukuran laboratorium dan data vendor. Parameter ini disimpan dalam elektronik kontrol baterai dan dalam algoritme yang digunakan oleh elektronik pengisi daya. Persamaan digunakan yang mencakup integral keadaan pengisian, kapasitas pengisian terukur sel baterai, kapasitas sel terukur aktual, karakteristik suhu yang direkam selama pengujian laboratorium, variabel suhu yang ditentukan secara empiris, ditambah suhu sel, arus, dan tegangan selama operasi pengisian. Algoritma pengisian [3] memiliki enam status berikut:

1. Keadaan menganggur. Ini terjadi baik saat pengisi daya dihidupkan, sebagai respons terhadap perintah "mulai", atau berpotensi terjadi di waktu lain selama siklus pengisian daya sebagai respons terhadap pengukuran kondisi baterai yang menunjukkan bahwa baterai tidak cocok untuk pengisian lebih lanjut.
2. Status pengisian awal. Ini terjadi jika baterai berada dalam batas aman untuk menerima arus pengisian yang tinggi.
3. Status pengisian arus tinggi. Ini adalah fase pengisian awal ketika penerimaan muatan baterai relatif tinggi. Status ini berakhir ketika muatan input kumulatif ke baterai telah mencapai sekitar 90 persen dari kapasitas penyimpanan terukurnya.
4. Keadaan suhu tinggi. Ini terjadi selama bagian pertama dari fase pengisian menengah, ketika suhu baterai dipertahankan pada sekitar 40°C.
5. Setelah itu, keadaan suhu rendah dimasukkan. Selama bagian kedua dari fase pengisian antara, suhu baterai dipertahankan pada kira-kira 33,5°C.
6. Terakhir, baterai memasuki kondisi pemeliharaan di mana ia dipertahankan dalam kondisi pengisian penuh.

Suhu lingkungan, serta suhu sel dapat digunakan untuk mengontrol pengisian. Perbedaan antara suhu lingkungan dan suhu baterai digunakan dalam algoritma pengisian untuk memilih antara mode pengisian cepat dan mode pengkondisian baterai [9]. Selama pemilihan suhu baterai disesuaikan relatif terhadap suhu lingkungan. Data ini digunakan untuk mengatur arus pengisian. Sebuah resistor dan sensor suhu terkait di dalam echarger baterai untuk memantau dan mengendalikan suhu baterai kadang-kadang digunakan [10]. Konsep ini menghilangkan kabel penginderaan. Suhu resistor dikalibrasi sebelum penggunaan pengisi daya dengan suhu baterai aktual untuk berbagai nilai arus pengisian. Namun, mungkin sulit untuk menerapkan teknik ini untuk pengisian arus tinggi.

Sebuah metode untuk mengontrol kenaikan suhu baterai agar tetap dalam fungsi polinomial tertentu berdasarkan jenis baterai dapat digunakan untuk mengisi baterai dengan cepat [11]. Fungsi suhu bisa linier, dibulatkan ke atas, dibulatkan ke bawah selama kenaikan

suhu, atau fungsi peningkatan melengkung ganda. Dengan teknik ini seseorang dapat memperoleh pengisian baterai yang lebih baik dan lebih aman. Baterai dapat diisi dalam waktu 10 hingga 20 menit menggunakan metode ini.

Pengisian dengan Cara Mengisi dan Mengosongkan Pulsa Dimungkinkan untuk meningkatkan pengisian sel nikel-kadmium dengan pulsa pelepasan sel selama proses pengisian [12]. Teknik ini cocok untuk mengisi ulang sel alkalin seng-mangan dioksida ( $ZnMnO_2$ ) primer, serta sel mangan alkali yang dapat diisi ulang, sel nikel-kadmium, dan "sel kering" standar dan tugas berat konvensional sejauh dapat diisi ulang.

Tekniknya menggunakan pulsa pengisian dc dengan durasi 1 sampai 8 ms. Itu diturunkan dari daya utilitas ac normal. Pulsa arus memiliki nilai rata-rata yaitu dari sekitar 9 sampai sekitar 20 persen dari kapasitas arus awal sel dan tidak melebihi 40 persen dari nilai pengenal pabrikan.

Pengisi daya menggunakan tegangan referensi untuk setiap jenis baterai. Tegangan referensi  $V_{be}$  sama dengan atau kurang dari 1,7 V untuk sel mangan alkali. Ketika proses digunakan dengan baterai timbal-asam, batas tegangan referensi adalah 2,45 V per sel. Ketika proses digunakan dengan sel nikel-kadmium, batas tegangan referensi adalah 1,42 V per sel, yang dalam hal ini mewakili tegangan transisi antara arus terbatas dan pengisian arus konstan. Secara umum, tegangan referensi tidak boleh melebihi tegangan aman jangka panjang dari sel mana pun.

Pulsa arus searah secara berkala ditarik dari sel. Durasi pulsa ini berkisar dari 5 sampai sekitar 35 persen dari durasi pulsa pengisian dc. Mereka juga memiliki nilai arus selama pelepasan 10 hingga sekitar 25 persen dari nilai arus rata-rata yang tersedia dari pulsa pengisian. Secara umum, pulsa pelepasan mewakili kehilangan dari sekitar 3 sampai sekitar 8 persen energi pengisi daya yang tersedia. Selain itu, eharger ini secara berkala mengakhiri proses eharging dan memberikan pelepasan arus terus menerus dari sel untuk jangka waktu yang relatif lama. Durasi pulsa pelepasan "terus-menerus" akan setidaknya 1,0 detik. Arus yang ditarik selama pengisian pulsa panjang umumnya dari sekitar 10 sampai 25 persen dari arus rata-rata yang tersedia dari pulsa yang muncul.

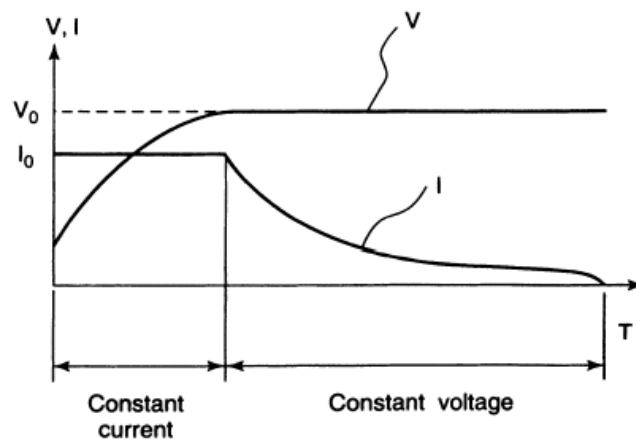
Ini adalah contoh waktu dan rasio untuk pengisian dan pelepasan. Kimia baterai spesifik memvariasikan waktu dan rasio. Sebagai perbandingan, dengan baterai timbal-asam, durasi pulsa panjang adalah dari sekitar 15 hingga sekitar 30 detik, dan waktu antara pulsa panjang adalah dari sekitar 1,5 hingga sekitar 5,0 menit. Teknik ini terutama berlaku untuk baterai nikel-kadmium yang menderita "efek kegembiraan".

### **Solusi Pengisian untuk Baterai Lithium**

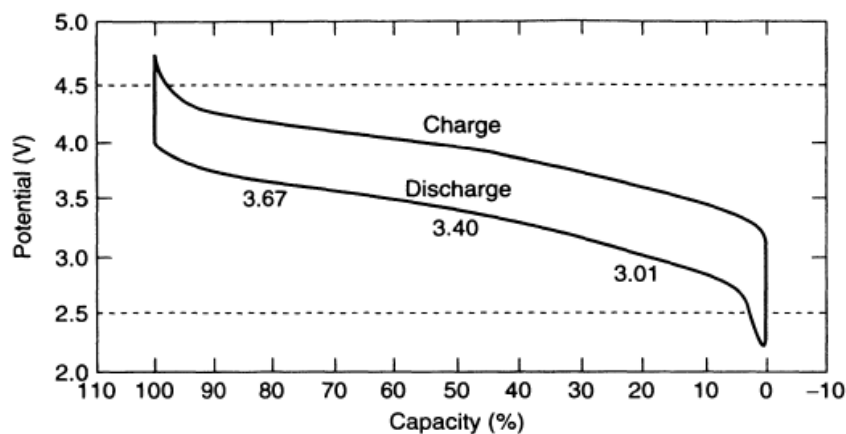
Pengisian Dua Langkah Operasi pengisian pertama-tama untuk memasok arus pengisian sampai tegangan sel tertentu tercapai. Selanjutnya, tegangan sel dipertahankan konstan pada nilai yang telah ditentukan sebelumnya sampai arus yang muncul menurun ke nilai tertentu, sekitar  $I_0$  hingga  $10I_0$  dari nilai pengisian arus yang konstan. Gambar 4.6 menunjukkan perubahan parameter belut selama pengisian sel.  $I_0$  adalah nilai arus konstan dan  $V_0$  adalah tegangan ambang batas cutoff pabrikan. Tegangan akurasi nilai biasanya diperlukan 1 sampai 2 persen [13]. Kimia dari beberapa sel umum dapat mengurangi tegangan pengisian ini menjadi  $4,1 V \pm 50 mV$  dan  $4,2 V \pm 50 mV$  [14]. Baterai enam atau sembilan sel untuk sistem sepeda listrik 24- atau 36-V, masing-masing, akan memerlukan pengisi daya

baterai yang mampu memasok tegangan pengisian sebanyak 6 atau 9 kali kemungkinan penyebaran tegangan 100 mV. Itu berarti sekitar perbedaan 0,5 hingga 1,0 V. Kegagalan untuk menyesuaikan perbedaan ini dapat menyebabkan baterai rusak.

Selama pelepasan, potensial cutoff yang lebih rendah dari 2,5 V atau lebih untuk menghindari kerusakan pada sel, Gambar 4.7 menunjukkan rincian potensial sel sebagai fungsi status pengisian selama pengisian. Dengan mengisi daya potensial 4,2-V sel ini diperoleh ketika sekitar 80 persen dari kapasitasnya telah dipulihkan, dan kapasitas yang tersisa dipulihkan selama pengisian tegangan konstan berikutnya. Data uji dari berbagai teknologi sel ion litium menunjukkan bahwa 4,2 V dicapai pada kapasitas antara 40 dan 70 persen. Variasi ini merupakan fungsi dari nilai arus konstan selama pengisian [15]. Menggandakan arus selama fase pengisian arus konstan mengurangi waktu pengisian kurang dari 30 persen [16].



**Gambar 4.6** Arus konstan, pengisian tegangan konstan sel lithium.

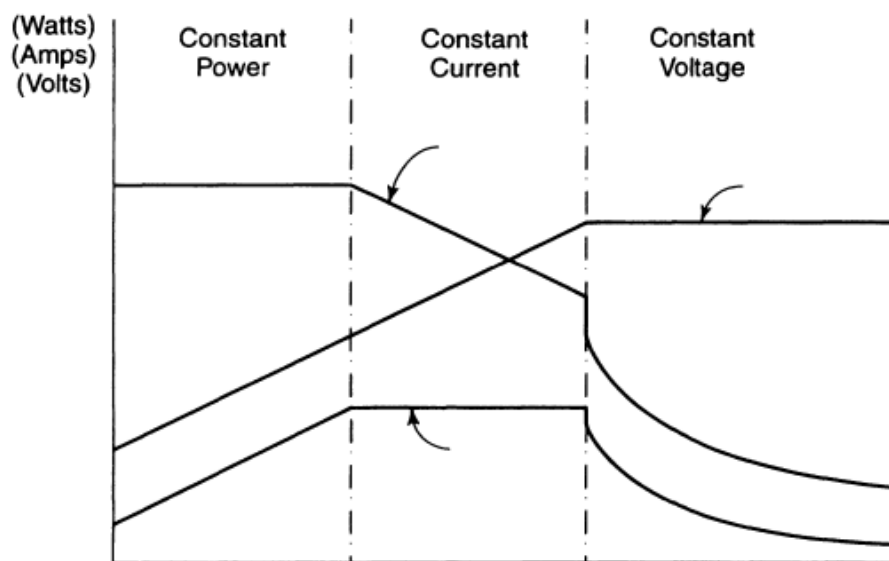


**Gambar 4.7** Potensial sel vs. keadaan muatan. (Dari Lauren V. Merritt dkk., Metode dan Alat Pengisi Daya Baterai Lithium Polymer, V.S. Patent 5.773.959, 30 Juni 1998.)

Pengisian Tiga Langkah Pengisi daya baterai konvensional yang menggunakan proses pengisian dua langkah dapat menyebabkan masalah jika baterai lithium habis dayanya terlalu dalam. Pengisi daya baterai tipikal berisi komponen kontrol muatan yang mengubah impedansi terkontrol yang seri dengan baterai untuk mengontrol pengisian baterai. Impedansi yang dikontrol dapat menghilangkan sejumlah daya yang berlebihan selama tahap awal pengisian arus konstan, tergantung pada status pelepasan baterai. Baterai yang kosong

memiliki tegangan terminal yang relatif rendah dibandingkan dengan baterai yang terisi penuh. Oleh karena itu, selama tahap awal pengisian arus konstan, tegangan yang lebih tinggi terkesan melintasi impedansi yang dikendalikan, menghasilkan peningkatan disipasi. Disipasi yang meningkat menyebabkan berkurangnya keandalan dan kemungkinan kegagalan impedansi terkontrol.

Masalah ini dihindari dengan mengontrol arus pengisian selama operasi pengisian awal sehingga daya yang hilang dalam rangkaian pengisian tetap konstan [16]. Setelah itu tegangan pengisian dijaga konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Kurva daya yang ditampilkan adalah untuk daya yang hilang di dalam pengisi daya dan bukan di dalam baterai. Daya yang dihaburkan dan diserap oleh baterai adalah produk dari arus dan tegangan baterai yang ditunjukkan untuk tiga tahap pengisian.



**Gambar 4.8** Daya konstan, arus konstan, pengisian tegangan konstan sel lithium [16].

Masalah tambahan muncul jika arus konstan ditahan pada nilai yang lebih besar dari laju sel 1C. Salah satunya adalah bahwa lithium logam akan dilapisi ke elektroda daripada teradsorpsi di elektroda. Hal ini secara permanen dapat mengurangi kapasitas sel [17]. Dalam upaya untuk mempersingkat waktu pengisian, beberapa pengisi daya sedang dirancang untuk meningkatkan tegangan pengisian untuk memaksa arus pengisian yang lebih tinggi selama fase triekle-down arus pengisian. Hal ini menyebabkan pembubaran elektrolit, pelapisan logam lithium, dan akibatnya memperpendek masa pakai baterai. Masa pakai baterai dikurangi, umumnya sekitar 300 siklus, dan waktu pengisian hanya dikurangi menjadi 3 hingga 4 jam [17].

Pengisian dengan Pulsa dan Periode Istirahat Efek negatif yang dibahas dapat dikurangi dengan menggunakan urutan pulsa yang dipisahkan oleh periode istirahat, dan keduanya mengisi dan mengeluarkan sel [17]. Efek keseluruhannya adalah mengurangi waktu pengisian. Empat urutan dapat digunakan: Yang pertama adalah fase pengisian yang menggunakan tiga hingga lima pulsa pengisian dalam waktu sekitar 25 ms, dipisahkan oleh periode istirahat. Yang kedua adalah fase "penghapusan" dari pulsa pengisian dan pengosongan yang berubah-ubah. Yang ketiga adalah fase "penghapusan" lain yang menggunakan pulsa pelepasan berkekuatan besar diikuti dengan periode istirahat. Yang keempat adalah fase "pengukuran" di mana

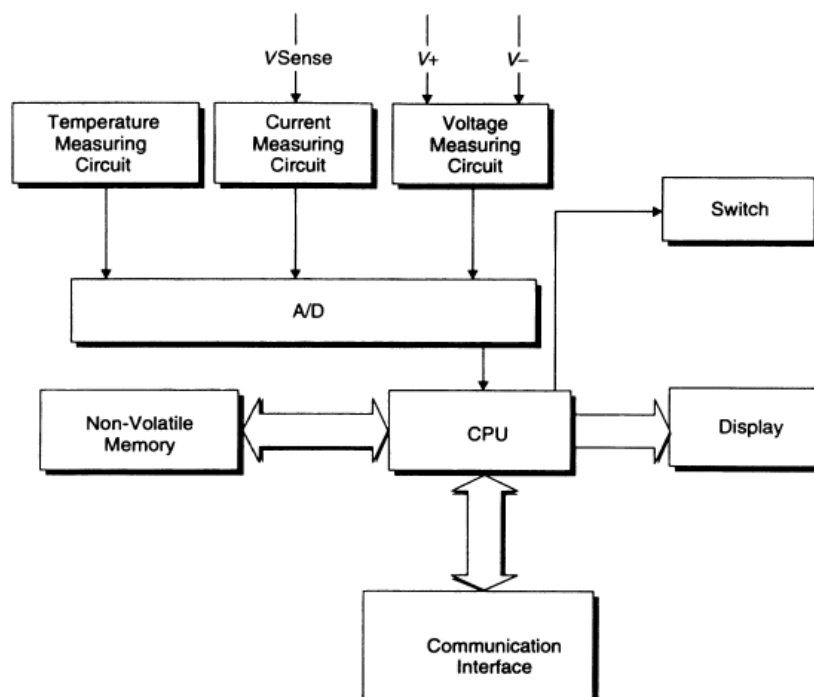
tegangan sel, impedansi, dan suhu ditentukan. Nilai yang diukur kemudian digunakan untuk mengubah parameter dan penerapan urutan yang digunakan untuk siklus pengisian berikutnya.

Metode ini mengurangi penumpukan litium resistif logam pada elektroda positif, meminimalkan pembentukan dendritik yang menyebabkan korsleting, dan meminimalkan dekomposisi elektrolit. Teknik ini berlaku untuk baterai timbal-asam dan nikel-hidrida serta baterai lithium.

#### 4.7 BATERAI CERDAS UNTUK PENGISI DAYA CERDAS

Persyaratan pengisian yang ketat untuk baterai lithium dan juga baterai nikel-metal hidrida menciptakan kebutuhan akan apa yang disebut baterai pintar. Baterai pintar adalah baterai atau sel yang berisi elektronik yang mampu melaporkan karakteristik historis baterai atau sel tersebut saat ini dan secara opsional. Tidak ada daftar standar karakteristik yang akan dilaporkan atau metode implementasi. Akibatnya, desain baterai pintar bervariasi di antara produsen dan aplikasi baterainya [7, 18]. Karena kimia sel lithium dapat bervariasi, orang ingin memiliki tegangan pemutusan muatan ambang batas pabrikan untuk sel yang akan dilaporkan ke pengisi daya baterai.

Kelemahan lain dari teknik pengisian baterai saat ini adalah bahwa tidak ada indikasi akurat yang diberikan tentang berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengisi penuh baterai dari kondisi pengisian saat ini. Misalnya, baterai yang setengah habis dapat dikembalikan ke kapasitas penuh lebih cepat daripada baterai yang kosong sepenuhnya. Untuk aplikasi propulsi, jenis pelaporan status pengisian baterai "pengukur gas" sangat berguna. Menampilkan jumlah siklus pengisian-pengosongan yang terakumulasi akan memungkinkan pemilik sepeda memperkirakan sisa masa pakai baterai. Pemilik baterai yang terdiri dari sel-sel mahal perlu mengetahui kapan satu sel perlu diganti sebelum menyebabkan kegagalan total baterai.



**Gambar 4.9** Diagram blok sirkuit mikro elektronik baterai pintar [21J].

Pengisi daya baterai saat ini tidak mampu disesuaikan untuk memenuhi perubahan kebutuhan pengisian karena kimia baterai dan desain sel berubah seiring waktu. Baterai pintar dapat memprediksi apakah baterai dapat mengirimkan sejumlah daya tambahan yang diminta, berdasarkan kapasitas spesifik baterai, pengosongan sendiri, dan karakteristik pengosongan [19]. Gambar 4.9 menunjukkan diagram blok sirkuit yang ditempatkan dalam baterai. Diagram blok ini secara umum dapat menjadi karakteristik dan berlaku untuk banyak baterai pintar tetapi tanpa tampilan.

Beberapa baterai pintar hanya akan berisi memori hanya-baca yang tidak mudah menguap. Memori nonvolatile menyimpan karakteristik khusus baterai, yang merupakan fungsi dari kondisi lingkungan baterai dan arus baterai. Menanggapi permintaan, baterai pintar menentukan apakah daya tambahan yang diminta dapat diberikan atau tidak, berdasarkan kapasitas baterai saat ini, tingkat pengosongan baterai saat ini, kondisi lingkungan baterai, dan karakteristik baterai.

Dimungkinkan untuk membuat baterai pintar bahkan mengontrol pengisiannya sendiri [20]. Selain itu, ia terus-menerus memantau tegangan baterai, suhu, tingkat pengisian-pengosongan saat ini, dan kapasitas baterai yang tersisa. Sistem baterai pintar ini mampu diisi dari suplai tegangan sederhana. Semua aspek kontrol dan pemantauan tingkat pengisian-pengosongan dilakukan oleh sistem baterai pintar, bukan di sirkuit pengisian eksternal. Ini menghilangkan kebutuhan untuk sistem eksternal yang mencakup sirkuit dan elemen kontrol tersebut.

Desain baterai pintar dapat mempertahankan informasi untuk menunjukkan kapan baterai pintar memerlukan perawatan [22]. Sistem pemeliharaan dan pengujian baterai dapat membaca kebutuhan pemeliharaan ini dari baterai pintar dan kemudian melanjutkan untuk memelihara baterai pintar. Kondisi yang menunjukkan bahwa baterai rusak atau telah melampaui masa pakainya juga dicatat oleh baterai pintar dan ditampilkan pada layar atau dikirimkan ke perangkat lain melalui bus komunikasi.

Baterai pintar dapat dibuat berisi pembaca strip magnetik, pembaca kartu sirkuit terpadu (K'), dan pembaca kartu Personal Computer Memory Card International Association (PCMCIA). Akhirnya, mikrokontroler menghubungkan telepon seluler dengan perangkat membaca. Perangkat remote control universal, seperti yang digunakan untuk mengontrol televisi normal atau perekam sistem hiburan horne, dapat dihubungkan ke mikrokontroler. Ini memungkinkan penggunaan keyboard telepon seluler untuk mengontrol pengoperasian perangkat kendali jarak jauh universal. Selanjutnya, microcontroller akan mampu mentransmisikan informasi ke prosesor pusat jarak jauh melalui telepon seluler.

#### **4.8 TINGKAT SELF-DISCHARGE SEL NIKEL DAN LITHIUM**

Seringkali penting untuk memberikan informasi yang akurat tentang kapasitas baterai yang tersisa. Beberapa baterai memiliki "pengukur bahan bakar" yang menunjukkan tingkat pengisian baterai. Salah satu contoh adalah baterai isi ulang yang berisi pengukur bahan bakar internal yang mengukur arus pelepasannya dan memperkirakan pengosongan sendiri untuk memprediksi kapasitas baterai yang tersisa [24]. Ini sesuai dengan pengukur bahan bakar yang melaporkan isi "tangki bahan bakar".

Self-discharge mengacu pada hilangnya kapasitas baterai yang terjadi bahkan ketika baterai tidak memberikan arus pelepasan ke beban. Di Dunstan [25] baterai NiMH yang terisi penuh diperkirakan akan lepas sendiri pada kecepatan sekitar 6 persen dalam 6 jam pertama, dan baterai NiCd diperkirakan akan mengosongkan sendiri pada kecepatan 3 persen dalam 6 jam pertama. Kedua baterai diperkirakan lepas-lepas pada kecepatan sekitar 1,5 persen pada periode 6 jam kedua, sekitar 0,78 persen pada periode 6 jam ketiga dan keempat, dan sekitar 0,39 persen pada periode 6 jam berikutnya. Untuk baterai yang habis sebagian, pengosongan otomatis diperkirakan sekitar 0,39 persen untuk periode 6 jam ea eh. Dari data ini disimpulkan bahwa setelah hari pertama sel NiMH akan kehilangan sekitar 9 persen muatannya, dan belut NiCd akan kehilangan 6 persen muatannya. Setelah 60 hari, setiap baterai akan benar-benar habis.

Tingkat self-discharge untuk sel nikel-hidrogen telah dilaporkan 8 persen per hari untuk baterai yang dimulai dengan 90 persen status pengisian. Demikian pula, sel nikel-kadmium memiliki tingkat self-discharge 2 persen per hari. Tarif ini berlaku untuk suhu 10°C. Saat sel-sel melepaskan, laju pelepasan diri melambat. Zimmerman [26] menunjukkan tingkat self-discharge untuk berbagai kapasitas sel lithium ion. Tarif rata-rata yang diterapkan pada sel mulai dari tegangan sel di kisaran 3,8 hingga 4,2 V. Ini adalah tegangan sel yang telah berdiri di rak selama 185 hari. Data untuk berbagai baterai yang dibahas ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Kita dapat menggeneralisasi bahwa tingkat pelepasan diri sel lithium mengikuti fungsi:

$$S = C^{0.5} / 60,000 \quad (4.2)$$

di mana S adalah rata-rata pelepasan diri, dinyatakan sebagai fraksi eapacity sel per hari, C adalah kapasitas sel, dalam ampere-jam. Konstanta 60.000 ditentukan untuk kisaran kapasitas sel dari 1,24 hingga 40 Ah. Disimpulkan bahwa selama periode 60 hari sel lithium yang terisi penuh akan kehilangan 0,2 persen energi yang tersimpan.

### **Penerapan Pengukur Bahan Bakar Komersial 10 Sepeda Listrik**

Pendekatan pengukur bahan bakar komersial untuk memprediksi kapasitas baterai tidak memperhitungkan ketergantungan self-discharge atau kapasitas baterai pada kondisi lingkungan, seperti suhu baterai. Dalam situasi tertentu, metode [25] untuk memperkirakan self-discharge dapat menghasilkan kesalahan yang tidak dapat diterima dalam pengukur bahan bakar yang menunjukkan kapasitas yang tersisa. Dalam kondisi suhu tinggi, self-discharge bisa jauh lebih besar dari nilai yang diperkirakan. Misalnya, satu skenario dapat mencakup camcorder video dan baterai yang disimpan di dalam mobil selama serangkaian hari yang panas dan cerah. Ini akan menyebabkan pengukur bahan bakar baterai secara keliru menunjukkan daya baterai yang lebih dari cukup untuk merekam upacara pernikahan 20 menit. Skenario diakhiri dengan seorang ayah yang marah yang camcorder mati setelah 10 menit upacara, dan dia tidak memiliki baterai cadangan. Pengukur bahan bakar yang dijelaskan di atas digunakan untuk menunjukkan kapasitas baterai dan menampilkan alann ketika kandungan energi baterai mendekati habis.

Namun, untuk digunakan pada sepeda listrik, pengukur bahan bakar yang tersedia saat ini memiliki kesulitan sebagai berikut: Pertama, tingkat debit yang disajikan tidak cukup mencerminkan tingkat debit dinamis yang dihasilkan sepeda listrik. Kedua, kapasitas baterai



yang disediakan oleh pengukur bahan bakar tidak akurat karena ketergantungan self-discharge pada faktor lingkungan, seperti suhu, kelembaban, dan tekanan udara, yang tidak dipertimbangkan. Ketiga, nilai alann tetap. Ini menghilangkan fleksibilitas dari sistem manajemen daya untuk menyesuaikan nilai alann dengan berbagai kondisi daya dalam sistem.

#### 4.9 ENERGI YANG DAPAT DIPULIHKAN

Kami sering mendengar pertanyaan "Ketika turun hili apakah sistem Anda mengisi ulang baterai Anda?" Atau "Apakah sepeda Anda memiliki pengisian regeneratif?" Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, model analitik komputer digunakan untuk memprediksi kapan ada kelebihan energi yang tersedia dari motor. Beberapa sudut pandang diambil untuk menemukan jawabannya. Yang pertama adalah memastikan nilai hili tertentu, kondisi angin depan, dan kondisi sepeda.

**Tabel 4.2** Contoh Perhitungan Pengisian Regeneratif Eleetrie Rieyele

Grade (%)	Head Wind (km/h)	Maximum Speed <sup>a</sup> (km/h)	Maximum Power (W) Recoverable	Speed at Max. Regenerative Power (km/h)	Recoverable Energy <sup>b</sup> per km (Wh)
-3	0	37	122	21	5.8
-3	10	27	72	15	4.8
-6	0	55	407	32	12.7
-6	10	46	294	26	11.3
-9	0	68	789	40	19.7
-9	10	59	611	34	18
-12	0	80	1246	47	26.5
-12	10	71	1003	40	25.1

Daya yang tersedia dari motor setelah memperhitungkan hambatan udara dan hambatan gelinding ditentukan. Sudut pandang kedua adalah untuk menentukan secara analitis, dalam model yang sama, energi yang dapat diperoleh kembali untuk rute perjalanan yang sebenarnya. Rute Seattle-ke-Portland sejauh 200 mil (322 km), yang dinaiki pengendara sepeda lokal dalam acara tahunan, digunakan dalam analisis. Kita juga dapat menggunakan bagian di Bab 2 tentang akselerasi untuk membantu menjawab pertanyaan tentang pengereman regeneratif. Setiap sudut pandang mengarah pada jawaban yang dapat membantu memutuskan betapa pentingnya mengisi ulang baterai dengan energi kinetik dan potensial sepeda.

Beberapa hasil yang diperoleh untuk sudut pandang pertama, di mana kemiringan tertentu, kondisi head-wind, dan kondisi sepeda yang diasumsikan ditunjukkan pada Tabel 4.2. Tabel ini menunjukkan tiga hal yang menarik: (1) Tingkat energi regeneratif per kilometer jarak yang diperoleh dari motor dengan efisiensi pengisian 100 persen, (2) kecepatan menurun sepeda, dan (3) sepeda kecepatan tanpa pengisian regeneratif. Pada kenyataannya, efisiensi pengisian 100 persen tidak mungkin dilakukan.

Angka yang realistis adalah antara 40 dan 60 persen efisiensi. Nilai tabel dihitung untuk sepeda listrik dan berat total pengendara 122 kg (269 lb), koefisien drag adalah 1, koefisien rolling adalah 0,0058, area frontal 0,5 m<sup>2</sup>, dan kerapatan udara untuk ketinggian 15 m. Pemulihan energi diasumsikan 100 persen efisien.

Sebagai contoh, jika kita memastikan efisiensi pengisian ulang 50 persen, kita akan mendapatkan sekitar 6,3 Wh/km (10,1 Wh/mil) yang ditempuh dengan kecepatan kondisi-mapan di tanjakan menurun sebesar 6 persen. Ini berarti pemulihan energi sebesar 2,5 persen untuk baterai 250-Wh. Kecepatan meluncur kondisi tunak dengan pengisian regeneratif ini, di bawah kondisi yang dijelaskan dalam keterangan Tabel 4.2, adalah sekitar 32 km/jam. Tanpa pengisian regeneratif, kecepatannya akan menjadi 55 km/jam. Jika seseorang memiliki banyak jarak tempuh 1-km, pengisian ulang baterai akan terjadi.

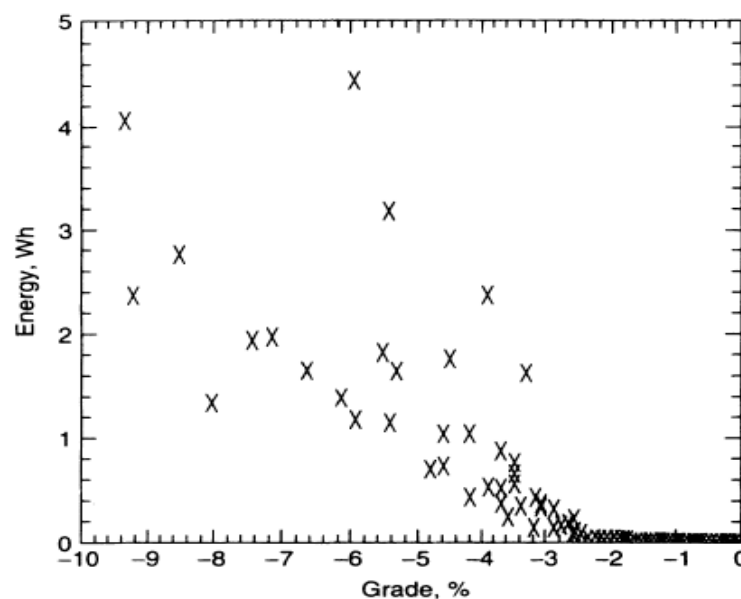
Distribusi grade dan panjang jalan perlu dipertimbangkan dalam menilai manfaat pemulihan energi. Sebagai contoh lebih lanjut lagi gunakan rute dalam lari sepeda tahunan Seattle-ke-Portland [27]. Dalam jarak sekitar 200 mil (322-km) ini kami menemukan bahwa 96 persen dari rute memiliki kemiringan jalan kurang dari 6 persen dan 91 persen dari rute memiliki kemiringan kurang dari 4 persen.

Dengan memperhitungkan panjang tanjakan, kami memperoleh jumlah energi yang dapat dipulihkan untuk setiap segmen downhill. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.10. Untuk setiap kelas tertentu titik data tersebar karena berbagai panjang kelas dan berbagai kondisi angin dan efisiensi diasumsikan. Sedikit energi yang dapat diperoleh kembali yang bermanfaat ditunjukkan untuk tanjakan yang menurun kurang dari 3 persen.

Pertimbangan umum mungkin mengikuti pendekatan: Asumsikan dibutuhkan rata-rata 15 Wh/km (24 Wh/mil) untuk menempuh rute tertentu dan bahwa rata-rata tanjakan menurun adalah 4 persen. Selanjutnya, asumsikan, dengan menggunakan rute yang mirip dengan rute Seattle-ke-Portland, bahwa nilai penurunan untuk pengisian daya adalah 5 persen dari rute Anda. Dengan asumsi 4 Wh/km energi regeneratif untuk grade rata-rata 4 persen. Persentase energi yang dapat dipulihkan untuk contoh ini adalah:

$$5\% \times (4 \text{ Wh/km} / 15 \text{ Wh/km}) = 1.3\%$$

Cara yang lebih tepat adalah dengan memodelkan setiap kenaikan kecil dari rute.



**Gambar 4.10** Energi yang dapat diperoleh kembali dari meluncur ke bawah di Seattle-ke-Portland

Sepeda Tahunan Klasik. Perhatikan bahwa untuk tingkat tertentu, panjang zona pemulihan mempengaruhi pemulihan energi. Berat gabungan kendaraan dan pengendara adalah 142 kg dan koefisien drag adalah 1 [27]. Hasil contoh ini menunjukkan bahwa manfaat pengisian baterai dengan pemulihan energi akan sulit dibenarkan berdasarkan biaya tambahan, kompleksitas, dan berat. Untuk pertimbangan ini, sebuah inverter atau konverter mungkin diperlukan karena setiap motor bila digunakan sebagai generator tidak akan mensuplai tegangan yang sama ke suplainya seperti ketika dijalankan sebagai motor. Perbedaan tersebut disebabkan oleh rugi-rugi pada rangkaian dan rugi-rugi torsi pada motor/generator. Selain itu tegangan pengisian pada baterai harus lebih tinggi dari tegangan bebannya.

Inverter atau konverter juga memerlukan pengaturan yang baik agar tidak menimbulkan tegangan berlebih pada baterai untuk kecepatan perjalanan menurun yang bervariasi. Perspektif yang mungkin ingin Anda pertimbangkan ketika membahas subjek pengisian baterai regeneratif adalah membandingkan mobil listrik berat yang bergerak cepat dengan sepeda bertenaga listrik yang bergerak lambat dan ringan. Mobil memiliki lebih banyak energi kinetik daripada sepeda. Persamaan energi benda yang bergerak adalah:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.3)$$

dimana  $m$  adalah massa dan  $v$  kecepatan. Mobil biasanya akan melaju 4 sampai 5 kali kecepatan sepeda, dan massa mobil biasanya 10 kali lipat dari sepeda. Anda dapat melihat bahwa energi kinetik mobil adalah  $10 \times 4^2 = 160$  kali lipat dari sepeda. Tingkat penggunaan energi oleh mobil listrik adalah sekitar 10 kali lipat dari sepeda bertenaga listrik. Jadi pada dasarnya ada peningkatan 16 banding 1 dalam pengisian baterai regeneratif untuk mobil.

#### 4.10 PENGISI BATERAI PANEL SURYA

Sinar matahari sering diusulkan sebagai sumber energi yang tidak menimbulkan polusi untuk menggerakkan kendaraan. Proposal ini disertai dengan teks motivasi tindakan, dan data yang relevan untuk evaluasi tidak sering disediakan. Contoh ilustratif adalah balapan mobil listrik bertenaga surya lintas Australia yang baru-baru ini terjadi. Sebuah mobil General Motors yang memiliki panel surya di atapnya memenangkan perlombaan. Itu tiba di titik akhir lomba 2 hari sebelum pesaing terdekat tiba!

Tidak disebutkan atau ditampilkan dalam publisitas adalah komposisi tim dan kendaraan yang memungkinkan memenangkan perlombaan. Mobil bertenaga surya itu dalam perjalanannya didampingi oleh dua van dan helikopter pengangkut pengamat. Satu van membawa direktur yang didukung oleh komputer yang melacak output daya panel surya, kandungan energi baterai kendaraan, dan daya penggerak yang dikonsumsi. Dia juga diberikan data kecepatan angin dan tingkat bukit yang terbentang di depan. Pengamat di helikopter akan mensurvei geografi rute di depan mobil bertenaga surya, mencari daerah di mana sinar matahari langsung tidak akan tersedia. Van kedua membawa makanan untuk kru lomba dan tenda untuk tidur di malam hari.

Pada suatu sore direktur mengetahui bahwa perjalanan ibu berikutnya membutuhkan mobil balap bertenaga surya untuk melintasi pegunungan yang tinggi. Ini pertama harus melakukan perjalanan melalui lembah dan daerah berhutan di mana radiasi matahari langsung tidak tersedia terus menerus. Hanya dengan memulai dengan baterai yang terisi penuh, mobil dapat melintasi jangkauan dalam satu hari. Direktur kemudian memerintahkan pilot helikopter untuk menemukan, dalam area yang ditentukan, tempat berkemah di mana mobil surya dapat diparkir di lereng yang miring ke barat. Di sana sinar matahari akan datang sejauh mungkin hingga 90 derajat terhadap panel surya selama sebagian besar siang hari. Keputusan ini memungkinkan mobil balap untuk melintasi pegunungan pada morning berikutnya.

Sepeda di mana daya baterai melengkapi daya pedal telah dilengkapi dengan panel surya. Panel surya dapat diorientasikan untuk mengumpulkan sinar matahari secara maksimal saat sepeda diparkir. Panel surya yang melacak matahari dapat dipasang di sepeda. Namun, analisis menunjukkan bahwa bahkan pada kecepatan sedang ada banyak orientasi panel ini di mana daya yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya angin pada panel melebihi daya yang dihasilkan oleh panel surya yang diterangi penuh.

Analisis kami memang menunjukkan bahwa ada tempat di mana tenaga surya dapat menjadi sumber energi praktis untuk menggerakkan sepeda. Misalnya, negara Afrika Zambia memiliki kebutuhan untuk segera mendirikan pertanian dan perguruan tinggi lain di mana keterampilan dapat dikembangkan untuk memajukan kualitas hidup di negara tersebut. Waktu dan uang tidak tersedia untuk membangun asrama atau jalan mobil dengan cepat di mana siswa dapat bepergian ke perguruan tinggi. Para calon mahasiswa tidak punya uang untuk membeli sepeda motor yang bisa jalan-jalan di jalan setapak. Juga negara tidak memiliki sumber daya yang dibutuhkan untuk membangun jaringan jalan dan pipa yang menyalurkan bahan bakar minyak.

Sistem transportasi siswa yang praktis secara ekonomi terdiri dari jalur sepeda, ditambah sepeda yang ditenagai dengan sel bahan bakar seng-udara. Seorang siswa yang tinggal 30 mil dari kampus dapat mencapai kelasnya dari home dalam 1,5 jam. Di kampus dia akan mampir ke "stasiun pengisian" di mana dia akan mengalirkan zine-dioxide dari fuel eell, menambahkan eleetrolyte segar ke dalam belut, dan menuangkan bubuk zine ke dalam hopper belut. Unit eletrolisis di SPBU akan memulihkan eletrolit dengan memutar ulang zine.

Panel sel surya yang mengikuti matahari akan menghasilkan daya yang cukup untuk memungkinkan unit elektrolisis untuk menghasilkan kebutuhan sel bahan bakar harian, ditambah pasokan yang disimpan untuk hari-hari yang sulit.

## BAB 5

### MOTOR DAN PENGENDALI MOTOR

Motor listrik bertenaga baterai mendorong lebih banyak mobil di Amerika Serikat daripada mesin bensin selama tahun 1900. Namun, motor penggerak dc kecepatan lambat itu berat. Jangkauan perjalanan yang jauh hanya dimungkinkan dengan paket baterai berat yang kehilangan kemampuan menyimpan energinya dalam beberapa tahun. Akibatnya, dalam satu dekade mobil bertenaga mesin bensin mengambil alih pasar mobil penumpang. Sepeda listrik awal sangat berat dan memiliki jangkauan perjalanan terbatas karena digerakkan oleh motor dc baik seri atau tipe luka shunt yang menggunakan energi yang disimpan dalam baterai Lead-Acid berat. Kecepatan motor variabel yang diperlukan untuk penggerak sepeda diperoleh secara tidak efisien dengan kontrol tipe rheostat yang membuang daya. Akibatnya, jarak tempuh yang tersedia dari baterai yang terisi penuh sangat terbatas.

Seperti yang ditunjukkan pada Bab 3, sekarang tersedia sel baterai lithium ion 3,6 V yang dapat menyimpan energi 128 Wh per kilogram berat. Asumsikan bahwa setiap hari 30 persen dari kandungan energi sel 1 Oü-Ah dikonsumsi dan sel diisi ulang setiap malam. Kemudian 82 tahun setelah sel ini mulai beroperasi, sel ini perlu diganti dengan sel baru. Dengan demikian, biaya baterai tahunan akan menjadi sepele jika dibandingkan dengan biaya tahunan baterai starter mobil yang hanya membawa jaminan 60 bulan.

Teknologi yang dikembangkan sejak tahun 1990 telah merevolusi desain motor bertenaga baterai yang dapat menggerakkan sepeda dengan kecepatan yang dapat diatur oleh pengemudi.

Pengembangan utama adalah inverter daya elektronik solid-state yang secara efisien mengubah daya listrik dc dari baterai menjadi arus bolak-balik tiga fase frekuensi variabel. Sebuah motor sinkron berkecepatan tinggi yang berjalan dengan daya tiga fase ini dapat menggerakkan sepeda, melalui rangkaian roda gigi, dengan kecepatan yang diperintahkan oleh pengendara sepeda. Motor ini tidak memerlukan arus medan karena fluks medannya disuplai di rotornya oleh magnet permanen, bukan oleh kumparan medan putar berat yang terdapat pada motor dc lama. Arus dalam armature yang berputar dari motor dc lama harus melalui komutator pembatas kecepatan dan rakitan sikat karbon. Motor sinkron berkecepatan tinggi baru ini memiliki bobot yang jauh lebih ringan daripada motor tradisional. Parameter desain motor dikembangkan sehingga sinkron motor dan inverter pemasok dayanya dapat dirancang dalam banyak konfigurasi untuk memenuhi persyaratan kinerja konfigurasi sepeda tertentu.

Menentukan persyaratan untuk motor, memilih baterai, dan konfigurasi motor penggerak sepeda melibatkan evaluasi banyak faktor secara akurat. Topik ini dibahas dalam Bab 6.

#### 5.1 PRINSIP DASAR MOTOR LISTRIK

Sebuah konduktor pembawa arus dalam medan magnet akan memiliki gaya magnet yang mendorongnya. Gaya ini memutar poros motor yang menerima daya dc, serta motor induksi dan sinkron yang berjalan dengan daya ac. Ketiga jenis motor telah digunakan untuk

menggerakkan sepeda listrik. Dalam paragraf berikut, kami menunjukkan bagaimana poros motor ini dibuat untuk berputar dan bagaimana mengevaluasi faktor kinerja motor ketika memilih sistem propulsi listrik untuk sepeda. Konduktor pembawa arus dalam medan magnet diilustrasikan pada Gambar 5.1. Medan magnet seragam di zona antara kutub magnet utara dan selatan ditunjukkan pada Gambar 5.1a. Medan magnet seragam di zona antara kutub magnet utara dan selatan ditunjukkan pada Gambar 5.1a. Konduktor pembawa arus memiliki medan di sekitarnya yang ditunjukkan pada Gambar 5.1b. Gambar 5.1c menunjukkan arah ke mana konduktor mendorong dengan gaya  $f$ , diukur dalam newton (N). Gaya ini memiliki nilai sebagai berikut:

$$f = \beta LI \times 10^{-5} \quad (\text{N}) \quad (5.1)$$

di mana:

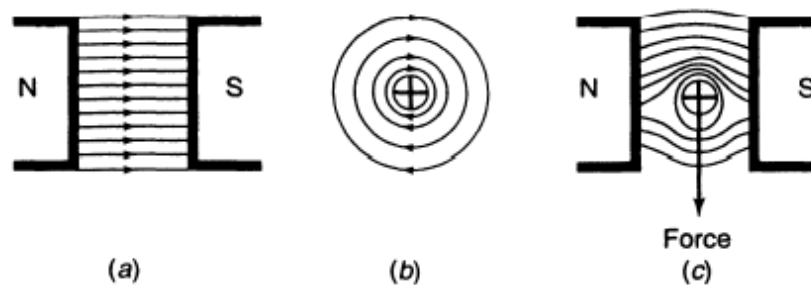
$\beta$  = kerapatan fluks, lines/cm<sup>2</sup>

L = panjang penghantar, cm

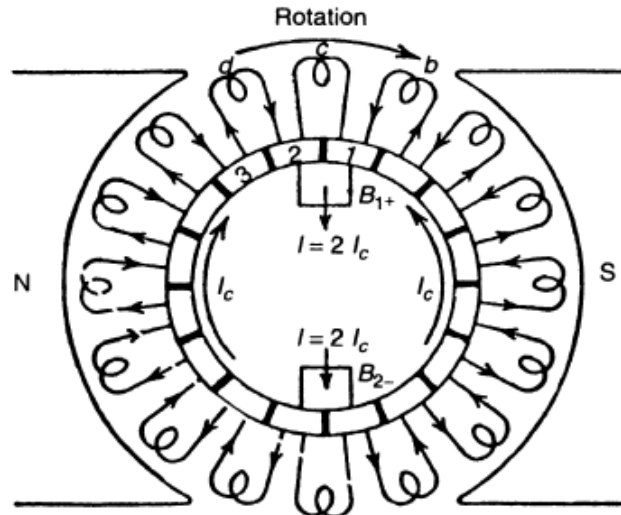
I = kuat arus, A

Saat konduktor bergerak keluar dari medan magnet, gaya yang berkontribusi untuk membuat angker berputar berkurang. Oleh karena itu, motor berkinerja tinggi harus dirancang untuk memiliki konduktor pembawa arus yang paling mungkin dalam medan magnet. Sebagai contoh, Gambar 5.2 menunjukkan elemen penghasil torsi pada motor dc yang memiliki komutator di mana setiap ujung kumparan berakhir pada segmen komutator yang berdekatan. Salah satu kumparan multitem yang berdekatan dengan simbol S dimulai pada satu segmen komutator dan dililitkan menjadi dua alur yang sejajar dengan poros.

Gambar 5.2 menunjukkan bagaimana kumparan jangkar dihubungkan secara seri, dan arusnya mengalir ke kumparan yang dihubungkan seri dari segmen komutator di bawah sikat B<sup>+</sup>. Arus mengalir keluar dari komutator melalui segmen di bawah sikat B<sup>-</sup>. Simbol kumparan menunjukkan bagaimana kumparan terhubung secara elektrik. Namun, setiap kumparan dililitkan sedemikian rupa sehingga setengah dari setiap putaran berada di satu sisi angker, yang dapat berada di bawah kutub medan selatan. Setengah lainnya berada di bawah kutub utara.



**Gambar 5.1** Konduktor pembawa arus antara kutub magnet mendistorsi medan antara kutub dan menghasilkan gaya pada konduktor. (Dari Christie [1], hal. 61. Direproduksi dengan izin dari McGraw-Hill.)



**Gambar 5.2** Pada motor dc, sikat karbon stasioner mengirimkan arus ke belitan jangkar yang berputar melalui batang komutator. Aliran arus di setiap kumparan berbalik ketika batang komutatornya lewat di bawah sikat. (Dari Christie [1], hal. 258. Direproduksi dengan izin dari McGraw-Hill.)

Jadi, hampir setiap setengah putaran dari setiap kumparan pembawa arus menghasilkan gaya yang membuat jangkar ini berputar searah jarum jam. Satu alur pada saat yang ditunjukkan berada di bawah kutub selatan dan yang lainnya berada di bawah kutub utara. Jadi, hampir setiap setengah putaran dari setiap kumparan pembawa arus menghasilkan gaya yang membuat jangkar motor berputar searah jarum jam. Arah arus yang mengalir melalui sebuah kumparan berbalik arah setiap kali segmen komutator yang dihubungkan dengan kumparan itu lewat di bawah sikat karbon  $B_1$  dan  $B_2$ .

Kumparan pada armature ini dihubungkan secara seri, dan arus memasuki armature yang berputar dari carbon brush  $B_1$  dan kembali ke sumbernya melalui carbon brush  $B_2$ . Setelah jangkar berputar  $90^\circ$ , kumparan yang dimulai pada posisi S tiba di sikat, dan di sana arah aliran arus dalam kumparan dibalik. Arus kemudian menghasilkan gaya yang terus memutar angker searah jarum jam saat kumparan lewat di bawah kutub utara medan magnet motor.

Sekarang tersedia untuk motor sepeda magnet permanen yang terbuat dari paduan yang menghasilkan medan magnet yang kuat. Paduan ini tidak tersedia 50 tahun yang lalu ketika motor besar diproduksi untuk tugas-tugas seperti mendorong kapal selam dengan daya baterai dan menggulung baja dengan daya dc dari set generator motor besar. Akibatnya, setiap kutub medan di motor dc harus menjadi elektromagnet di mana inti besinya dikelilingi oleh kumparan pembawa arus. Arus dalam belitan jangkar dibatasi oleh tegangan balik yang dibangkitkan pada belitan ini saat melewati masing-masing kutub medan. Memutuskan kumparan medan dari sumber arusnya secara tidak sengaja menghilangkan tegangan balik ini, sehingga angker terus berakselerasi hingga meledak dan mengirimkan bagian-bagian beterbangan yang bersarang ke dinding bangunan di sekitarnya! Jenis kegagalan ini tidak mungkin terjadi pada sepeda listrik di mana fluks magnet di medan motor dihasilkan oleh magnet permanen daripada kumparan luka.

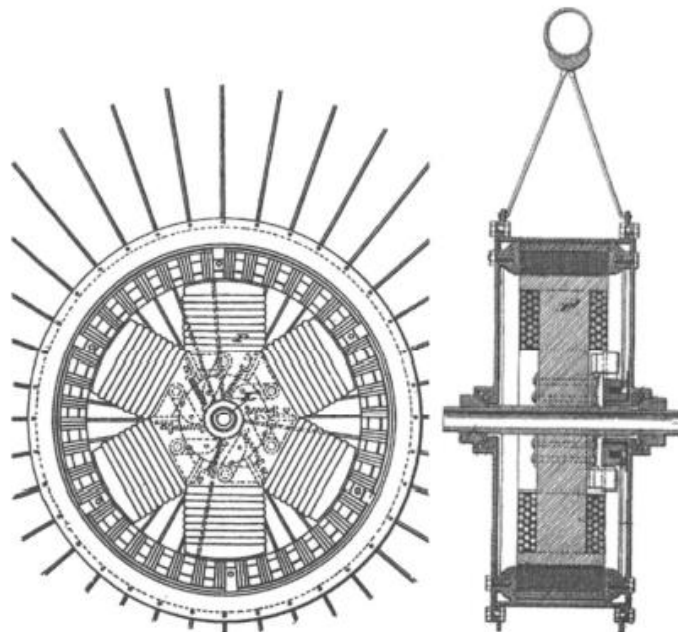
### **Motor Sikat dan Komutator**

Motor dc tradisional memiliki kumparan medan di dalam rumah baja silinder. Arus yang mengalir melalui kumparan ini menghasilkan medan magnet yang mengalir melalui belitan jangkar motor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2. Kabel pembawa arus dalam armature yang berputar didorong oleh medan ini untuk menghasilkan torsi pada poros keluaran.

Komutator mengubah arah arus dalam kabel di setiap slot pada saat slot bergerak dari medan kutub utara ke medan kutub selatan, atau sebaliknya. Dengan demikian, arus yang mengalir di setiap kawat jangkar mendorong medan magnet yang dihasilkan oleh stator, membuat rotor memutar beban mekanis yang dihubungkan dengan poros motor.

Setiap kawat, saat bergerak melalui medan magnet, menghasilkan tegangan balik yang sebanding dengan kecepatannya. Pada kecepatan idle motor, tegangan balik sama dengan tegangan pada terminal jangkar motor. Memutar poros motor pada kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan idle mengubah motor menjadi generator.

Mesin dc sikat dan komutator ini digunakan oleh Thomas Edison untuk menghasilkan arus searah 120 V untuk distribusi ke klakson dan bisnis untuk menyalakan bola lampu pijar. Motor segera dikembangkan untuk menyalakan kipas dan peralatan, dan kemudian trem listrik, kereta api, dan mobil listrik. Kemampuan kecepatan variabel motor dc bekerja dengan baik untuk memutar rolling mill yang menghasilkan kertas dan baja. Sepeda paling awal menggunakan energi baterai untuk menggerakkan sepeda adalah dengan motor dc yang dibangun di dalam hub roda belakang sepeda. Dari pencarian paten kami mengetahui bahwa Ogden Bolton, Jr., menemukannya pada tahun 1895 [3]. Motor ditunjukkan pada Gambar 5.3. Dalam perwujudan ini, rotor adalah bagian luar motor tempat jari-jari roda dipasang.



**Gambar 5.3** Motor hub roda sepeda Bolton 1895 [3].

Penurunan I-V yang terjadi di mana pun sikat karbon menyentuh permukaan tembaga pada komutator membatasi efisiensi motor dc sikat-dan-komutator. Setiap ampere yang mengalir melalui kontak ini menghasilkan kerugian 1-W. Selain itu, sikat menjadi aus, dan kotoran yang menumpuk di antara batang komutator menyebabkan kegagalan.

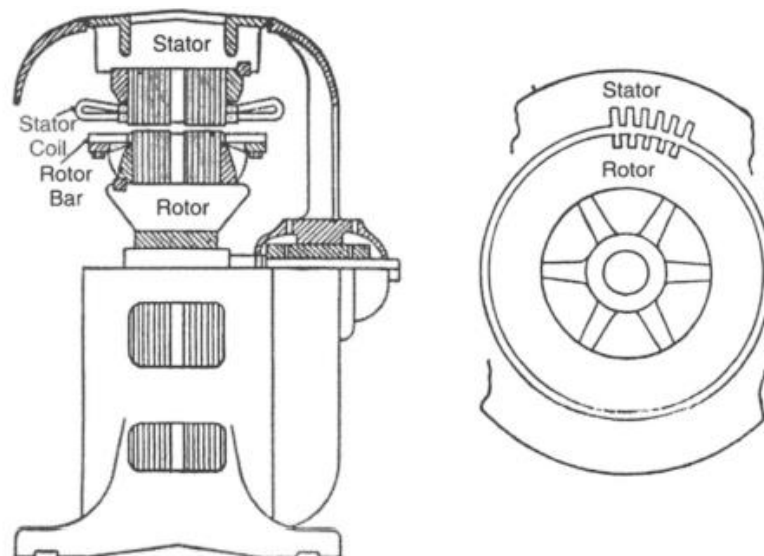


## Motor Induksi

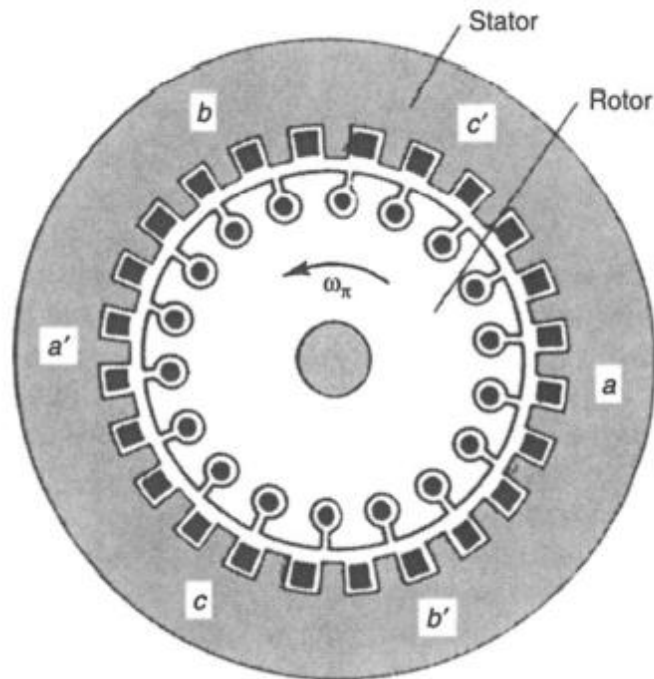
Pada awal abad kedua puluh distribusi tenaga listrik dc ditinggalkan karena set rnotor-generator akan diperlukan untuk mengurangi tegangan saluran transmisi ke tegangan yang lebih rendah untuk mendistribusikan daya ke pengguna. Beberapa motor ac tipe komutator dibuat, tetapi motor induksi ternyata merupakan motor ac yang paling praktis. Motor ini terdiri dari astator yang berisi windings, dan rotor di mana laminasi dijepit pada poros yang ditahan di posisi dengan bantalan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4.

Rotor motor induksi tiga fase adalah tumpukan sederhana dari lapisan besi dengan slot di mana konduktor aluminium dilemparkan. Stator adalah tong besi berisi tumpukan laminasi yang memiliki slot di mana belitan terikat. Namun, motor induksi berjalan sedikit kurang dari kecepatan sinkronnya, dan memvariasikan kecepatan motor memerlukan memvariasikan frekuensi daya yang disuplai.

Produksi torsi pada motor induksi ac tiga fasa dapat dengan mudah dijelaskan dengan penampang motor yang ditunjukkan pada Gambar 5.5, dari buku Bose [2]. Di dalamnya poros motor menopang tumpukan piringan bundar yang memiliki slot di pinggiran luar rotor. Setiap slot berisi batang konduktor yang biasanya terbuat dari aluminium. Bar semua terhubung bersama di ujungnya. Arus bolak-balik yang mengalir melalui belitan stator-koil a-a' pada Gambar 5.5 menghasilkan medan magnet berosilasi yang mengalir melalui rotor.

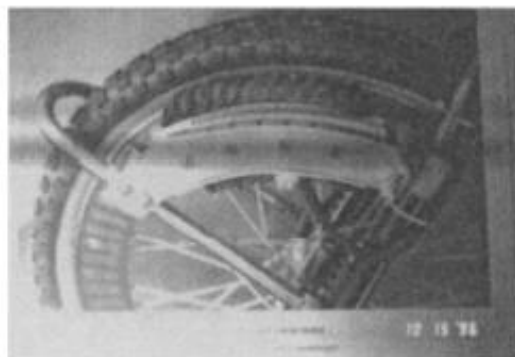


**Gambar 5.4** Motor induksi tidak memerlukan sambungan listrik antara belitan stator dan batang tembaga di rotor. (Dari Christie [1], hal. 553. Direproduksi dengan izin dari McGraw-Hill.)



**Gambar 5.5** Pada motor induksi aliran arus pada belitan stator menghasilkan medan magnet berputar yang menginduksi aliran arus pada belitan rotor. (Dari Bose [2], hal. 42.)

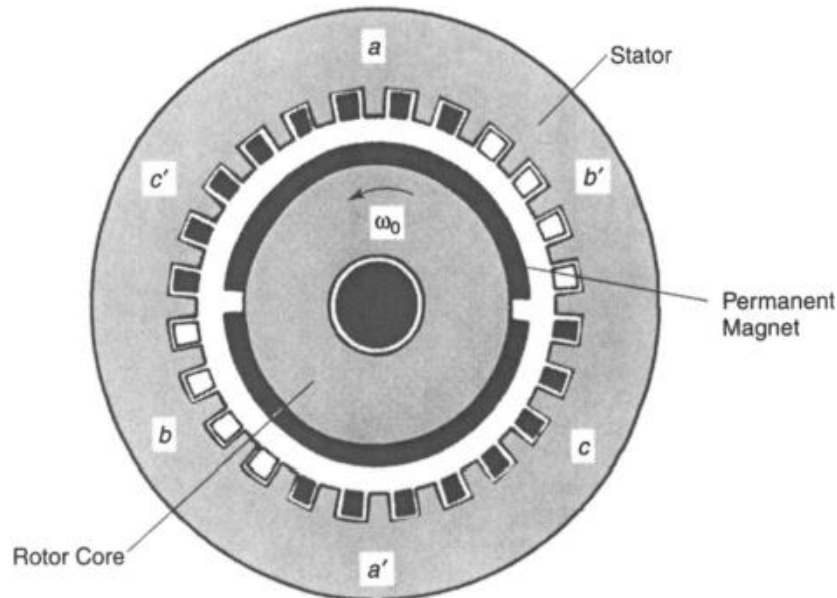
Namun, ketika medan dari kumparan a-a' mencapai nilai puncak positifnya, medan yang dihasilkan oleh kumparan c' dan b' mengalihkan medan dari kumparan a dan mengembalikan fluks medan kembali ke stator sehingga tidak harus pergi semua. jalan melewati poros. Analisis langkah demi langkah dari proses ini menunjukkan bahwa belitan tiga fase menghasilkan medan magnet yang hampir konstan yang berputar pada kecepatan sinkron di celah udara antara rotor dan stator. Medan magnet yang berputar ini menginduksi arus di setiap batang rotor. CUTTent yang diinduksi ini menghasilkan gaya magnet yang menarik setiap batang rotor ke arah rotasi yang mempercepat rakitan rotor hingga berputar pada kecepatan yang hampir sinkron.



**Gambar 5.6** Motor induksi untuk menggerakkan roda sepeda listrik. (Foto milik Floyd A. Wyczalek, diambil di Osaka, Jepang, EVS-13 Electric Vehicle Conference, presentasi oleh Klaus Hofer dari University of Bielefeld, Jerman.)

Motor induksi akan terus berjalan meskipun hanya belitan dalam satu fasa yang diberi energi. Namun, itu tidak akan dimulai jika hanya disuplai daya satu fase. Oleh karena itu,

motor fase tunggal yang umum memiliki kapasitor atau resistor yang memberikan daya di luar fase ke belitan awal di motor. Gambar 5.6 menunjukkan adaptasi eksperimental motor induksi untuk penggerak sepeda. Dalam desain ini batang konduktor tertanam dalam besi berlapis yang membentuk bagian dari pelek roda. Gulungan hanya perlu menutupi sekitar 10 persen dari lingkaran roda. Dalam arti tertentu ini dapat dianggap sebagai motor linier.



**Gambar 5.7** Pada motor magnet permanen, belitan stator menghasilkan medan magnet berputar yang menarik magnet permanen di rotor untuk membuatnya berputar pada kecepatan sinkron. (Depan Bose (2), hal. 63.)

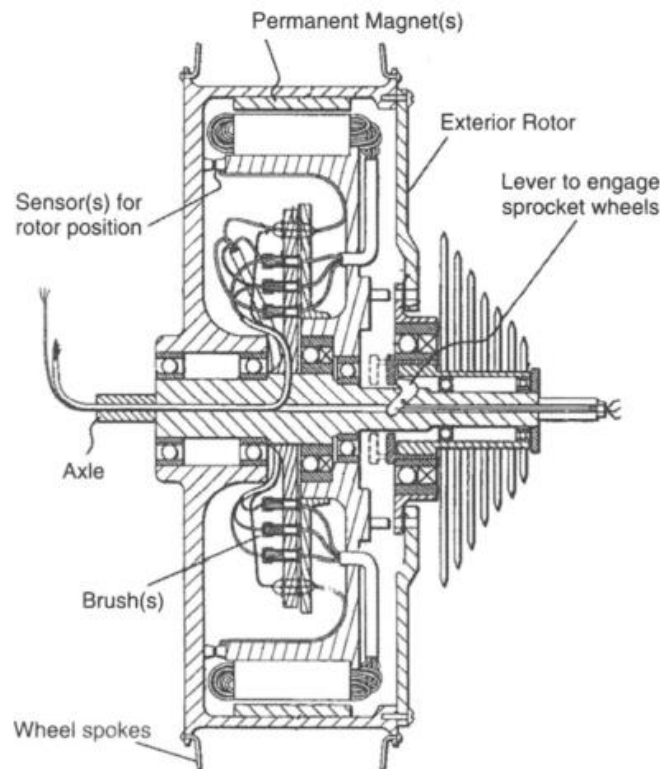
### Motor Sinkron Magnet Permanen yang Efisien

Medan putar yang dihasilkan oleh belitan tiga fasa di celah udara motor induksi juga dapat menarik elektromagnet pada motor sinkron pada kecepatan sinkronnya (Gbr. 5.7). Ini menghindari hilangnya daya yang dihaburkan dalam arus magnetisasi yang menarik di batang rotor motor induksi dengan memaksa rotor berputar pada kecepatan subsinkron. Daya input yang dikirimkan ke motor induksi harus mencakup rugi-rugi daya /  $2R$  pada belitan stator dan batang rotor.

Rugi-rugi ini dihindari pada motor sinkron dimana arus yang menghasilkan medan magnet pada kutub rotor dikirim ke kumparan medan rotor melalui cincin slip pada poros motor. Mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi dari motor sinkron memerlukan exciter dc pada poros motor atau catu daya yang memasok arus eksitasi yang diperlukan. Hal ini membuat motor synchronous lebih mahal daripada motor induction dan meniru penerapannya di masa lalu. Perkembangan baru yang penting dalam teknologi motor sinkron adalah ketersediaan magnet permanen tanah jarang dan catu daya frekuensi variabel solid-state. Magnet permanen menghasilkan fluks medan magnet yang dibutuhkan motor tanpa mengkonsumsi energi. Motor kemudian berjalan pada kecepatan yang sesuai dengan frekuensi daya inputnya yang dapat disuplai oleh inverter dc-ke-ac solid-state bertenaga baterai.

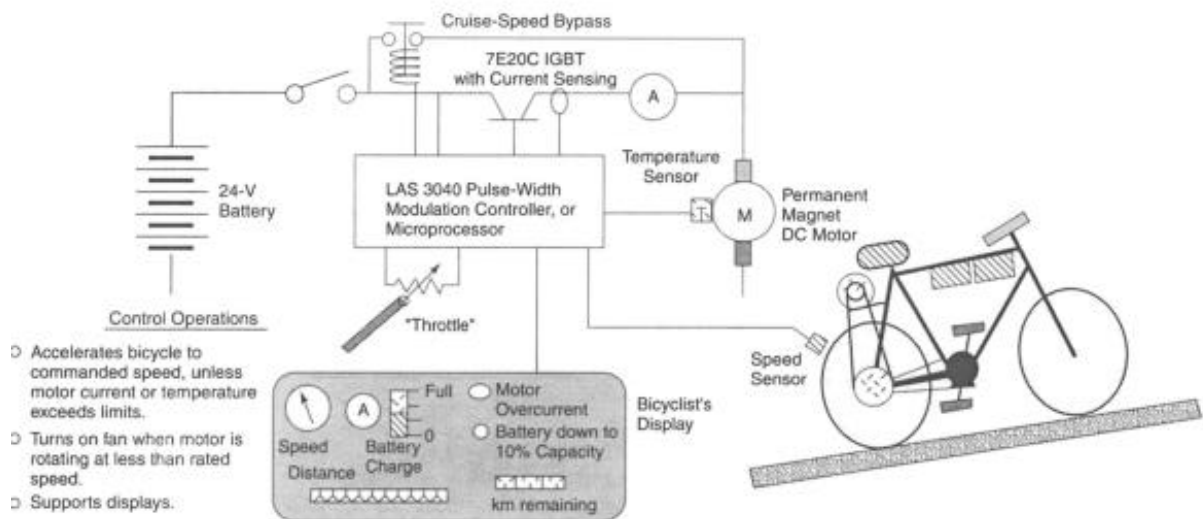
Michael Kutter merancang motor synchronous magnet permanen tanpa sikat yang dipasang di dalam hub roda bicycle [4] (Gbr. 5.8). Dalam perwujudan ini satu set roda sproket *Sepeda Listrik: Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan (Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom, M.Kom.)*

yang digerakkan oleh rantai pedal engkol yang terintegrasi dengan motor, Alever yang digerakkan oleh pengendara dapat menggunakan penggerak ehain sehingga motor dan tenaga pedal manusia dapat digabungkan untuk menggerakkan sepeda. Desainnya memiliki magnet permanen di pinggiran rotor dan menggunakan kabel medan yang dipasang ke stator. Kabel daya dan indra mencapai kabel medan melalui poros berongga. Bantalan kopling satu arah mencegah motor menggerakkan roda sproket rantai.



**Gambar 5.8** Motor hub roda dc magnet permanen [4].

Motor adalah penggerak langsung dan oleh karena itu tidak memiliki roda gigi pengurang kecepatan. Oleh karena itu motor harus memiliki torsi tinggi dan lebih disukai efisiensi tinggi pada kecepatan rendah. Misalnya, pada 10-km/jam (8 mph) roda sepeda 26 inci (66 cm) berputar pada 80 rpm (8,4 rad/s). Efisiensi motor akan rendah pada kecepatan ini, mungkin sekitar 30 persen seperti yang ditunjukkan oleh Welch [5]. King-Jet Tseng dan G. H. Chen [6], dalam desain motor hub mereka untuk aplikasi mobil, menunjukkan bahwa adalah mungkin untuk mencapai efisiensi 89 persen pada kecepatan motor 800 rpm. Efisiensi pada 800 rpm ini hampir sama dengan yang ditunjukkan oleh Welch [5] pada 800 rpm, referensi yang sama dimana nilai 30 persen ditunjukkan pada 80 rpm. Untuk mencapai efisiensi motor yang lebih tinggi, seseorang harus menaikkan kecepatan motor operasi dan menggunakan roda gigi untuk mendapatkan kecepatan roda yang diinginkan. Roda gigi planet adalah solusi yang jelas. Komponen sistem penggerak sepeda di mana baterai memasok daya ke motor sinkron magnet permanen ditunjukkan pada Gambar 5.9. Dalam Bagian 5.4 kami menunjukkan bagaimana kontrol motor untuk sepeda listrik bertenaga baterai dapat dirancang.



**Gambar 5.9** Dengan komponen ringan yang sekarang tersedia, daya baterai dapat dikonversi secara efisien ke kecepatan variabel dan torsi yang diperlukan untuk menggerakkan sepeda. (Dari Binod Kumar dan Henry Oman, Kontrol Daya untuk Sepeda Listrik, Konferensi IEEE NAECON, 1993.

## 5.2 KARAKTERISTIK MOTOR UNTUK PROPULSI SEPEDA LISTRIK

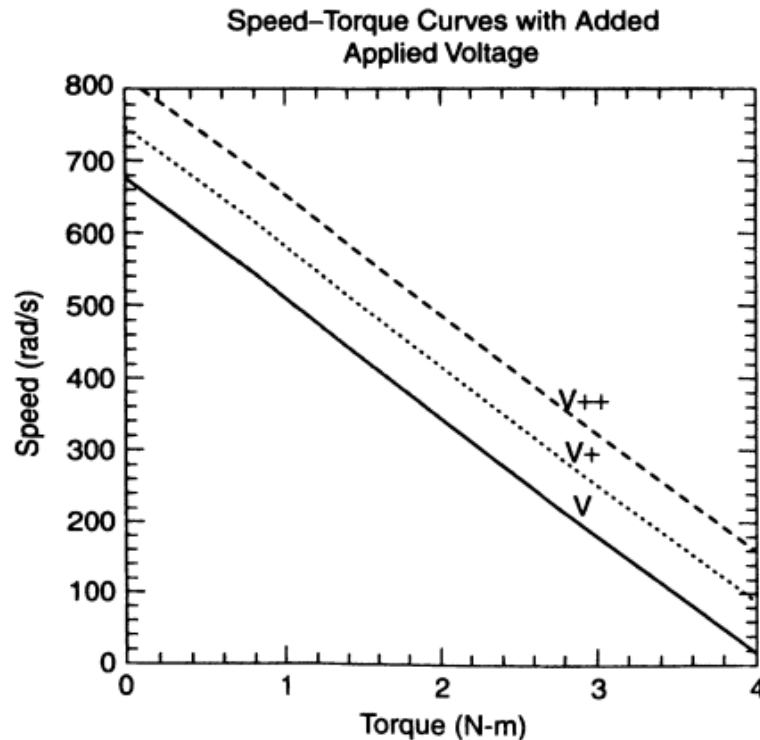
Pabrikan motor biasanya menggambarkan performa motor mereka dengan data torsi motor sebagai fungsi dari kecepatan motor. Mereka selanjutnya menilai motor mereka dalam hal torsi operasi kontinu maksimum atau setara dengan daya pengenalan kontinu maksimum. Peringkat maksimum mengacu pada penggunaan motor jangka pendek yang dapat menarik arus dengan aman sebelum peningkatan suhu internal ke tingkat yang merusak. Interval waktu yang sesuai untuk operasi ini diukur dalam nilai menit yang relatif kecil. Peringkat berkelanjutan seperti yang tersirat: operasi berkelanjutan tanpa kerusakan.

### Karakteristik Kecepatan Torsi

Karakteristik kecepatan torsi khas motor yang dirujuk sebagai magnet permanen, baik tanpa sikat atau disikat, dan motor shunt ac atau dc dan dc, ditunjukkan pada Gambar 5.10. Arus yang mengalir di armature motor, dan  $f_{\text{tux}}$  magnetik yang terkena armature, adalah penyebab torsi dan gerakan. Pergerakan kabel armature di dalam  $f_{\text{tux}}$  magnetik menciptakan gaya gerak listrik balik (tegangan). Pada kecepatan lambat, gaya gerak listrik balik (ggl) yang dihasilkan oleh rotor rendah dan banyak arus dapat mengalir untuk menghasilkan torsi tinggi. Pada kecepatan tinggi ggl balik yang dihasilkan tinggi dan arus yang dapat mengalir sedikit. Torsi rendah tercipta pada kecepatan tinggi.

Gambar tersebut mengilustrasikan tiga kurva yang mungkin untuk motor contoh. Setiap kurva adalah untuk tegangan yang diberikan berbeda. Satu kurva dapat diskalakan ke yang lain dengan rasio tegangan yang diberikan ke motor. Tegangan yang lebih tinggi menghasilkan torsi yang lebih tinggi dan kecepatan yang lebih tinggi. Kebalikannya berlaku untuk tegangan yang diberikan lebih rendah. Skala tegangan ini cukup akurat untuk tujuan kita. Itu, bagaimanapun, bervariasi sesuai dengan toleransi dan nonlinier dalam komponen motor dan faktor lainnya. Kami telah menemukan beberapa penyimpangan dari penskalaan

ini baik dalam offset satu kurva ke yang lain dan kemiringan satu kurva relatif terhadap yang lain. Beberapa motor akan mengikuti penskalaan yang dijelaskan lebih baik daripada yang lain.



**Gambar 5.10** Karakteristik kecepatan torsi khas motor yang disebut sebagai magnet permanen, baik motor brushless atau brushed dan shunt.

Kurva torsi-kecepatan dapat dinyatakan sebagai persamaan untuk karakteristik torsi linier:

$$T = T_s - k_m \omega \quad (5.2)$$

di mana  $T_s$  adalah torsi stall, misalnya, torsi yang dihasilkan dengan poros motor yang tersumbat,  $k_m$  adalah kemiringan kurva, dan  $\omega$  adalah kecepatan putar. Torsi berhenti dan kemiringan torsi adalah spesifikasi motor normal yang disediakan oleh pabrik.

#### Daya Keluaran Motor

Ingat kembali dari Bab 2 bagaimana daya berhubungan dengan gaya dan kecepatan. Dengan pengetahuan itu, daya keluaran motor dari formula  $P = F V$ , dinyatakan dalam watt ketika  $F$  (gaya) dinyatakan dalam newton (N) dan kecepatan  $V$  dinyatakan dalam meter per detik (m). Lihat Lampiran untuk konversi gaya, kecepatan, dan daya ke satuan lain. Kami telah bekerja dengan gaya translasi (lurus). Sekarang kita harus berurusan dengan kekuatan yang berputar. Gaya translasi harus diubah menjadi rotasi dengan:

$$T = Fr \quad (5.3)$$

di mana  $T$  adalah torsi,  $r$  adalah jari-jari gaya translasi yang bekerja  $F$ . Mengubah kecepatan translasi menjadi rotasi dengan  $\omega = V/r$  kita dapat memecahkan daya dalam bentuk  $T$  dan  $\omega$  untuk menemukan:

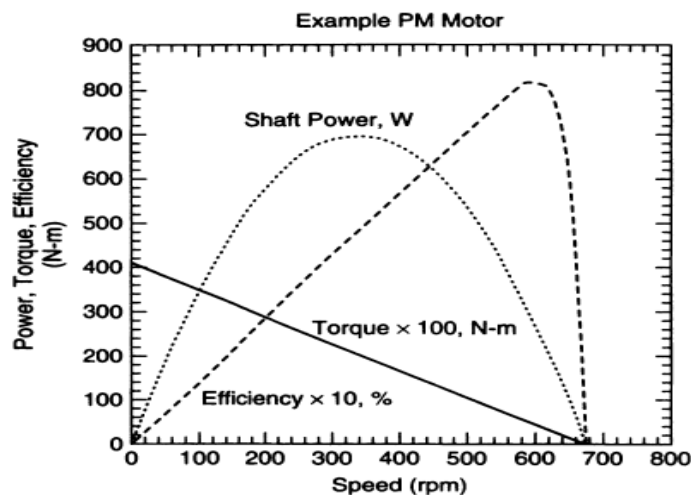
$$P = T\omega \quad (\text{W}) \quad (5.4)$$

di mana  $T$  dalam newton-meter (N-m) dan  $\omega$  dinyatakan dalam radian per detik. Lampiran dapat digunakan untuk mengubah satuan torsi ke nilai lain. Daya keluaran motor dapat ditentukan dalam hal konstanta torsi motor dari torsi stall dan nilai kemiringan torsi yang dijelaskan di atas:

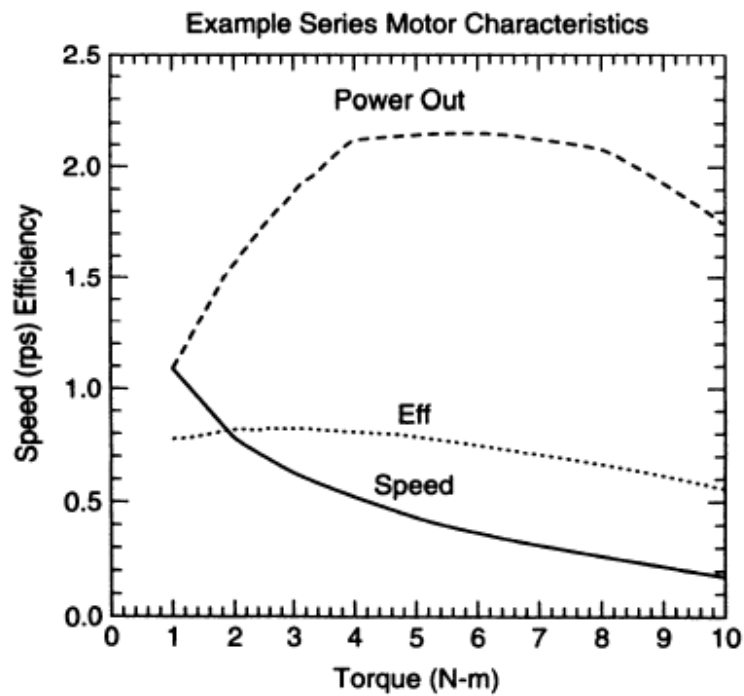
$$P = T_s\omega - k_m\omega^2 \quad (\text{W}) \quad (5.5)$$

Perhatikan ini adalah function berbentuk parabola. Daya dimulai pada 0, meningkat secara parabola ke maksimum, dan menurun secara parabola ke 0. Karena ini adalah motor dan terhubung ke sumber daya listrik, daya keluaran tidak boleh negatif. Gambar 5.11 menunjukkan output daya (daya poros) dari contoh motor brushless magnet permanen. Mengoperasikan motor di dekat titik daya maksimum bukanlah hal yang praktis atau tipikal. Lebih umum untuk mengoperasikan motor mendekati efisiensi maksimumnya, yang tidak sesuai dengan titik daya maksimum. Dan untuk menghemat berat, lebih praktis untuk membuat desain termal sesuai dengan titik operasi yang sama ini.

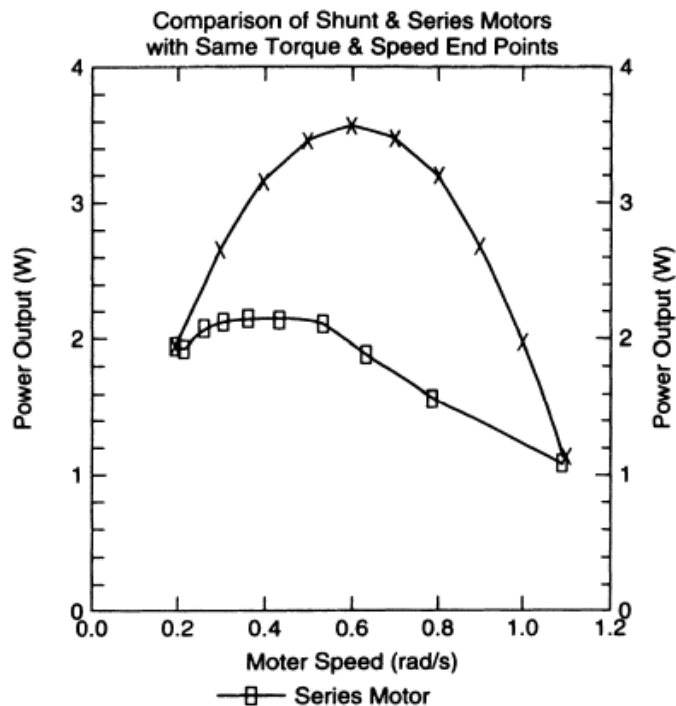
Untuk karakteristik motor torsi kecepatan nonlinier, fungsi di atas tidak berlaku. Titik data yang dipilih dari data torsi kecepatan yang dipublikasikan atau diukur harus digunakan untuk menentukan daya keluaran motor sebagai fungsi kecepatan jika data daya tersebut tidak tersedia. Salah satu contohnya adalah motor seri generik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.12. Kami telah memilih set data torsi dan kecepatan secara grafis dari gambar ini dan menghitung daya keluaran motor. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5.13 bersama dengan data serupa dari motor shunt. Pengaruh karakteristik torsi kecepatan nonlinier pada daya keluaran sudah jelas. Gambar 5.14 membandingkan karakteristik efisiensi yang sesuai.



**Gambar 5.11** Menunjukkan keluaran daya (daya poros) dan torsi serta efisiensi dari contoh motor brushless magnet permanen sebagai fungsi kecepatan sudut ( $\omega$ ) dalam rpm.

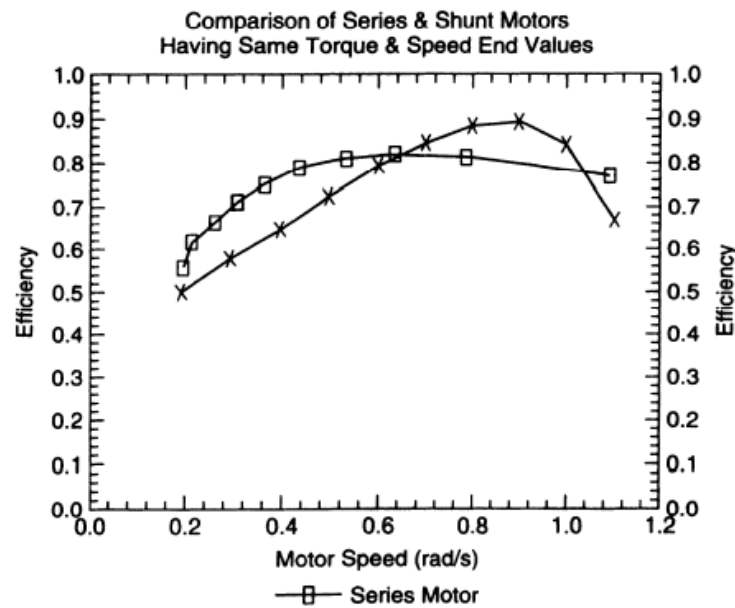


**Gambar 5.12** Daya motor seri generik, efisiensi, dan kecepatan vs. karakteristik torsi.



**Gambar 5.13** Perbandingan daya keluaran motor shunt dan seri untuk setiap motor yang memiliki titik operasi akhir torsi dan kecepatan yang sama.





**Gambar 5.14** Perbandingan karakteristik efisiensi motor shunt dan seri untuk setiap motor yang memiliki titik operasi torsi dan kecepatan akhir yang sama.

### 5.3 PENENTUAN RASIO RODA GIGI

Tabel 2.6 atau Gambar 2.2 memberikan nilai daya yang diterapkan oleh roda penggerak bicycle yang diperlukan untuk perjalanan dalam berbagai kondisi kecepatan, angin kepala, dan kemiringan jalan. Juga dalam bab itu efisiensi transmisi daya diberikan. Dengan pengetahuan ini kecepatan motor dan daya poros serta kecepatan putaran roda dapat ditentukan. Ini dapat dilakukan secara matematis atau grafis. Kedua metode dijelaskan karena hanya informasi graphie yang mungkin tersedia pada motor atau sebaliknya hanya motor constant yang diketahui. Alternatif dijelaskan jika keduanya tidak tersedia.

#### Metode Matematika untuk Menentukan Rasio Roda Gigi

Persamaan (5.5) dapat diselesaikan untuk kecepatan:

$$\omega_m = \frac{T_s + (T_s^2 - 4k_m P_m)^{0.5}}{2k_m} \quad (\text{rad/s}) \quad (5.6)$$

di mana subscript m digunakan untuk daya motor (P) dan kecepatan (w) untuk membedakan nilai-nilai ini dari apa yang akan digunakan nanti untuk kecepatan dan daya roda sepeda.

Istilah lainnya sama seperti yang dijelaskan sebelumnya. Nilai daya apa pun yang digunakan dari Tabel 2.6 atau Gambar 2.2 harus ditingkatkan dengan jumlah kerugian yang diharapkan antara poros keluaran motor dan roda sepeda yang ditenagai oleh motor. Beberapa nilai sampel ditunjukkan pada Tabel 5.1. Membagi dengan salah satu nilai atau kombinasi dari nilai efisiensi yang dipilih yang dinyatakan sebagai pecahan desimal akan meningkatkan nilai daya motor dengan jumlah perkiraan. Rugi daya tercantum dalam tabel sebagai alternatif penggunaan efisiensi. Nilai-nilai ini didasarkan pada pengalaman kami mengamati pengurusan arus tambahan pada baterai saat motor berjalan tanpa beban dibandingkan dengan saat mengemudikan roda dan tidak terhubung dengan permukaan jalan. Kerugian ini akan mencakup kerugian tambahan yang tidak diperhitungkan dengan

pengurangan gearing saja. Ini akan mencakup setidaknya windage roda dan kerugian bantalan.

**Tabel 5.1** Efisiensi (%) dan Rugi (W) Transmisi Daya dari Motor ke Roda

Mechanism	Reduction	Efficiency	Power Loss(%)
Sprockets and chain		95	30–50
Gear box	4 to 1	92	
	10 to 1	87	
	14 to 1	83	
Planetary	3 to 1	95	30–50
Belt	7 to 1	87	40–80
Drive wheel	14 to 1	85	40–90

- a. Kehilangan daya ini didasarkan pada arus tambahan yang ditarik motor untuk menggerakkan roda saat tidak terhubung dengan permukaan jalan.

Ingatlah bahwa sebelumnya dinyatakan bahwa kurva daya versus kecepatan berbentuk parabola. Seseorang dapat memvisualisasikan bahwa harus ada dua nilai kecepatan motor untuk setiap daya motor konstan yang diberikan. Alasan hanya satu yang ditampilkan di sini adalah bahwa nilai kecepatan yang lebih tinggi sesuai dengan pengoperasian motor dari beban ringan ke beban yang lebih berat. Operasi ini berbeda dengan di mana seseorang akan mengoperasikan motor dari kondisi rotor yang hampir stabil ke beban yang lebih ringan. Jika motor dioperasikan dari kondisi hampir mati ke kecepatan perjalanan normal, motor akan menarik arus yang sangat tinggi sehingga ukuran baterai harus dikirimkan. Ini adalah alasan untuk menstarter sepeda yang sedang bergerak sebelum menyalakan tenaga motor.

Sekarang kita memiliki persamaan untuk kecepatan motor, kita membutuhkannya untuk kecepatan roda sepeda. Mengambil rasio keduanya akan menentukan rasio roda gigi. Menemukan kecepatan roda adalah masalah mengubah kecepatan translasi sepeda menjadi kecepatan rotasi roda sepeda. Konversinya adalah:

$$\omega_b = 2S/d \quad (\text{rad/s}) \quad (5.7)$$

di mana  $S$  adalah kecepatan sepeda dan  $d$  adalah diameter roda sepeda ketika  $S$  dan  $d$  berada dalam satuan panjang yang sama dan detik adalah satuan waktu untuk kecepatan. Karena  $d$  biasanya dinyatakan dalam sentimeter atau inci dan  $S$  dinyatakan sebagai kilometer/jam atau mil/jam, kita perlu melakukan beberapa konversi ke persamaan yang setara:

$$\omega_b = 35.2S_{\text{mph}}/d_{\text{in}} \quad (\text{rad/s}) \quad (5.8)$$

$$\omega_b = 55.6S_{\text{kph}}f/d_{\text{cm}} \quad (\text{rad/s}) \quad (5.9)$$

di mana  $d$  adalah diameter roda dalam inci dan  $d_m$  dalam sentimeter,  $S_{mph}$  adalah kecepatan sepeda dalam mil per jam dan  $S_{kph}$  adalah kecepatan sepeda dalam kilometer per jam.

Perhatikan bahwa diameter roda yang diukur dapat berbeda dari peringkat diameter ban. Kami belum mempelajari hal ini, tetapi kami telah memperhatikan bahwa ban sepeda berukuran 26 inci yang dimuat memiliki diameter roda efektif 25,5 inci. Jari-jari roda dari poros ke permukaan jalan harus digunakan untuk menemukan diameter roda efektif. Dari Lampiran Anda akan menemukan bahwa kecepatan roda yang ditentukan di atas dapat diubah menjadi putaran/menit (rpm) dengan mengalikannya dengan 9,55, jika kecepatan motor diinginkan dalam satuan rpm. Hasil akhir untuk rasio roda gigi adalah  $G_r = \omega_m/\omega_b$ . Ini adalah jumlah kecepatan motor yang harus dikurangi.

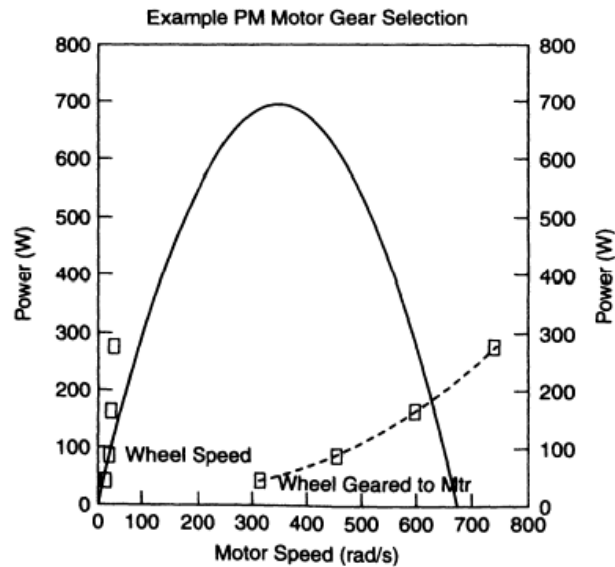
### Metode Grafis untuk Menentukan Rasio Roda Gigi

Untuk metode grafis silakan lihat Gambar 5.11. Kami akan memastikan bahwa Anda telah menghitung kurva yang mirip dengan kurva ini atau Anda memperolehnya dari pabrikan. Ingat kembali komentar kami tentang pengoperasian maksimum dan daya pengoperasian motor yang berkelanjutan. Kami belum menunjukkan batas ini untuk motor contoh. Itu harus diperoleh dari pabrikan. Pilih beberapa kondisi dimana rasio roda gigi akan ditentukan. Sebagai ilustrasi, pastikan titik awal tidak ada angin kencang dan medan datar. Menggunakan titik data yang sesuai dari Tabel 2.6 dan direproduksi dalam dua kolom pertama Tabel 5.2, kami menghitung kecepatan roda seperti yang ditunjukkan pada kolom terakhir tabel, Kolom terakhir dihitung menggunakan 25,5 inci untuk diameter roda  $d$ . Kami memplot titik-titik daya dan kecepatan roda ini pada grafik Gambar 5.15.

**Tabel 5.2** Poin Kecepatan Daya yang Dipilih untuk Pemilihan Rasio Roda Gigi

Speed (km/h)	Power (W)	Wheel Speed (rps)
12.9	40	11
19.3	86	16.6
25.7	161	22.1
32.2	277	27.6

Titik-titik tersebut adalah garis bujur sangkar paling kiri pada grafik. Motor, ketika dihubungkan langsung ke hub tanpa roda gigi, akan beroperasi pada kecepatan di mana kurva paling pas yang ditarik melalui kotak memotong kurva daya motor. Hal ini tampaknya terjadi pada kecepatan sepeda 13 km/h. Anda akan mengingat komentar kami tentang pengoperasian motor di bagian kurva ini: Motor akan menarik arus yang sangat besar di dekat kondisi matinya. Dalam contoh ini kita belum menaikkan nilai daya di atas untuk menyesuaikan daya keluaran motor ke atas untuk memperhitungkan kerugian antara poros motor dan permukaan jalan seperti yang seharusnya dilakukan.

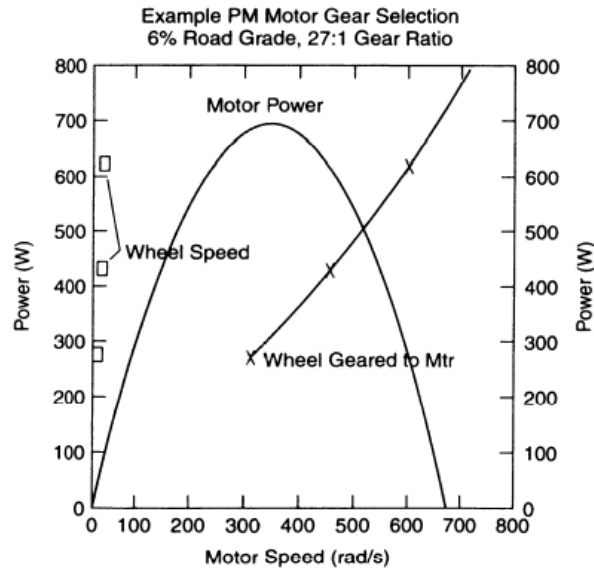


**Gambar 5.15** Persimpangan grafis dari garis beban motor dan jalan (kerataan 0 persen) dengan dan tanpa roda gigi. Notasi "Kecepatan roda" menunjukkan perkiraan titik operasi jika tidak ada roda gigi yang digunakan. Notasi "Wheel geared to mtr" menunjukkan titik operasi di persimpangan ketika rasio gigi 27:1 digunakan.

Sekarang, dengan coba-coba, kami menebak rasio roda gigi yang dengannya kami meningkatkan nilai kecepatan roda yang ditabulasikan di atas. Untuk membantu dalam tebakan itu, kita dapat mengamati di mana kita ingin mengoperasikan motor. Masuk akal untuk mengoperasikannya dengan baik di bawah titik daya maksimumnya dan pada sisi kecepatan tinggi dari kurva daya parabola. Kami memilih rasio roda gigi 27:1.

Titik-titik yang ditunjukkan oleh penskalaan ini adalah bujur sangkar di sisi kanan kurva parabola. Kami menggambar garis yang paling sesuai dengan penilaian mata di antara titik-titik ini. Memproyeksikan persimpangan dengan kurva daya motor ke bawah, kita mendapatkan kecepatan motor yang beroperasi sekitar 625 rps. Kita melihat bahwa titik perpotongan ini adalah sekitar 20 persen dari rentang di atas titik 25,7 km/jam antara 25,7 dan 32,2 km/jam. Sepeda akan melaju dengan kecepatan sekitar  $25,7 + 0,2 \times (32,2 - 25,7)$  km/h atau 27 km/jam dengan output motor 185 W.

Kami mengamati bahwa titik operasi ini agak tinggi dan jauh dari efisiensi puncak yang diharapkan. Rasio gigi yang lebih rendah akan dipilih untuk menurunkan kecepatan motor. Namun, hasilnya adalah kecepatan perjalanan yang lebih cepat dan kemungkinan penggunaan daya yang lebih besar. Seseorang harus menentukan apakah efisiensi meningkat lebih cepat daripada daya keluaran motor untuk mengetahui apakah penggunaan daya benar-benar meningkat. Selanjutnya, ingat bahwa hasil ini untuk perjalanan pada permukaan yang datar.



**Gambar 5.16** Persimpangan grafis garis beban motor dan jalan (kerataan 6 persen) dengan dan tanpa roda gigi. Notasi "Kecepatan roda" menunjukkan perkiraan titik operasi jika tidak ada roda gigi yang digunakan. Notasi "Wheel geared to mtr" menunjukkan titik operasi di persimpangan ketika rasio gigi 27:1 digunakan.

Propulsi pada tanjakan dengan contoh rasio roda gigi yang sama ini dapat mengakibatkan beban yang terlalu besar pada motor. Gambar 5.16 menunjukkan titik operasi baru dengan rasio roda gigi 27:1. Sepeda sekarang akan melaju dengan kecepatan sekitar 22 km/h dengan output motor 510 W. Kemampuan motor untuk menghilangkan panas, dan seberapa dekat titik ini dengan efisiensi puncak, akan menentukan apakah ini bisa menjadi titik operasi yang memuaskan. Kemiringan jalan yang lebih tinggi dapat membuat hasilnya lebih marjinal. Dengan rasio gigi yang lebih tinggi, konsumsi daya dapat dikurangi. Kecepatan perjalanan yang lebih rendah akan menjadi hasilnya. Untuk rasio gigi meningkat menjadi 41:1, output daya yang dibutuhkan motor dikurangi menjadi 360 W. Tingkat kecepatan perjalanan dikurangi menjadi 17 km/h di tanjakan 6 persen.

Komunikasi yang menyeluruh dengan pabrikan motor diperlukan untuk optimalisasi penggunaan motor pada sepeda listrik. Dimungkinkan untuk menggunakan motor dengan daya yang lebih rendah dengan rasio roda gigi yang dapat dipilih daripada motor dengan daya yang lebih tinggi tanpa pemilihan rasio roda gigi.

### **Menggunakan Data Papan Nama untuk Penentuan Rasio Roda Gigi**

Sayangnya, ini mungkin paragraf yang paling sering Anda gunakan jika Anda mengendarai sepeda motor Anda sendiri. Singkat mengukur daya keluaran motor, kami akan memberikan Anda beberapa panduan. Mudah-mudahan, ini akan menyelamatkan Anda dari upaya menempatkan motor yang tidak cocok bersama dengan gearing ke bicycle Anda.

Anda mungkin cukup beruntung untuk menemukan motor dengan pelat nama yang menentukan tegangan, arus, dan kecepatan. Jika demikian, mengalikan arus dan tegangan akan memberi Anda daya input operasi yang berkelanjutan. Dengan asumsi efisiensi di sekitar 65 persen akan mendekati daya keluaran. Alternatif untuk mengasumsikan efisiensi adalah memperkirakan efisiensi maksimum dengan pengukuran. Anda dapat memperbaiki asumsi efisiensi Anda jika Anda dapat mengukur arus tanpa beban motor dan resistansi input saluran

motor. Dengan asumsi Anda melakukannya, gunakan rumus berikut untuk menentukan efisiensi maksimum motor:

$$\text{Eff} = [1 - (I_{\text{no-load}}/I_{\text{start}})^{0.5}]^2 \times 100\% \quad (5.10)$$

di mana  $I_{\text{no-load}}$  adalah arus tanpa beban dan  $I_{\text{start}}$  adalah arus awal. Kami menyarankan Anda untuk menaikkan arus start dengan terlebih dahulu mengukur resistansi input saluran motor dan membaginya menjadi tegangan yang akan Anda gunakan untuk menguji motor. Arus awal dapat diukur dengan menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan operasi motor dan secara bertahap menurunkannya sampai jangkar mulai berputar. Namun, jika sebaliknya, peringkat tenaga kuda (hp) diberikan, maka itu adalah daya keluaran operasi motor. Nilai kecepatan papan nama adalah kecepatan motor tanpa beban.

Untuk menentukan kecepatan operasi motor, kami menemukan bahwa efisiensi maksimum biasanya kira-kira pada arus stasioner. Ini sesuai dengan kecepatan  $\frac{6}{7}$ th dari kecepatan tanpa beban atau pelat nama, motor. Efisiensi yang lebih tinggi dari biasanya 65 hingga 75 akan terjadi pada kecepatan ini. Fungsi efisiensi akan muncul sebagai langkah pertama yang mencapai puncaknya pada rentang kecepatan dengan penurunan tajam ke nol pada kecepatan tanpa beban dan penurunan bertahap yang agak linier ke nol mendekati kecepatan nol. Gambar 5.11 mengilustrasikan hal ini. Dengan mengingat bentuk ini dan mengamati curve keluaran daya parabola, Anda dapat melihat bahwa daya keluaran maksimum, yang terjadi pada kecepatan tanpa beban 50 persen, dan efisiensi maksimum motor, tidak terjadi pada kecepatan yang sama. Titik operasi motor biasanya berada di antara kecepatan untuk daya maksimum dan efisiensi maksimum dan mendekati kecepatan efisiensi maksimum. Kecepatan rata-rata antara dua titik adalah sekitar dua pertiga dari kecepatan tanpa beban. Kami percaya bahwa perkiraan yang baik untuk kecepatan motor akan berada di atas nilai ini dan jauh dari  $\frac{5}{7}$  ke kecepatan tanpa beban.

Sekarang, untuk mencari rasio roda gigi, gunakan  $\frac{5}{7}$ th dari kecepatan tanpa beban untuk motor dan pastikan rasio roda gigi,  $G_r$ . Hitung kecepatan roda  $\omega_b = G_r \times \omega_m$ . Dengan menggunakan rumus di atas untuk kecepatan roda sepeda, selesaikan untuk kecepatan sepeda:

$$S = d_{\text{cm}} \omega_b / 55.6 \quad (\text{km/h}) \quad \text{or} \quad S = d_{\text{in}} \omega_b / 35.2 \quad (\text{mph}) \quad (5.11)$$

ketika  $\omega_b$  dalam radian/detik. Ubah ke radian/detik dari putaran/menit dengan mengalikan dengan 9,55. Dengan kombinasi nilai daya motor dan kecepatan sepeda, lihat Tabel 2.6 atau Gambar 2.2 untuk menemukan kombinasi yang mirip dari nilai yang sama. Jika kombinasi nilai tersebut sesuai dengan kondisi perjalanan yang diinginkan; misalnya, kemiringan jalan dan kecepatan angin, Anda telah memilih rasio roda gigi yang tepat. Jika tidak, Anda harus memilih rasio gigi lain dan mencoba lagi sampai Anda puas dengan kondisi jalan dan kecepatan angin perjalanan.

**Satu pengingat:** Jika Anda mengoperasikan motor Anda pada tegangan yang berbeda dari tegangan pelat nama, maka nilai kecepatan dan nilai torsi harus diskalakan seperti yang dijelaskan dalam Bagian 5.2.1.

#### 5.4 KONTROL MOTOR

Mengontrol motor adalah kebutuhan yang jelas saat mengendarai sepeda listrik. Memulai dan mengubah arus listrik yang mengalir di motor mengontrol motor. Pada beberapa motor, seperti yang telah kami jelaskan, arus listrik juga digunakan untuk menciptakan medan magnet di dalam motor. Penguatan atau pelemahan medan ini mengontrol kecepatan dan tenaga motor. Namun, sirkuit medan terbuka di motor shunt dapat mengakibatkan masalah pelarian kecepatan motor. Masalah tersebut akan teratasi dengan pembatasan arus maksimum dan sekering baterai.

Teknologi pengendalian motor telah maju sedemikian rupa sehingga desain motor dibebaskan dari kendala masa lalu. Namun, sirkuit pengontrol bisa sangat kompleks sehingga produk dari perusahaan khusus harus digunakan. Desain bagian sepeda listrik ini diserahkan kepada rekayasa sistem. Seseorang harus mengoordinasikan dan mengalokasikan persyaratan peralatan antara pabrik motor dan pabrik kontrol elektronik. Di bagian ini kami dapat menyajikan dasar-dasar untuk meningkatkan pemahaman Anda. Kami pertama membahas kontrol motor dc sikat dari dasar switching untuk menggunakan semikonduktor switching. Kemudian dilanjutkan dengan pembahasan tentang pengendalian motor brushless pada motor satu fasa dan tiga fasa sebagai pengantar pengendalian motor multifasa.

##### **Kontrol Motor Sikat**

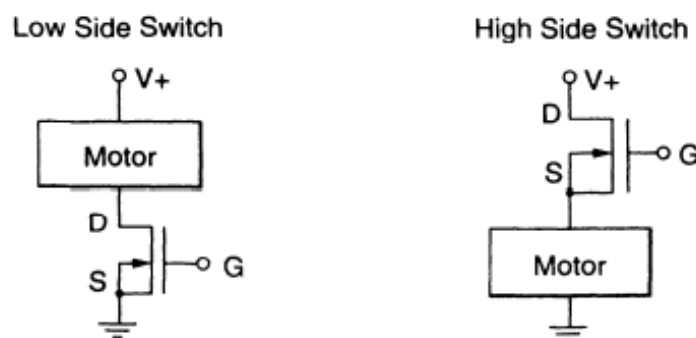
Daya dialihkan ke belitan motor dc melalui komutator dan sikat. Keausan sikat dapat menjadi perhatian pengendara sepeda. Pertimbangkan penggunaan sepeda seumur hidup menjadi 20.000 mil, Untuk kecepatan rata-rata 12 mph menggunakan motor, seseorang akan mengumpulkan 1700 jam operasi pada motor. Rentang waktu ini mungkin atau mungkin tidak menjadi bagian penting dari kehidupan motor. Jika dirancang dan berukuran cukup untuk beban, rentang waktu ini seharusnya tidak signifikan dengan inspeksi dan pemeliharaan. Keausan sikat tergantung pada aplikasi dan sirkuit kontrol.

Sakelar on/off yang sederhana dapat menyebabkan percikan pada antarmuka brush-commutator karena energi ggl yang tersimpan dalam kumparan motor. Sirkuit penekan percikan, yang akan dibahas di bawah, akan meningkatkan masa pakai sikat dalam situasi ini.

Mengontrol arus yang mengalir ke motor dapat mengontrol kecepatan motor. Metode paling sederhana adalah dengan menggunakan sakelar hidup/mati. Untuk situasi ini kecepatan perjalanan hanya ditentukan oleh motor dan beban. Langkah maju dari ini adalah memilih salah satu dari dua voltase baterai dengan sakelar. Kami menemukan ini solusi yang memuaskan yang memiliki kebijaksanaan kesederhanaan namun dapat memberikan kontrol yang wajar. Kita bisa mengayuh dengan sangat santai, menyalakan tegangan baterai rendah, dan melakukan perjalanan dalam kisaran 9-mph atau menyalakan tegangan baterai yang lebih tinggi dan melakukan perjalanan dalam kisaran 14-mph. Langkah selanjutnya dengan tetap menjaga kesederhanaan adalah dengan menggunakan rheostat (resistor variabel) untuk mengontrol arus motor. Meski sederhana, cara ini menghabiskan energi baterai. Langkah selanjutnya dalam kompleksitas adalah menggunakan penggerak arus motor berdenyut.

Pulsa dikontrol secara elektronik dan dengan durasi yang sangat pendek relatif terhadap karakteristik inersia motor. Jenis pengontrol ini disebut sebagai pengontrol modulator lebar pulsa (PWM). Modulator lebar pulsa menggunakan semikonduktor daya yang dinyalakan dan dimatikan oleh osilator gelombang persegi. Siklus kerja on to off dikendalikan oleh rheostat berdaya rendah yang disetel oleh pengendara sepeda. Semikonduktor daya dari berbagai transistor bipolar gerbang terisolasi (IGBT) atau transistor efek medan semikonduktor logam-oksida (MOSFET) untuk tegangan rendah digunakan. Perangkat ini telah dikembangkan hingga tidak memiliki resistansi seri lebih dari sakelar sakelar normal. Semikonduktor daya dapat ditempatkan secara sirkuit antara terminal positif baterai dan motor atau antara terminal negatif dan motor.

Ketika ditempatkan untuk mengganti tegangan suplai positif, ini disebut sebagai switching sisi tinggi. Ini disebut sebagai switching sisi rendah ketika tegangan suplai negatif dialihkan. Gambar 5.17 mengilustrasikan ide tersebut. Namun, jika ada kegagalan sakelar daya sisi tinggi dari output ke ground, motor akan berhenti. Jenis kegagalan semikonduktor daya ini dominan. Namun, untuk sakelar sisi rendah, kegagalan semacam ini akan menyebabkan motor berjalan sampai dimatikan secara mekanis. Perangkat driver tegangan tinggi harus digunakan untuk switching sisi tinggi kecuali saluran dan sumber semikonduktor daya diisolasi dari bahan substrat. Ini menambah kerumitan pada sirkuit kontrol dan penginderaan di dalam pengontrol.



**Gambar 5.17** Kontrol motor sakelar sisi rendah dan sisi tinggi.

Sakelar daya semikonduktor harus menahan ggl balik induktif motor. Snubber eireuits yang memadai diperlukan untuk melindungi perangkat semi eonduetor. Sementara tahan lama untuk beban pengenalan, perangkat semieonduetor sangat sensitif terhadap transien tegangan tinggi. Sementara perangkat pengenalan 100-V dapat mencukupi untuk beban motor saat ini, ia tidak dapat bertahan dari tegangan transien 600-V atau lebih yang umum yang dihasilkan dengan menghidupkan dan mematikan motor. Transien ini disebabkan oleh energi yang tersimpan dalam medan magnet tentang kabel pembawa arus di motor. Energi dalam joule (J) diberikan oleh persamaan:

$$E = 0.5IL^2 \quad (\text{J}) \quad (5.12)$$



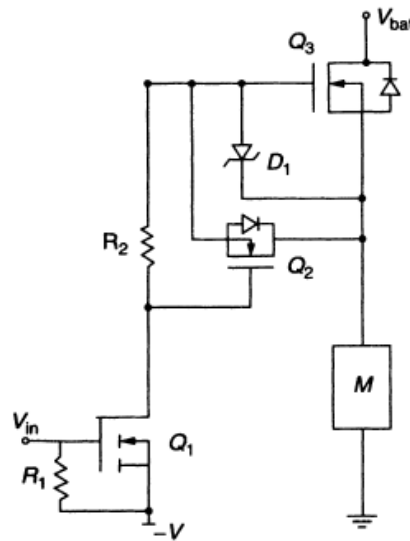
di mana  $I$  adalah arus listrik dalam ampere dan  $L$  adalah induktansi rangkaian arus dalam henries. Ketika arus redue, medan magnet eollapsing menghasilkan tegangan yang mencoba untuk menjaga arus mengalir dalam arah yang sama.

Semakin cepat arus dimatikan, semakin tinggi tegangannya. Transistor dapat mati dalam hitungan puluhan nanodetik. Dalam salah satu pengujian kami, arus 4-A menjadi beban 0,4 mH menghasilkan 25 V yang mencoba menjaga arus mengalir melalui MOSFET. Ini adalah tambahan untuk 12 V dari baterai.

Snubber biasanya menggunakan eapacitor secara seri dengan resistor untuk menyerap kenaikan tegangan yang tajam dari transien ggl balik motor. Sebuah dioda cepat ditempatkan di resistor untuk mengizinkan arus karena tegangan transien mengalir ke kapasitor. Pasangan resistor (dengan dioda shunting)-kapasitor dihubungkan secara paralel dengan motor. Kapasitor kemudian melepaskan energi yang tersimpan ke dalam resistor dan baterai atau beban lainnya. Selain itu dioda bucking respon cepat dihubungkan secara paralel dengan semikonduktor daya. Sebuah dioda bucking kemungkinan akan dibangun ke dalam perangkat IGBT. Ini adalah dioda terhubung untuk nonconduetion dalam keadaan normal. Ini melakukan di bawah tegangan yang jauh lebih tinggi seperti yang terjadi dalam kondisi mati sementara, dan hubungan pendek tegangan transien di sekitar rangkaian listrik. Sebagai contoh kami menemukan bahwa resistor 2  $\Omega$  dan kapasitor 0,47  $\mu\text{F}$  bersama dengan dioda zener yang bekerja cepat dengan tegangan zener dari 36 V mengurangi transien yang disebutkan di atas menjadi tidak signifikan. Motor sepeda listrik sampel dengan induktansi 0,4 mH dan hambatan belitan 0,17  $\Omega$  berjalan dengan tegangan suplai 24 V dc dan arus 8,5 A. Pembaca dirujuk ke Undeland [7] untuk panduan desain terperinci untuk motor lain kondisi.

Contoh rangkaian driver sisi tinggi (tanpa snubber) dari pengontrol untuk motor sikat ditunjukkan pada Gambar 5.18. Contoh memecahkan masalah tegangan kontrol gerbang yang harus lebih besar dari tegangan suplai untuk menghidupkan MOSFET akhir [8].  $V_{in}$  adalah tegangan berosilasi dengan polaritas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Siklus kerja tegangan ini dapat dikendalikan oleh pengendara sepeda melalui potensiometer. Siklus tugas rendah menyebabkan arus motor rata-rata yang relatif kecil, dan penggerak tugas tinggi memiliki efek sebaliknya. Semikonduktor yang ditunjukkan ( $Q_1$  hingga  $Q_3$ ) adalah MOSFET. Mereka bertindak sebagai sakelar di bawah kendali tegangan yang ditempatkan di gerbang transistor. Status on/off dari swiss ini mengikuti pola yang ditunjukkan pada Tabel 5.3. Transistor  $Q_3$  berukuran untuk menangani arus dan tegangan motor. Biasanya "hidup" dan dimatikan "mati" oleh tegangan negatif di gerbangnya. Tegangan negatif dikendalikan oleh transistor  $Q_1$ . Sakelar manual dapat menggantikan  $Q_1$  jika seseorang ingin menggunakan kontrol manual motor. Sakelar manual ini dapat berupa sakelar mikro berdaya rendah kecil yang dipasang di dekat salah satu pegangan stang.  $Q_2$  menyediakan transisi turn-on yang cepat dari  $Q_3$ . Resistor  $R_1$  dan  $R_2$  menyediakan aliran arus antara gerbang dan sumber untuk  $Q_1$  dan  $Q_2$ . Dioda zener  $D$  membatasi tegangan bias "mati" yang diterapkan ke gerbang  $Q_3$ .



**Gambar 5.18** Kontroler PWM sisi tinggi untuk motor dc disikat [8J].

**Tabel 5.3** Status Saklar dan Tegangan untuk Pengemudi Motor Sisi Tinggi

$V_{in}$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$V_{motor}$
$-V$	Off	On	On	$(V+) - (V_{q3})$
0	On	Off	Off	0

**Kontrol Motor Tanpa Kuas**

Menghilangkan sikat meningkatkan keandalan tetapi dengan mengorbankan lebih banyak kerumitan dalam kontrol motor brushless de (BLOC). Selain itu, motor brushless yang dihasilkan lebih eomplex, seperti yang sudah dibahas. Dengan menghilangkan sikat, motor BLOC meningkatkan keandalan, menghilangkan lengkung dan residu debu, dan mengurangi perawatan. Keuntungan lainnya adalah inersia rotor yang lebih sedikit dan pembuangan panas yang lebih efisien. Disipasi panas yang lebih besar memungkinkan lebih banyak arus dan torsi karena itu lebih besar untuk suhu maksimum yang diizinkan.

Perbandingan singkat antara sistem yang menggunakan motor dc versus yang menggunakan motor BLOC ditunjukkan pada Tabel 5.4. Semua alat elektronik kontrol motor akan rentan terhadap kelembaban. Jadi pengendara sepeda harus mengingat barang elektronik apa yang terkena air atau lumpur.

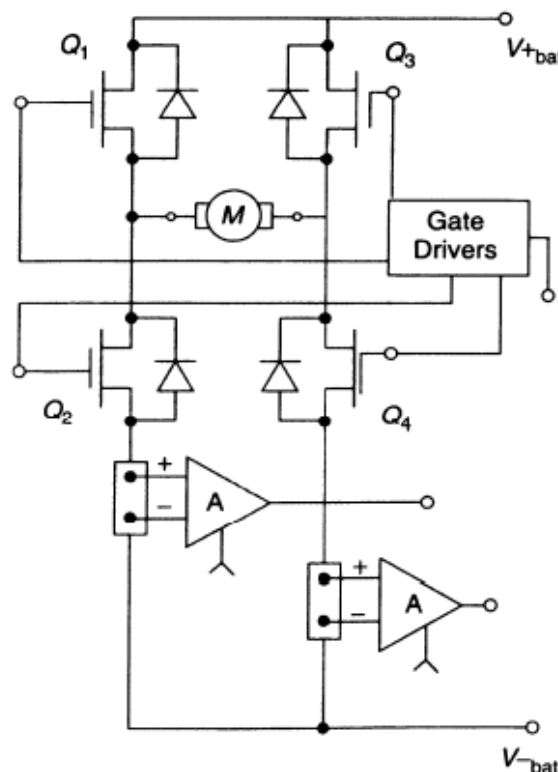
**Tabel 5.4** Camparisan Cast Relatif Antara Sistem Motor DC dan BLOC

Feature	BLDC	DC
Motor cost	2	1
Control cost	3.1	1
System cost	2.5	1

Nilai biaya relatif terhadap 1.

Kontrol Motor Brushless Satu Fasa Mengacu pada Gambar 5.19 kita melihat susunan sakelar sisi tinggi dan rendah yang muncul sebagai bentuk H. Sakelar dikontrol sedemikian rupa sehingga Q1 dan Q4 dihidupkan sementara Q2 dan Q3 dimatikan. Itu menciptakan arus motor yang bergerak ke kanan dalam diagram. Beberapa saat kemudian, kedua pasang sakelar ini disetel ke pengaturan yang berlawanan. Hal ini menyebabkan arus di motor mengalir ke arah yang berlawanan, ke kiri dalam diagram. Dengan cara ini arus dibuat bergantian sehingga telah dibuat inverter untuk mengubah tegangan dc baterai menjadi tegangan ac.

Dengan kontrol frekuensi switching yang tepat, medan magnet yang berputar dapat menyebabkan motor fase tunggal tanpa sikat berjalan. Sensor posisi rotor memberikan informasi untuk mengontrol sirkuit untuk mengatur frekuensi switching ini. Salah satu contoh penginderaan ini, ditunjukkan pada Gambar 5.19, menggunakan resistor penginderaan arus resistansi rendah secara seri dengan kumparan motor dan amplifier berikutnya. Cara lain yang sering digunakan, seperti sensor medan magnet Hall yang dipasang di dalam motor atau sensor ggl belakang motor. Semua metode ini memerlukan baik gerakan motor awal atau posisi awal yang menguntungkan dari rotor dalam medan magnet awal. Yang terakhir adalah kasus biasa. Namun, startup bisa relatif lambat, membutuhkan penyesuaian frekuensi switching agar sesuai dengan inersia motor. Setelah berjalan, kecepatan motor dapat dikontrol dengan mengubah frekuensi switching dan/atau besarnya arus.

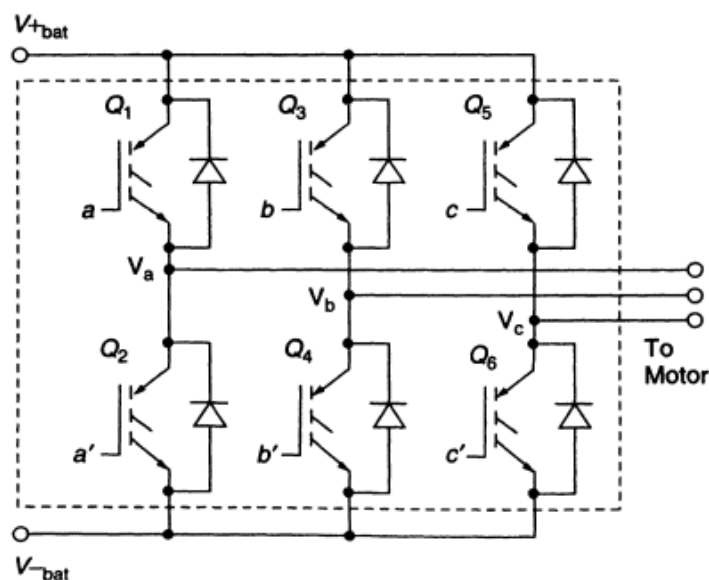


**Gambar 5.19** Jaringan penggerak-H untuk mengendalikan motor dc. Drive H terdiri dari driver sisi tinggi dengan driver sisi rendah gratis sehingga ketika Q<sub>1</sub> menerima sinyal nyala, Q<sub>2</sub> akan menerima sinyal mati.

Besarnya rata-rata arus diubah oleh osilator gelombang persegi PWM yang mengontrol faktor tugas dari bentuk gelombang frekuensi penggerak. Sirkuit PWM pada gilirannya menerima perintah pengaturan dari kontrol kecepatan pengendara sepeda atau

sistem penginderaan gaya pedal. Perintah PWM dikirim ke driver gerbang yang ditunjukkan pada Gambar 5.19. Sirkuit di dalam blok driver gerbang serupa dengan yang ditunjukkan pada sirkuit sakelar sisi atas (Gbr. 5.18). Ada banyak sirkuit driver gerbang ini di dalam blok. Pengemudi sisi tinggi akan memiliki driver sisi rendah gratis sehingga ketika Q1 menerima sinyal nyala, Q2 menerima sinyal mati. Meskipun fungsi-fungsi ini dapat dilakukan dengan komponen individu, mereka sering dilakukan dalam sirkuit terpadu khusus. Transistor sakelar penggerak motor juga dapat diintegrasikan bersama dengan driver gerbang jika nilai daya dan tegangan motor cukup rendah atau jika keadaan seni untuk menangani nilai tersebut cukup maju untuk penggunaan sepeda listrik.

Kontrol motor dilakukan dengan cara yang mirip dengan motor fase tunggal. Mengacu pada Gambar 5.20, perhatikan bahwa ketika sinyal turn-on berada di a, b, atau c dari gerbang transistor penggerak motor harus ada sinyal turn-off di a', b', atau c'. Sebagai contoh, misalkan Q<sub>1</sub> dan Q<sub>4</sub> dihidupkan sebagaimana dilambangkan dengan a dan b' yang memiliki sinyal 1 dan himpunan pelengkap a' dan b dilambangkan dengan sinyal 0 dengan Q<sub>2</sub> dan Q<sub>3</sub> dimatikan. Dalam situasi ini tegangan baterai akan diterapkan antara dua kabel berlabel V<sub>a</sub> dan V<sub>b</sub>. Ini disebut sebagai tegangan belitan-ke-belitan V<sub>ab</sub>. Tergantung pada posisi kumparan motor, tegangan saluran-ke-saluran harus positif atau negatif relatif satu sama lain sehingga torsi yang dihasilkan dari belitan fase saling memperkuat. Tabel 5.5 menggambarkan waktu dan pentahapan sinyal kontrol dan indikasi tegangan fasa yang dihasilkan [9]. Untuk ilustrasi ini nilai 1 untuk V<sub>ab</sub> berarti tegangan baterai positif diterapkan pada V<sub>a</sub>. Untuk -1 tegangan negatif diterapkan. Untuk 0, tidak ada tegangan yang diterapkan. Untuk motor tiga fase, enam dari delapan kemungkinan pengaturan digunakan. Tabel hanya menunjukkan sinyal a, b, dan c karena a', b', dan c' sama besar dan berlawanan.

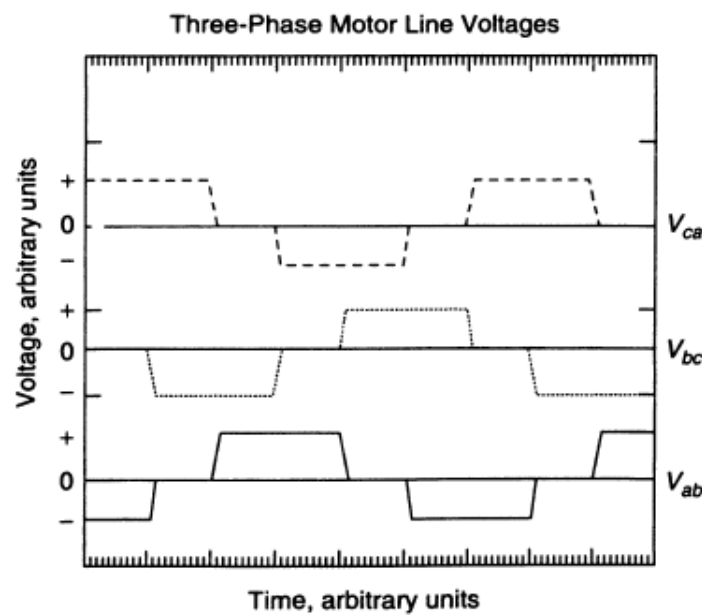


**Gambar 5.20** Contoh rangkaian penggerak untuk motor tiga fasa.

**Tabel 5.5** Sinyal Saklar Pengontrol Motor dan Tegangan Fasa

Gate Signals			Motor Phase Voltage		
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
1	0	0	1	0	-1
1	1	0	0	1	-1
0	1	0	-1	1	0
0	1	1	-1	0	1
0	0	1	0	-1	1
1	0	1	1	-1	0

Gambar 5.21 menunjukkan representasi dari tegangan fasa line-to-line. Ada enam keadaan kombinasi tegangan: satu untuk setiap fase dan setiap arah aliran arus di setiap fase. Tegangan diterapkan sehingga (1) arus pertama mengalir ke fase A dan keluar dari Pita C, kemudian (2) keluar dari C dari A dan B, kemudian (3) ke Pita keluar dari A dan C, kemudian (4) keluar A dari Band C, kemudian (5) ke C dan keluar dari A dan B, dan akhirnya (6) keluar dari B dari A dan c. Proses berulang. Waktu mati setiap fase dapat digunakan untuk merasakan ggl balik fase untuk mengendalikan motor.

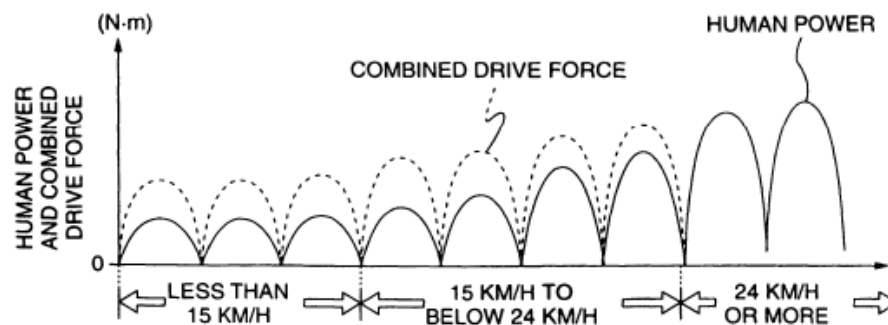
**Gambar 5.21** Diagram pengaturan waktu untuk tegangan line-to-line motor tiga fasa.

Simulasi Tools Desain kontrol motor menggunakan sirkuit mikro semikonduktor sangat dibantu oleh program komputer simulasi. Ketidaklinieran dan kompleksitas kontrol motor dapat menjadi luar biasa tanpa alat seperti itu kecuali jika ada yang sangat berpengalaman. Penggunaan perangkat lunak secara signifikan dapat mempersingkat siklus desain [10]. Dengan program komputer simulasi seseorang dapat memodelkan motor dan bebannya serta rangkaian kontrol motor. Ini sangat berguna untuk motor multifase yang digerakkan oleh inverter yang mengubah tegangan suplai baterai menjadi beberapa fase arus bolak-balik.

### 5.5 TORSI PEDAL DIGUNAKAN UNTUK MENGONTROL DAYA MOTOR

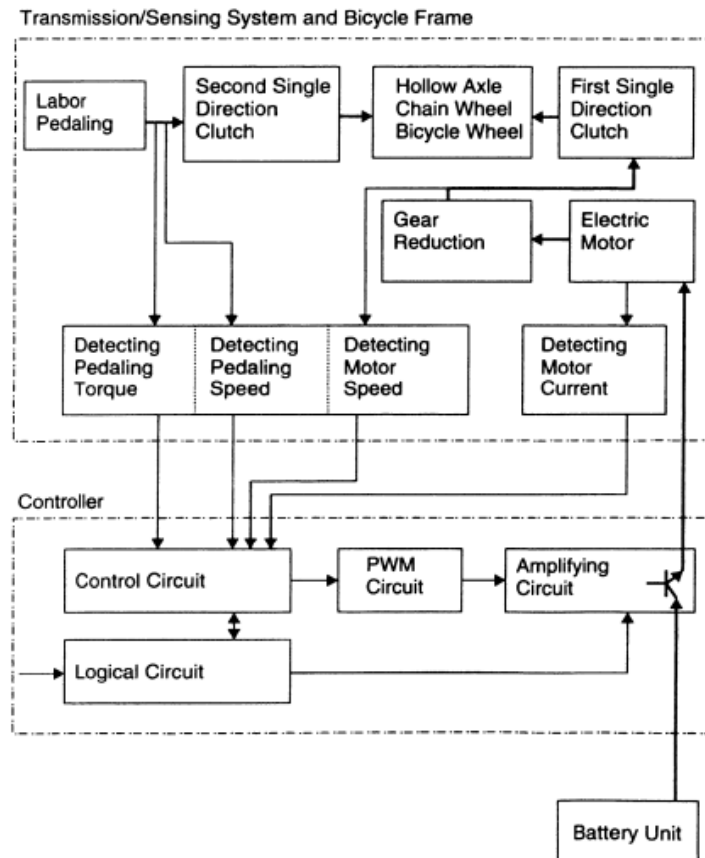
Peraturan dari beberapa negara telah memacu perkembangan mekanisme kontrol motorik yang canggih. Persyaratan mengharuskan pengoperasian agar sepeda tidak dapat berjalan dengan daya motor saja dan juga memperumit pengoperasian sehingga tidak ada daya motor yang diterapkan di atas kecepatan tertentu. Contoh penambahan gaya pedal manusia dengan torsi yang dihasilkan oleh motor penggeraksepeda ditunjukkan pada Gambar 5.22. Hal ini membuat produsen perlu merancang sistem penginderaan untuk menentukan kecepatan sepeda dan ketika tenaga manusia diterapkan pada pedal. Sinyal dari sistem penginderaan ini digunakan untuk mengontrol daya motor yang akan diterapkan untuk propulsi.

Rangkaian kontrol menentukan rasio tenaga manusia dan tenaga motor dengan (1) mencari kecepatan sepeda dan (2) mencari tenaga manusia dengan pengukuran torsi pedal. Kedua nilai ini digunakan sebagai input ke pengontrol motor.



**Gambar 5.22** Kombinasi motor dan tenaga manusia untuk menggerakkan sepeda listrik [11].

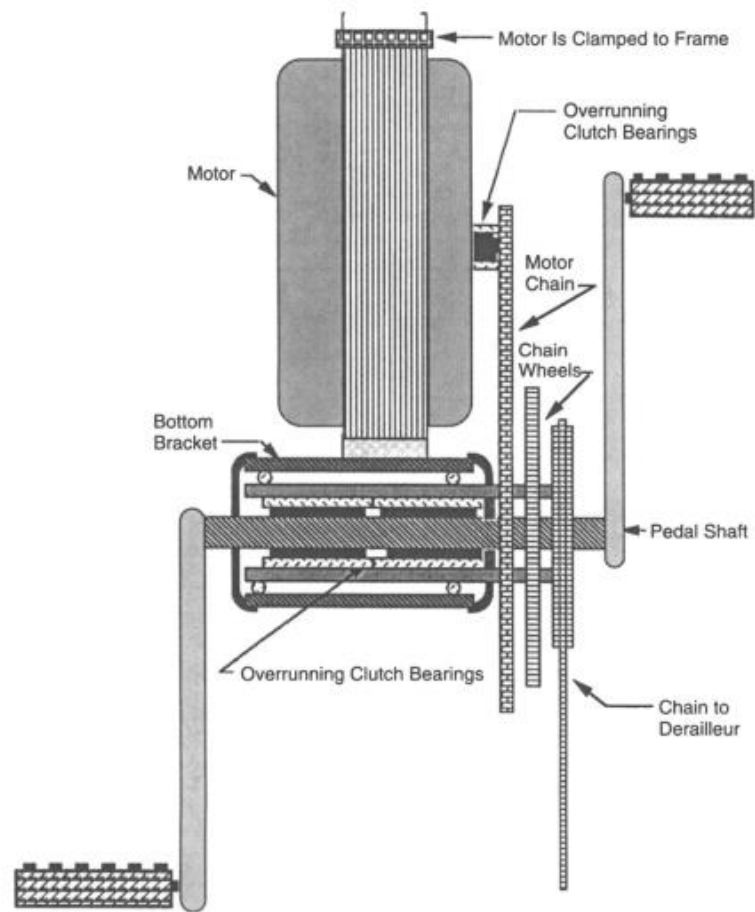
Torsi diukur dengan mengukur sudut perpindahan antara dua rotor atau piringan yang terhubung antara engkol pedal dan roda sproket rantai penggerak. Keduanya rotor atau disk dipisahkan oleh mekanisme aspring yang perpindahannya bervariasi secara proporsional dengan gaya manusia pada pedal engkol. Deformasi menyebabkan perubahan sudut relatif antara dua rotor atau piringan. Perangkat Hall semikonduktor digunakan untuk deteksi sudut. Perangkat Hall memiliki tegangan yang diterapkan yang menyebabkan perubahan tegangan output sebanding dengan garis fluks magnet yang melewati perangkat. Sebuah magnet kecil yang dipasang pada satu rotor atau piringan dan perangkat Hall yang dipasang pada rotor atau piringan lain akan menyebabkan medan magnet bervariasi sebanding dengan perubahan sudut antara perangkat.



**Gambar 5.23** Diagram meringkas sensor torsi pedal dan kontrol motor [12].

Sinyal kontrol digunakan sedemikian rupa sehingga jika gaya pedal 00 terdeteksi motor tidak akan berjalan, Dengan gaya pedal diterapkan, daya motor dikendalikan sehingga dengan gaya pedal lebih besar lebih banyak daya motor diterapkan. Salah satu cara kopleng digunakan adalah antara poros konsentris berongga yang mentransmisikan daya pedal dan daya motor ke roda sproket rantai penggerak. Kopleng satu arah mencegah motor menggerakkan pedal engkol dan mencegah engkol pedal menggerakkan motor. Untuk kecepatan sepeda kurang dari 15 km/jam, kedua gaya tersebut sama besar. Antara kecepatan sepeda 15 dan 24 km/jam, gaya motor berkurang secara linier sampai tidak ada gaya motor yang diterapkan untuk kecepatan lebih besar dari 24 km/jam.

Perwujudan lain dari penggunaan sensor torsi pedal diberikan oleh Chin-Yu Chao et al. [12]. Mereka termasuk penginderaan kecepatan motor. Ketiga sinyal dikirim ke mikroprosesor yang bantuan daya motor untuk penjual ditentukan. Tujuan mereka sama dengan Takada et al. [11]. Implementasi ini ditunjukkan pada Gambar 5.23. Ide menggunakan kopleng satu arah diilustrasikan oleh kami pada Gambar 5.24. Dalam ilustrasi ini sensor torsi tidak dimasukkan. Gambar menunjukkan cara lain untuk mengisolasi gaya engkol pedal dari gaya motor dan menggabungkan kedua gaya untuk mendorong sepeda.



**Gambar 5.24** Motor kopling dan engkol pedal dengan freewheel.



## **BAB 6**

### **DESAIN SISTEM**

Rekayasa sistem adalah teknologi kedirgantaraan baru untuk membuat desain menyeluruh dari sistem transportasi yang kompleks. Kami menunjukkan bahwa prinsip-prinsip rekayasa sistem dapat diterapkan pada desain sepeda listrik.

#### **6.1 PENDAHULUAN**

Di masa lalu, kegagalan sistem transportasi yang mahal telah terjadi. Misalnya, feri dan kapal kargo yang digerakkan oleh turbin gas yang efisien, bukan turbin uap, pernah dibangun. Namun, cacat tak terduga mereka ternyata adalah layanan pemeliharaan, yang membutuhkan mekanik terampil yang bekerja di bandara dan umumnya tidak tersedia di dermaga. Pada awal abad kedua puluh lebih banyak mobil listrik daripada mobil jalur bensin yang berjalan di Amerika Serikat. Mobil listrik berangsur-angsur menghilang karena baterainya kehilangan kapasitas penyimpanan energinya setelah beberapa tahun dan membutuhkan penggantian yang mahal. Produksi kendaraan listrik segera dihentikan. Namun, analisis rekayasa sistem yang terampil akan mengungkapkan bahwa baterai nikel-besi Edison akan memecahkan masalah ini. Pada tahun 1998 sebuah baterai nikel-besi Edison, yang diambil dari truk forklift di tempat pembuangan barang bekas, ditemukan masih berfungsi dengan baik.

Kata sistem berarti banyak hal di banyak bidang. Bagi seorang dokter, itu berarti terpisah dari tubuh. Bagi seorang ahli elektrokimia, itu berarti reaksi penghasil atau konsumsi listrik. Dalam pekerjaan utilitas publik, ini berarti entitas penanganan daya yang terintegrasi secara elektrik. Kata desain sistem dalam "desain sistem sepeda listrik" adalah proses pemilihan sepeda listrik terbaik untuk aplikasi yang ditentukan. "Terbaik" berarti desain yang menghasilkan sepeda dengan biaya seumur hidup terendah dan memenuhi kebutuhan pengguna. Rekayasa sistem dikembangkan di bidang kedirgantaraan selama Perang Dunia 11. Contoh keberhasilan baru-baru ini adalah kendaraan Mars Rover bertenaga baterai yang harus terlebih dahulu bertahan dari akselerasi dan getaran yang parah selama peluncuran ke Orbit bumi dan kemudian percepatan ke orbit antarplanet. Setelah periode lingkungan gravitasi nol datang perlambatan ke orbit Mars, diikuti oleh kejutan mendarat di permukaan Mars. Baterai dan motor penggerak kemudian bekerja seperti yang diperintahkan oleh kontrol canggih yang dikomunikasikan dengan Bumi.

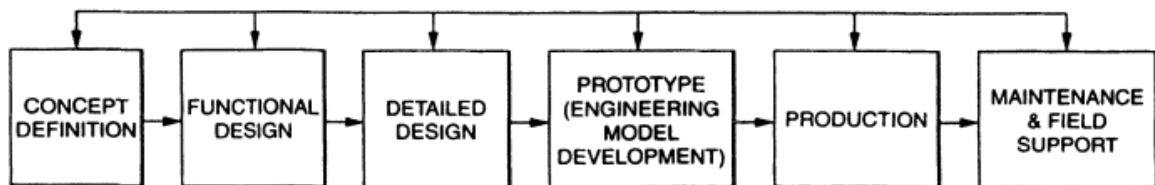
Pada bagian berikut, kami menunjukkan bagaimana rekayasa sistem dapat digunakan untuk menetapkan persyaratan terkait untuk sepeda listrik dan kemudian merancang dan memilih komponennya. Kami kemudian menjelaskan secara rinci prosedur rekayasa sistem, yang melibatkan (1) menetapkan persyaratan yang jelas, (2) membuat dan mengevaluasi desain awal, serta desain akhir, (3) mengevaluasi hasil pengujian komponen penghantar daya untuk menentukan jika perubahan desain akan menghasilkan kinerja masa pakai kendaraan yang lebih baik, dan (4) pengujian menyeluruh terhadap prototipe sepeda listrik. Kriteria evaluasi utama adalah kinerja sepeda listrik dan biaya siklus hidupnya.

## 6.2 MENYIAPKAN DESAIN SISTEM SEPEDA LISTRIK

Rekayasa sistem, yang diperlukan dalam konseptualisasi dan konstruksi sistem yang kompleks, merupakan bagian penting dari setiap proyek besar. Rekayasa sistem dimulai pada tahap awal proyek dan berlanjut sepanjang desain proyek, sehingga memiliki dampak besar pada keberhasilan penyelesaian proyek. Banyak alat komputer telah dirancang untuk membantu perancang sistem. Satu kata yang menjadi kunci untuk memahami alat-alat ini adalah sistem. Definisi umum Webster menggambarkan sistem sebagai "kelompok item yang berinteraksi secara teratur atau independen yang membentuk suatu kesatuan yang utuh." Dalam pengertian teknik, sistem adalah perakitan komponen, beberapa di antaranya mungkin harus dimodifikasi atau didesain ulang untuk memenuhi tujuan desain sistem. "Sistem" berkisar dari konsep tingkat yang sangat tinggi, seperti "kendaraan bermotor untuk individu", hingga tingkat rendah, seperti "kereta penggerak".

### Fungsi Proyek Desain Sistem

Fungsi proyek yang dilakukan oleh perancang komponen utama sistem ditunjukkan pada Gambar 6.1. Dia mulai dengan tahap definisi konsep, yang secara luas mendefinisikan tujuan proyek. Misalnya, perancang motor penggerak magnet permanen untuk sepeda listrik baru Inodel mungkin diminta untuk menghasilkan torsi 25 persen lebih banyak daripada motor sebelumnya yang dikirim dalam rentang kecepatan rendah. Perancang akan menentukan dari catatan dan analisisnya bahwa desain rotor baru menggunakan magnet yang lebih besar akan menghasilkan torsi yang diminta. Dia kemudian membuat desain fungsional yang digunakan tokonya untuk membangun dan menguji motor prototipe.



**Gambar 6.1** Diagram Blok fungsi proyek yang dilakukan oleh perancang komponen sistem. (Setelah M. T. Talbott, H. L. Burks, R. W. Shaw, D. D. Strasburg, dan K. K. Hutehison, *Method and Apparatus for System Design*, V.S. Patent 5.355,317, October 11, 1994.)

Setelah motor yang diuji memberikan torsi yang diperlukan, perancang dapat merilis gambar dan spesifikasi yang direvisi yang memungkinkan pabrik untuk mulai memproduksi motor torsi yang lebih tinggi.

Setelah produksi dimulai, pemeliharaan dan dukungan lapangan disediakan. Perhatikan bahwa ada umpan balik terus menerus dari produksi prototipe dan blok pemeliharaan, yang tergabung dalam definisi konsep, desain fungsional, dan desain detail. Umpan balik ini digunakan untuk memperbaiki asumsi, kesalahan, dan meningkatkan pemahaman untuk meningkatkan dan mencapai desain yang lebih baik.

### Siklus Desain Sistem

Seorang insinyur yang mengembangkan sistem baru bekerja di lingkungan yang jauh lebih kompleks daripada lingkungan perancang komponen. Siklus desain sistem yang lebih kompleks ini diuraikan pada Gambar 6.2 Masukan Siklus rekayasa sistem dimulai dengan identifikasi dan evaluasi kebutuhan operasional sistem yang sedang dipertimbangkan. Contoh

lingkungan dinamis, yang harus segera dievaluasi oleh perancang sistem, terjadi pada tahun 2004 setelah Floyd Wyczalek meramalkan bahwa produksi minyak dunia akan mencapai puncaknya pada tahun 2005; lihat Bab 3. Harga eceran jalur gaso dan bahan bakar naik lebih dari 50 persen. Kota-kota kita sudah sangat tercemar dengan asap gas, dan populasi yang menua tidak bisa atau tidak mau naik sepeda mengayuh. Lingkungan ini telah menghasilkan kebutuhan akan sepeda listrik di negara lain. Produksi tahunan sepeda listrik "standar" China yang berkembang pesat telah melampaui 275.000 per tahun [1]. Dalam analisisnya, insinyur desain sistem yang mengembangkan sepeda listrik membutuhkan data tentang minat komuter di stasiun kereta api, pejalan kaki, pengendara sepeda yang naik di jalur sepeda, dan pengguna potensial lainnya.

Contoh data yang berguna untuk perencanaan program pengembangan sepeda listrik antara lain:

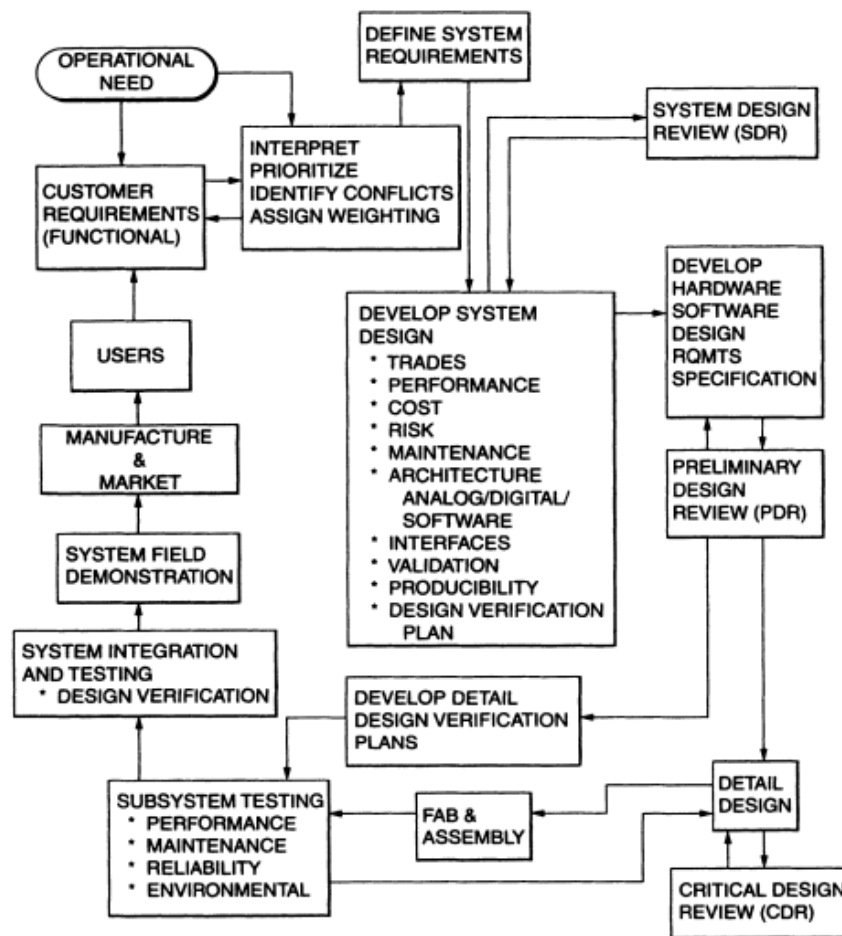
Berapa kisaran harga yang dapat diterima untuk sepeda listrik?

Berapa waktu perjalanan terlama yang dapat diterima ke tempat kerja Anda?

Bisakah Anda mengisi ulang baterai di tempat kerja?

Dalam kondisi cuaca apa Anda tidak akan mengendarai sepeda listrik?

Data terkait tambahan dapat diperoleh dari insinyur lalu lintas, markas polisi, toko sepeda, dan kamar dagang untuk mengembangkan persyaratan kinerja sepeda listrik di masyarakat. Informasi terkait dapat diperoleh dengan menghadiri beberapa pameran sepeda dan sepeda listrik serta konferensi tentang baterai dan motor. Anda dapat menelusuri Web. Hukum dan peraturan yang mungkin mempengaruhi sistem adalah penting. Standar yang diterapkan kabel ke sistem perlu dipelajari. Pengamatan terhadap tindakan pejalan kaki dan komuter dapat diterapkan. Semua fakta ini ditafsirkan dan diprioritaskan pada langkah definisi konsep berikutnya. Interpretasi ini dapat divalidasi dengan calon pelanggan melalui wawancara. Setelah itu kebutuhan sistem ditentukan.



**Gambar 6.2** Diagram siklus desain sistem yang khas. (Setelah M. T. Talbott, H. L. Burks, R. W. Shaw, D. D. Strasburg, dan K. K. Hutehison, *Method and Apparatus for System Design*, V.S. Patent 5.355.317, October 11,1994.)

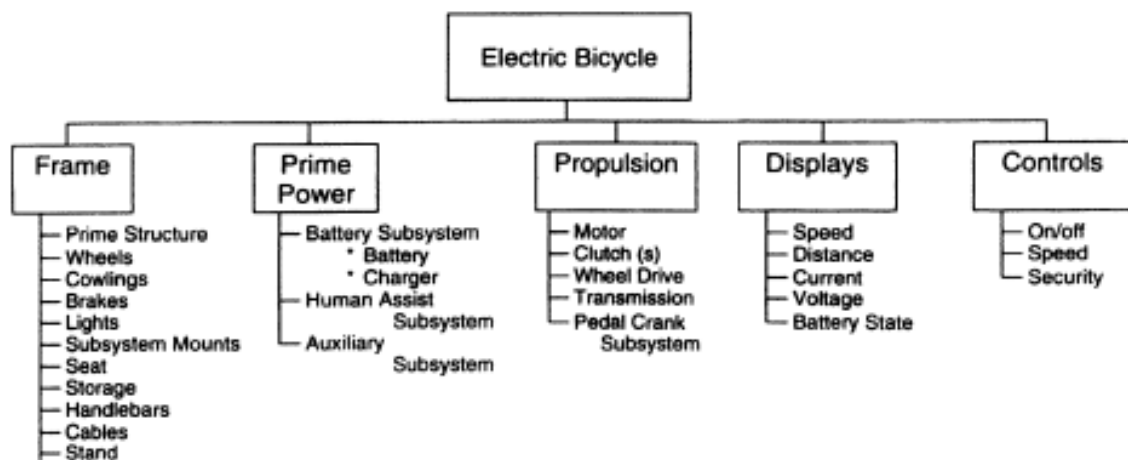
Persyaratan sistem yang ditentukan digunakan untuk mengembangkan tiga kategori persyaratan desain sistem: nyata, diturunkan, dan diasumsikan. Beberapa persyaratan mudah diukur, misalnya, peraturan yang diberlakukan oleh beberapa pemerintah (lihat Bab 1). Persyaratan yang tidak dapat ditentukan secara tepat menjadi asumsi. Semua asumsi penting perlu diidentifikasi dengan batasannya dan ditandai untuk gangguan dalam proses desain sistem sepeda listrik.

Proses Kunci untuk desain sistem adalah pertimbangan semua alternatif yang masuk akal. Persyaratan dikuantifikasi dengan nilai ekstrim nominal dan kemungkinan. Cara alternatif untuk memenuhi persyaratan perlu dipertimbangkan. Langkah pertama adalah mengkonfigurasi desain awal hingga kedalaman yang diperlukan untuk memperkirakan biaya dan mendefinisikan antarmuka. Desain sistem yang dikembangkan meliputi trade-off desain, perkiraan kinerja, perkiraan biaya, risiko, rencana pemeliharaan, validasi, dan produktivitas.

Biaya siklus hidup perlu memasukkan kemungkinan alternatif yang memenuhi persyaratan. Ini perlu diberi peringkat dengan faktor-faktor terkait lainnya. Ganggu persyaratan untuk melihat apa yang terjadi. Pertimbangkan batas atas dan bawah faktor terkait.

Perhitungan biaya siklus hidup adalah prosedur langsung. Biaya siklus hidup adalah total biaya proses atau proyek yang berkaitan dengan pemilik. Namun, pemilik memiliki kepentingan yang berbeda. Contoh kepentingan yang berbeda adalah pemilik sepeda untuk aplikasi olahraga versus perjalanan. Desain sistem yang efektif memerlukan perhitungan biaya siklus hidup pendekatan alternatif serta per turbasi masukan ke proses. Menggunakan komputer untuk menghasilkan program spreadsheet elektronik mempercepat proses. Peringkat biaya siklus hidup adalah langkah pertama dalam evaluasi desain sistem sepeda listrik. Beberapa alternatif akan menjadi penolakan yang jelas, dan yang lain akan hampir sama sehingga optimasi lebih lanjut dan gangguan input untuk menetapkan sensitivitas tidak diperlukan.

Desain sistem mencakup arsitektur di mana sistem dipecah menjadi kelompok-kelompok logis. Sebagai contoh, Gambar 6.3 menunjukkan arsitektur sepeda listrik yang dipecah menjadi subsistem mekanik dan listrik, dan komponen di setiap subsistem ditampilkan. Antarmuka antar komponen juga harus didefinisikan. Informasi yang dihasilkan dalam desain sistem kemudian ditinjau. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk menjawab pertanyaan ini: Apakah desain merupakan solusi hemat biaya yang menguntungkan yang akan memuaskan pelanggan? Proses interaktif dalam desain sistem ini disempurnakan sampai desain yang dapat diterima telah dihasilkan.



**Gambar 6.3** Komponen subsistem sepeda listrik.

Setelah desain yang dapat diterima dihasilkan, spesifikasi persyaratan desain dihasilkan. Spesifikasi akan mencakup, di antara semua item lainnya, deskripsi motor penggerak dalam hal biayanya dalam jumlah yang sesuai, kinerjanya, dan atribut fisiknya. Dengan data ini pabrikan motor bisa memberikan penawaran. Spesifikasi persyaratan desain ditinjau dalam tinjauan desain awal untuk memverifikasi bahwa desain telah dijelaskan secara memadai dan menyeluruh sehingga desain dapat melanjutkan ke tahap desain detailnya. Biaya pengembangan dan keamanan perlu diperiksa dengan cermat ketika peralatan baru sedang dipertimbangkan. Penyempurnaan desain dan spesifikasi berlanjut hingga review desain akhir.

Setelah tinjauan desain awal, desain rinci dikembangkan. Rencana verifikasi desain dikembangkan secara bersamaan. Rencana ini termasuk review untuk kecukupan. Penyempurnaan desain detail berlanjut hingga diterima pada tinjauan desain kritis. Setelah

penerimaan ini, desain rinci sepeda listrik dikirim ke toko untuk fabrikasi dan perakitan. Kendaraan yang dihasilkan diuji untuk kinerja, rawatan, keandalan, dan daya tahan untuk bertahan hidup di lingkungan pengoperasiannya. Informasi dari pengujian sistem digunakan untuk menyempurnakan desain detail jika diperlukan.

Keluaran Setelah pengujian selesai dan integrasi sistem diverifikasi, sepeda listrik didemonstrasikan untuk memverifikasi bahwa persyaratan sistem dan kebutuhan operasional telah terpenuhi dan pelanggan akan puas. Sistem ini kemudian dipasarkan dan diproduksi. Dengan penggunaannya, reaksi pelanggan dicari untuk menyempurnakan desain lebih lanjut.

### **Pentingnya Penyimpanan Data Selama Proses Desain**

Sebagai siklus berlangsung dari tahap konsep ke tahap desain, banyak persyaratan sering menjadi jelas. Semua orang yang terkait dengan desain harus mencatat persyaratan ini untuk ditinjau. Ini akan membantu dalam mempertahankan serangkaian persyaratan yang konsisten untuk proyek. Selama proses, perancang sistem perlu terus menyempurnakan informasi, memecah persyaratan, dan menentukan struktur fungsional solusi. Persyaratan tingkat sistem perlu mengalir ke bawah dalam hierarki untuk memastikan bahwa sistem yang dikirirkan memenuhi persyaratannya. Demikian juga, detail implementasi perlu mengalir ke atas dalam hierarki agar perancang sistem dapat lebih menyempurnakan definisi struktur fungsional solusi.

Kontribusi terpenting dari desain sistem sepeda listrik adalah gangguan persyaratan dan evaluasi hasil. Dengan dukungan komputer modern, perancang sistem sepeda listrik dapat dengan cepat mengevaluasi banyak alternatif dan fokus pada pilihan terbaik. Elemen penting untuk dipertimbangkan adalah berbagai jenis alat pendukung yang sesuai pada tingkat sistem yang berbeda. Perangkat lunak saat ini [misalnya, rekayasa perangkat lunak berbantuan komputer (CASE)] dan perangkat keras [mis., Computer-aided engineering (CAE)] alat desain diarahkan ke efisiensi penggunaan dalam lingkungan tertentu, bukan pada rentang tingkat sistem yang luas. Dengan demikian, beberapa alat yang berbeda diperlukan pada tingkat sistem yang berbeda, yang memperumit komunikasi informasi yang diperlukan antara tingkat sistem. Selain itu, alat khusus menempatkan persyaratan operasional yang berbeda pada pengguna, sehingga mengurangi efisiensi penggunaan program.

### **Data Terkait Pengguna dalam Tinjauan Desain Sistem**

Sebagian besar data yang dievaluasi dalam tinjauan desain berkaitan dengan biaya dan manfaat yang dapat diperoleh pengguna sepeda, yang mungkin tidak selalu jelas bagi pengguna. Contohnya adalah baterai pengapian sepeda motor timbal-asam biasa, yang mungkin menarik bagi pengguna karena harganya yang murah. Jika diisi dengan pengisi daya 12-V biasa, baterai ini hanya akan bertahan sekitar 50 siklus pengisian-pengosongan jika setiap perjalanan menghabiskan 70 persen dari kapasitas energi baterai. Akibatnya, setelah setiap 50 perjalanan, baterai perlu diganti. Ini adalah fenomena yang sama yang mengakhiri penggunaan mobil listrik di awal 1900-an.

Dalam tinjauan desain, baterai dievaluasi berdasarkan biaya siklus hidup sepeda listrik dan biaya perjalanan per kilometer. Alternatif untuk baterai sepeda motor murah adalah baterai nikel-kadmium yang digunakan dalam satelit komunikasi dan bertahan selama ribuan siklus pengisian-pengosongan. Kedalaman debit dan kontrol pengisian dioptimalkan dalam analisis rekayasa sistem. Pada bagian berikut, kami mengilustrasikan teknik rekayasa sistem

sederhana yang dapat memberikan siklus hidup dan biaya perjalanan per kilometer terendah untuk kebutuhan perjalanan tertentu.

### **Penggunaan Prosedur Rekayasa Sistem untuk Mengevaluasi Peluang Baru**

Kekurangan minyak bumi yang semakin meningkat untuk penggerak kendaraan akan memotivasi penyelidikan terhadap sarana perjalanan yang lebih efisien, termasuk sepeda listrik. Ketersediaan program rekayasa sistem yang telah terbukti dan data yang dikandungnya akan membuat evaluasi cepat terhadap teknologi dan peluang baru.

Misalnya, transportasi bertenaga surya telah sering diuji tetapi belum diadopsi karena tidak ada energi matahari yang tersedia saat matahari tertutup awan dan pada malam hari. Namun, ada produk baru yaitu zine-air fuel cell yang bisa membuat energi surya praktis untuk sepeda listrik.

Sel bahan bakar ini (lihat Bab 3) memiliki membran dengan bubuk seng di satu sisi dan elektroda udara di sisi lain. Belut diisi dengan elektrolit kalium hidroksida.

## **6.3 BEBERAPA CONTOH PERDAGANGAN SISTEM SEPEDA**

### **Bobot Sistem Perdagangan dengan Efisiensi**

Bagaimana jika seseorang dapat memperoleh tambahan 10 persen dalam efisiensi sistem dengan menambahkan 3 lb (1,4 kg) untuk motor dengan efisiensi yang lebih tinggi? Menjawab pertanyaan ini membutuhkan studi untuk menukar bobot dengan efisiensi. Ini adalah bagian dari proses pengembangan desain sistem melalui penggunaan studi perdagangan. Pendekatan kami untuk menemukan solusi adalah dengan menentukan hubungan pada tingkat sistem antara berat kendaraan dan efisiensi sistem untuk nilai penggunaan energi yang konstan. Jadi, untuk hasil yang konstan, kita akan mengetahui seberapa besar efisiensi sistem yang harus ditingkatkan untuk sejumlah kenaikan bobot tertentu. Jawaban ini bisa menjadi panduan untuk membuat desain motor.

Kami secara analitis menentukan daya yang diperlukan untuk menggerakkan sepeda listrik dengan model komputer untuk berbagai bobot, efisiensi sistem, dan kemiringan jalan. Objek dari pemodelan ini adalah untuk membuat tabel nilai konsumsi energi untuk rentang bobot dan nilai efisiensi. Membangun kontur nilai konstan melalui matriks nilai penggunaan energi memberikan gradien perubahan efisiensi untuk perubahan berat. Kami menyimpulkan bahwa untuk setiap 5 kg perubahan berat harus ada perubahan 1 persen dalam efisiensi sistem untuk mempertahankan kinerja konsumsi energi yang konstan untuk kemiringan permukaan perjalanan 0 persen. Hasil ini dan lainnya untuk nilai jalan lainnya ditunjukkan pada Tabel 6.1.

Nilai frekuensi terjadinya kemiringan jalan diberikan untuk menilai dampak dari berbagai kemiringan jalan. Frekuensi nilai kemunculan diringkas untuk interval kelas  $\pm 0.5$  persen kelas untuk setiap nilai kelas dalam tabel. Kami menyimpulkan bahwa untuk setiap kilogram peningkatan berat motor, efisiensi harus ditingkatkan 0,3 persen. Kesimpulan ini dicapai dengan asumsi sepeda bertenaga listrik harus dioperasikan pada efisiensi puncak untuk kemiringan jalan hingga 1,5 persen. Contoh ini dimaksudkan sebagai panduan untuk salah satu studi perdagangan yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja.

### **Perbandingan Efisiensi Spesifik Kendaraan Listrik**

Bagian sebelumnya menunjukkan bahwa untuk setiap perubahan 3 hingga 5 kg dalam berat sepeda listrik, ada perubahan yang sesuai sebesar 1 persen dalam efisiensi sepeda dalam penggunaan energi dari baterai. Pada bagian ini kami membandingkan sepeda listrik dengan kendaraan lain. Ukuran umum untuk perbandingan adalah berapa banyak massa pengendara yang dipindahkan per unit energi per jam, yang disebut sebagai efisiensi spesifik yang dinyatakan dalam kilogramWatt-jam/kilometer. Dari Tabel 1.1 dapat ditentukan bahwa penggunaan energi sama dengan sekitar 9,5 Wh/km, kecepatan perjalanan rata-rata adalah 23 km/h, dan konsumsi energi spesifik adalah 15,6 kg/Whkm (termasuk massa sepeda dan asumsi 80-kg pengendara).

Biasanya, sepeda listrik akan menggunakan sekitar 10 Wh untuk setiap kilometer yang ditempuh dan dengan massa pengendara sekitar 80 kg, menghasilkan efisiensi spesifik 8 kg/Whkm. Sebagai perbandingan adalah sepeda motor bertenaga listrik [5]. Sepeda motor berbobot 676 kg ini, saat menempuh perjalanan 32 km/h memiliki efisiensi spesifik 15,7 kg/Whkm untuk dua pengendara berbobot 80 kg. Pada 64 km/h adalah 7 kg/Wh/km. Untuk mobil bertenaga listrik yang membawa empat penumpang 80 kg, efisiensi spesifiknya sekitar 2 kg/Whkm. Mobil listrik hibrida dengan asumsi konsumsi bensin setara 60 mpg memiliki efisiensi spesifik 1,1. Sepeda listrik adalah yang paling efisien dari empat mode perjalanan:

**Tabel 6.1** Efisiensi Sensitivitas terhadap Bobot Sistem

Road Grade (%)	Efficiency Sensitivity (kg/%)	Grade Frequency of Occurrence (%)
0	5	50
1.5	3.3	32
3	2.3	10

- Sepeda listrik: 8 kg/Wh/km (25 km/h, 1 pengendara)
- Sepeda motor listrik: 7 (54 km/h, 2 pengendara)
- Mobil listrik: 2 (4 pengendara dengan kecepatan 160 Wh/km)
- Mobil hybrid: 1.1 (4 pengendara, konsumsi bensin setara 60 mpg)

### Pemilihan Kecepatan Perjalanan

Penggunaan sepeda untuk mencapai jarak tempuh terjauh dengan energi baterai yang tersedia merupakan contoh lain dari penerapan pendekatan sistem. Ada berbagai pilihan yang harus dibuat dalam seberapa cepat untuk melakukan perjalanan dan berapa banyak tenaga manusia untuk diterapkan pada engkol pedal.

Kedua ekstremnya adalah tidak menggunakan tenaga manusia atau tidak menggunakan tenaga motor. Morehin [2] telah menunjukkan kepada kita bahwa adalah mungkin untuk menggunakan kalkulus untuk menemukan kecepatan perjalanan yang direkomendasikan untuk berbagai tingkat permukaan yang menghasilkan penggunaan energi minimum untuk waktu tempuh yang dipilih pada jarak tertentu.



Contohnya menunjukkan bahwa kecepatan berikut harus dipilih setelah memilih kecepatan rata-rata untuk bepergian:

Permukaan rata: berjalan 2 persen lebih tinggi dari rata-rata

Nilai 2 persen: bepergian 7 persen di bawah rata-rata

Nilai 3 persen: bepergian 11 persen di bawah rata-rata

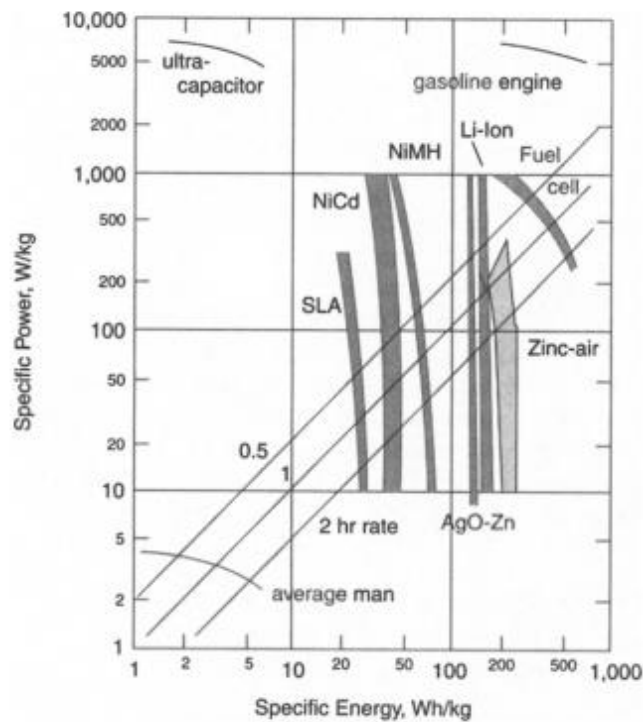
Nilai 4 persen: bepergian 25 persen di bawah rata-rata

Morehin mengasumsikan tenaga motor 11 dan tidak ada bantuan manusia. Dia menggunakan efisiensi motor yang bervariasi dengan grade jalan; 67,1 persen untuk tanjakan 0 persen, 67,5 persen untuk tanjakan 2 persen, 64 persen untuk tanjakan 3 persen, dan 59 persen untuk tanjakan 4 persen. Distribusi grade jalan serupa dengan yang ada pada Tabel 6.1. Kecepatan perjalanan akan berbeda jika distribusinya berbeda. Selain itu, jika efisiensi motor bervariasi secara berbeda untuk berbagai beban motor, kecepatan yang disarankan juga akan berbeda. Studi terbatas menunjukkan bahwa adalah mungkin untuk mengoptimalkan perjalanan secara analitis. Ini adalah subjek yang membutuhkan pengembangan lebih lanjut.

#### **Menerapkan Plot Ragone Baterai**

Plot Ragone yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, jika digambarkan dalam bentuk log-log, akan memungkinkan interpretasi tambahan. Bentuk plot Ragone ini ditunjukkan pada Gambar 6.4. Di sini kami telah menggambar garis yang menunjukkan tingkat waktu penggunaan baterai hingga pengosongan penuh. Tingkat konstan penggunaan 0,5, 1 dan 2 jam ditampilkan.

Persimpangan garis-garis ini dengan karakteristik baterai menentukan wilayah yang diminati untuk aplikasi jarak tempuh sepeda listrik. Meskipun penggunaan baterai yang lebih lama dapat diterapkan, mereka akan membutuhkan membawa lebih banyak bobot baterai. Di sini juga, kita bisa melihat kegunaan ultracapacitor untuk memasok daya ekstra yang dibutuhkan saat akselerasi atau tanjakan pendek hili. Data rata-rata orang dan data mesin bensin ditambahkan untuk perspektif.



**Gambar 6.4** Daya spesifik dan karakteristik energi dibandingkan untuk berbagai sumber energi. (Data baterai dari Tmpm Technology-The Answer for High Power Battery Requirements, white paper oleh Bolder Technologies Corp., 15 Januari 1996. Data kapasitor ultra dan mesin bensin dari Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals. Gambar 3.17 hal. 66, 2003. Data sel bahan bakar dari Gambar 3.4, Bab 3. Data rata-rata dari penulis.)

### Menggunakan Ultracapacitors untuk Mengurangi Ukuran Baterai

Ultrakapasitor, juga disebut sebagai superkapasitor, terdiri dari elektron trolit organik yang ditenangkan dalam ruang di antara pelat-pelat lapisan karbon mikrokristalin mirip grafit. Kapasitor ini memiliki kapasitas yang sangat tinggi untuk menyimpan muatan elektrostatis, berkisar antara 15 hingga 20 F/cm<sup>3</sup> pada tegangan 2,5 hingga 4 V.

Kami dapat mengevaluasi manfaat penggunaan kapasitas daya tinggi dari kapasitor ultra untuk mengurangi pengurusan daya pada baterai selama mendaki bukit dan mempercepat periode perjalanan sepeda. Pendakian bukit adalah kegiatan yang paling membutuhkan tenaga. Misalnya, dari Bab 2 kita melihat bahwa untuk perjalanan sekitar 25 km/h di jalan datar diperlukan daya 161 W (pada efisiensi 100 persen), demikian pula sekitar 271 W untuk kemiringan 6 persen pada kecepatan setengah (efisiensi 100 persen). Mempertimbangkan efisiensi, yang pada levelnya mungkin 85 persen dan pada grade 6 persen kemungkinan akan turun menjadi, mari kita asumsikan 65 persen. Jadi, tanpa bantuan manusia daya yang dibutuhkan pada level 190 W and pada grade 6 persen adalah 417 W. Selisih yang akan disuplai oleh ultrakapasitor adalah 227 W. Gambar 6.4 menunjukkan bahwa kerapatan energi terbaik adalah 8 Wh/kg untuk sebuah ultracapacitor dengan kepadatan daya sekitar 7000 W/kg.

Untuk contoh ini kita akan melihat bahwa ultrakapasitor memiliki energi terbatas, jika kita jamin bahwa grade 6 persen adalah panjang 0,5 km saat melaju 10 km/jam. Waktu tempuhnya adalah 0,05 jam, sehingga membutuhkan 7 Wh (0,05 jam x 227 W). Sebuah

ultrakapasitor 1-kg akan dibutuhkan untuk memasok energi ini, sedangkan kapasitor yang sama dapat menghasilkan 8 kW. Dengan pengendara sepeda melengkapi motor dan ultrakapasitor dengan 100 W tenaga manusia, hill kelas 6 persen bisa hampir 1 km panjangnya untuk peringkat kapasitor yang sama. Kapasitor eksperimental telah terbukti memiliki peringkat energi spesifik 27 hingga 60 Wh/kg [3, 4]. Peringkat ini akan membuat mereka kompetitif dengan baterai. Faktanya, Honda Motor Company telah menggabungkan kapasitor baru tersebut dengan sel bahan bakar pada kendaraan yang sekarang disewakan ke kota Los Angeles [3].

Mengisi daya ultrakapasitor juga menjadi masalah. Niori dkk. [4] menunjukkan data yang menunjukkan waktu pengisian kapasitor sekitar 4000 detik (67 menit). Dalam Bab 4 kami menunjukkan bahwa energi yang dapat diperoleh kembali selama meluncur ke bawah tingkat 4 persen hill akan menjadi sekitar 4 Wh/km. Jika itu dilakukan dengan kecepatan 10 km/h, kami hanya akan mendapatkan 6 menit pengisian daya. Kami membutuhkan 10 segmen menuruni bukit tersebut untuk mendapatkan bantuan pendakian bukit kapasitor untuk satu segmen perjalanan menanjak. Sarana pengisian lainnya seperti baterai atau sel bahan bakar merupakan kebutuhan praktis.

Perjalanan kecepatan lambat dengan sepeda listrik tampaknya meniadakan penggunaan ultrakapasitor jika hanya pengisian baterai kapasitor yang tersedia. Kapasitor dapat membantu akselerasi, tetapi pengendara sepeda kemungkinan tidak akan stres dalam mempercepat sepeda. Contoh ini menunjukkan bahwa perancang sistem dapat menukar antara daya dan pembagian energi antara pengendara sepeda, baterai, dan kemungkinan ultrakapasitor untuk tanjakan pendek. Mungkin perkembangan masa depan akan mendorong penggunaan ultrakapasitor dalam mengurangi arus motor yang tinggi selama perjalanan menanjak.

#### **6.4 CONTOH DESAIN SISTEM**

Ditunjukkan pada Gambar 6.2 adalah langkah-langkah yang akan diambil oleh tim desain sepeda dalam mengembangkan sepeda listrik yang sukses. Untuk contoh desain, ringkasan singkat disajikan dari sejumlah kecil semua jalur desain sistem yang mungkin. Dalam contoh hanya langkah-langkah penting pemilihan motor dan baterai yang dibahas. Desain rangka, pengontrol, spesifikasi pengisi daya baterai, dan nilai biaya spesifik tidak dibahas.

##### **Persyaratan Pelanggan**

Sebuah survei telah menunjukkan kecepatan perjalanan maksimum yang diinginkan 25 km/h di permukaan jalan yang rata untuk jarak propulsi bertenaga listrik maksimum 40 km. Selain itu, sepeda harus mampu memiliki masa pakai baterai 8 tahun dan baterai harus diisi ulang saat diparkir. Sepeda juga akan digunakan untuk perjalanan 10-km harian ke tempat kerja (20 km/day selama 6 hari/minggu). Ini adalah contoh aspek teknis dari apa yang diinginkan pelanggan. Biaya sepeda ke pelanggan sangat penting tetapi di luar cakupan contoh kita.

##### **Menafsirkan, Memprioritaskan, Mengidentifikasi, dan Menetapkan Pembobotan**

Poin-poin berikut berasal dari set awal kebutuhan pelanggan:

- Jarak 40 km menyiratkan bahwa pada 10 Wh/km baterai memberikan energi 400 Wh. Untuk kedalaman pelepasan 70 persen yang memberikan peringkat baterai 571 Wh.

- Sebuah perjalanan 20 km berarti 200 Wh digunakan setiap hari.
- Tiga pengisian ulang baterai diperlukan setiap minggu. Untuk masa pakai baterai 8 tahun itu berarti masa pakai baterai harus 3 kali pengisian/minggu x 52 minggu/tahun x 8 tahun = 1248 cycles.
- Kecepatan 25 km/jam untuk pengendara 80 kg (menyiratkan berat sistem total 100 hingga 120 kg) berarti daya motor sekitar 165 W untuk perjalanan datar atau 185 W dalam 10 km/jam angin depan naik kemiringan 3 perent dengan kecepatan 13 km/jam (Tabel 2.6). Nilai-nilai ini untuk efisiensi 100 persen. Diasumsikan bahwa pengendara bersedia menambahkan 20 W tenaga manusia ke motor saat melakukan perjalanan ke tingkat 3 perent. Dengan demikian, daya yang diterapkan ke jalan akan menjadi 165 W. Tidak ada tenaga manusia yang diasumsikan untuk bepergian di jalan yang rata. Dengan asumsi kehilangan efisiensi roda gigi 35 W, daya keluaran motor harus 200 W.

### **Menentukan Persyaratan Sistem**

Langkah pertama dalam menentukan persyaratan sistem adalah menemukan kombinasi jenis motor penggerak dan jenis baterai yang dapat memenuhi persyaratan awal pelanggan. Seperangkat persyaratan awal berasal dari kesimpulan yang dibuat di Bagian 6.4.2. Persyaratan ini kemudian dapat dikembangkan menjadi langkah-langkah desain sistem yang ditunjukkan pada Gambar 6.1, yang selanjutnya harus dilakukan oleh perancang sistem. Namun, kinerja motor dan baterai yang terperinci diperlukan dalam pengembangan siklus desain sistem di mana alternatif dibandingkan dengan cara yang menghasilkan hasil yang bermanfaat.

Motor yang paling ringan untuk memulai analisis dapat berupa motor ac tiga fasa magnet permanen berkecepatan tinggi yang dikopel dengan gigi reduksi ke elut overrun pada poros yang juga dapat diputar oleh pedal pengendara. Itu harus mampu memberikan setidaknya 200 W daya output. Data kinerja untuk motor tersedia dari pabrikan. Juga tersedia konverter frekuensi variabel dc-ke-ac yang dapat mengubah daya baterai dc menjadi daya tiga fase untuk motor penggerak. Kontroler harus memiliki peringkat arus stabil setidaknya 10 A dan peringkat tegangan sama dengan atau lebih tinggi dari tegangan baterai maksimum yang diizinkan untuk keselamatan pengendara. Mungkin 48 V dapat diasumsikan pada titik ini dalam siklus desain. Baterai yang dapat memenuhi daya propulsi dan energi serta batasan berat perlu menunggu studi perdagangan baterai. Dan terlalu dini dalam tahap siklus desain ini untuk menentukan batasan bobot.

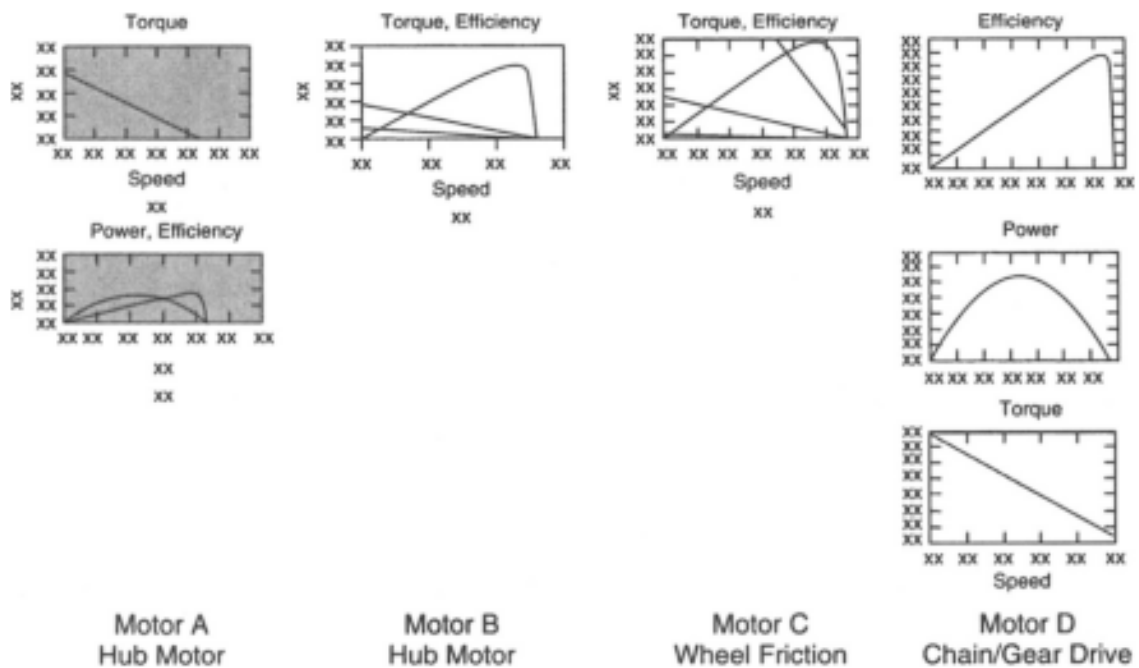
Peringkat daya motor dapat dihitung dari kecepatan yang dibutuhkan untuk mendaki bukit tercuram tanpa bantuan pengendara menjadi tingkat 2 persen. Kapasitas baterai yang dibutuhkan dapat diperkirakan dari kebutuhan pelanggan, efisiensi motor, dan kedalaman debit maksimum yang dapat diizinkan dan masih memenuhi persyaratan umur operasi. Untuk contoh ini, peringkat energi baterai yang dapat dikirim sebesar 400 Wh akan digunakan dan peringkat daya yang sepadan dengan daya motor yang dibutuhkan untuk mendaki bukit atau berakselerasi pada  $1 \text{ m/s}^2$  akan diasumsikan.

### **Mengembangkan Desain Sistem**

Dengan data di atas, ditambah data dan kutipan dari pabrikan, desain awal dapat dikonfigurasi untuk masuk ke dalam model yang ditunjukkan pada Gambar 6.2. Konfigurasi alternatif dapat dikembangkan dan dimasukkan ke dalam model ini. Analisis rekayasa sistem

akan menghasilkan data seperti biaya alternatif, risikonya, dan perkembangan masa depan yang dapat menghasilkan kinerja sepeda listrik bertenaga baterai yang lebih baik. Analisis sistem kemudian dapat mengevaluasi perubahan desain yang akan mengadaptasi sepeda listrik dasar untuk melayani kebutuhan aplikasi lain. Studi perdagangan untuk mengidentifikasi karakteristik motor dan baterai mengikuti.

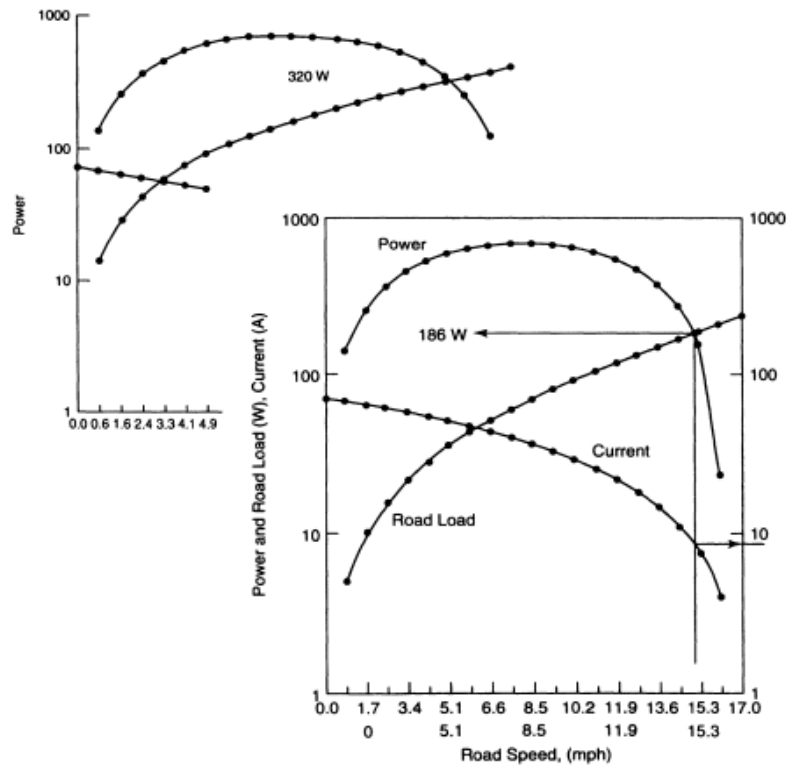
Studi Dagang Pemilihan Motor Data perwakilan motor ditunjukkan pada Gambar 6.5 untuk tiga jenis motor sepeda listrik. Data motor dari produsen atau pemasok dapat diperoleh dalam berbagai format. Perancang kemudian harus menerapkan data ini seperti pada Bab 2 untuk setiap motor dengan pemilihan roda gigi yang sesuai untuk operasi di dekat efisiensi operasi puncak motor. Diasumsikan bahwa ini telah dilakukan untuk setiap jenis motor dan motor B telah dipilih.



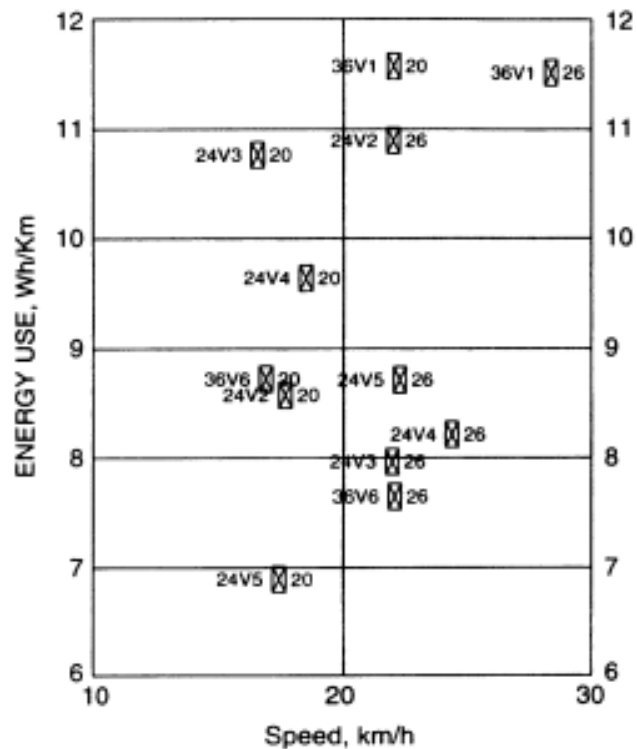
**Gambar 6.5** Data representatif motor untuk tiga jenis motor sepeda listrik.

Motor B, motor hub, dipilih untuk diselidiki lebih lanjut. Gambar 6.6 menunjukkan contoh data beban jalan untuk kemiringan jalan 0 dan 2 yang ditumpangkan ke output daya pabrikan dan data arus motor. Pabrikan memiliki beberapa varietas dalam seri motor yang sama. Gambar 6.7 menunjukkan hasil penerapan beban jalan ke eadh motor seri. Nilai di sebelah kiri setiap titik mengidentifikasi motor terlebih dahulu dengan peringkat tegangannya dan kemudian dengan nomor versinya. Nilai di sebelah kanan setiap titik data menunjukkan ukuran roda yang dipilih untuk penyelidikan.

Hanya ada satu kombinasi ukuran motor dan roda yang memenuhi atau melampaui kecepatan yang diinginkan. Namun, dalam hitungan detik, motor 24V4 yang dipasang pada roda 26-ineh menyediakan sekitar 24,5 kmlh dengan sekitar dua pertiga penggunaan energi. Adalah tepat untuk kembali ke pabrikan motor untuk meminta versi baru dengan perubahan desain untuk mendapatkan kemudahan 1 persen dalam kecepatan. Sebelum melakukan proeeding, performa motor harus ditentukan untuk perjalanan menanjak. Ditemukan bahwa untuk kelas 2 perent, diperlukan daya keluaran motor 320 W.



**Gambar 6.6** Contoh data beban jalan untuk tingkat jalan 0 dan 2 persen ditumpangkan ke contoh keluaran daya dan data arus motor.



**Gambar 6.7** Hasil penerapan beban jalan ke setiap motor dari berbagai model 24- dan 36-V. Nilai di sebelah kiri setiap titik mengidentifikasi motor terlebih dahulu dengan peringkat tegangannya dan kemudian dengan nomor versinya. Nilai di sebelah kanan setiap titik data menunjukkan ukuran roda yang dipilih untuk penyelidikan.

Peringkat motor memiliki daya keluaran 375 W untuk membatasi suhu pengoperasian di bawah 150 °C. Perancang sekarang dihadapkan dengan membuat pilihan kontrol motor. Pilihannya adalah antara (1) mematikan motor, (2) tergantung pada pengendara untuk merasakan kelebihan beban motor untuk kemiringan lebih dari 2 persen di mana pengendara kemudian akan menambahkan tenaga pedal sampai motor tidak tampak kelebihan beban, dan (3) menggunakan sistem penginderaan dan kontrol torsi gaya pedal yang memungkinkan pengendara dan motor berbagi daya yang dibutuhkan untuk menempuh perjalanan menanjak. Bagian Baterai Studi Dagang Baterai sepeda dapat memiliki standar yang dapat diterima hidup jika sebagian kecil dari kapasitasnya habis pada setiap perjalanan. Namun, ini membutuhkan beban kapasitas baterai yang tidak terpakai pada sepeda listrik. Apa yang dibutuhkan untuk studi perdagangan baterai adalah hubungan antara kedalaman pelepasan dan umur yang diperlukan 1250 siklus untuk baterai. Hubungan seperti itu ada untuk baterai NiCd [Persamaan. (3.2)]. Namun, serangkaian tes ekstensif belum dipublikasikan untuk jenis baterai lainnya. Untuk jenis asumsi lain ini akan diperlukan. Untuk tujuan contoh studi perdagangan ini, akan diasumsikan bahwa masa pakai baterai berubah pada tingkat yang sama dengan kedalaman pengosongan seperti NiCd yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, tetapi dengan offset yang ditentukan oleh titik data masa pakai tertentu yang tersedia untuk yang lain. baterai.

Pengujian terbaru menunjukkan masa pakai lebih dari 17.000 siklus pengisian-pengosongan pada kedalaman pengosongan 30 persen di setiap siklus untuk baterai lithium ion. Baterai Lead-Acid kehilangan semua kapasitas penyimpanan energinya dalam waktu kurang dari 100 siklus pengisian-pengosongan jika baterai benar-benar habis setiap kali. Persamaan (3.2) digunakan tetapi dengan eksponen yang direvisi untuk masing-masing baterai ini. Daripada konstanta eksponen 4,7, nilai 4,94 digunakan untuk ion lithium dan 4,38 untuk baterai timbal-asam yang disegel. Karakteristik kehidupan NiMH diasumsikan sama dengan NiCd. Menggunakan Bq. (3.2) untuk baterai NiCd, seseorang dapat memprediksi masa pakai 1250 siklus jika habis tidak lebih dari 65 persen. Baterai ini kemudian harus mengandung energi  $400 \text{ Wh}/0.65 = 615 \text{ Wh}$ . Untuk laju pengosongan sekitar 0.8C (laju pengosongan 1,25 jam), diharapkan massa spesifik baterai sebesar 48 Wh/kg; lihat Gambar 6.4. Oleh karena itu baterai NiCd 13 kg akan diperlukan. Prosedur ini diulang untuk setiap jenis baterai menggunakan konstanta eksponen yang diasumsikan di atas untuk jenis baterai lainnya. Tabel 6.2 menunjukkan hasilnya.

**Tabel 6.2** Contoh Studi Perdagangan Baterai

Battery Type	Depth of Discharge <sup>a</sup> (%)	Battery Energy (Wh)	Energy Density (Wh/kg) <sup>b</sup>	Battery Mass (kg) <sup>c</sup>	Energy Vol Density (Wh/L) <sup>b</sup>	Battery Volume (liters)
SLA <sup>d</sup>	45	889	28	31.7	70	12.7
NiCd	65	615	48	12.8	140	4.4
NiMh	65 <sup>e</sup>	615	70	8.8	235	2.6
Li Ion	75	533	175	3.0	250	2.1
Zinc-air	70	571	250	2.3	200	2.9

Battery Type	Preliminary Size <sup>f</sup> (cm)			Relative Cost	Power Density (W/kg) <sup>g</sup>	Peak Draw (W)
	Height	Width	Length			
SLA <sup>d</sup>	11.7	23.3	46.6	1	130	4127
NiCd	8.2	16.4	32.8	3.5	150	1923
NiMh	6.9	13.8	27.6	4.1	200	1758
Li Ion	6.4	12.9	25.7	5.6	600	1829
Zinc-air	7.1	14.2	28.4	6.9 <sup>i</sup>	200	457

- Untuk mencapai setidaknya 1250 siklus hidup.
- Pada tingkat debit 0,8C.
- Untuk mendapatkan energi yang dapat dikirim sebesar 400 Wh.
- Lead-Acid tertutup.
- NiMH diasumsikan memiliki karakteristik siklus hidup yang sama dengan NiCd.
- Berdasarkan rasio 1, 2, dan 4 dimensi.
- Berdasarkan kemampuan maksimum untuk berat baterai.
- Ditingkatkan ke atas karena tidak dapat mencapai 1250 siklus hidup. Diskalakan oleh 1250/1200.

### Mengembangkan Spesifikasi Persyaratan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Molo, Spesifikasi Sebaiknya bicarakan dengan produsen atau pemasok motor untuk pengadaan motor yang paling sesuai dengan desain sistem. Seperti dijelaskan dalam Bab 5, motor dijelaskan dalam puluhan torsi, daya keluaran, dan efisiensi sebagai fungsi dari kecepatan poros motor. Tenaga dan kecepatan sepeda adalah parameter pengendara sepeda. Parameter ini dapat dikaitkan dengan torsi dan kecepatan poros seperti yang dijelaskan dalam Bab 5. Torsi dapat dinyatakan sebagai fungsi dari daya yang disalurkan ke roda, diameter roda, dan kecepatan gerak dengan hubungan, yang diulang dari Bab 2:

$$T = Pd/55.63 S \quad (\text{N-m}) \quad (6.1)$$

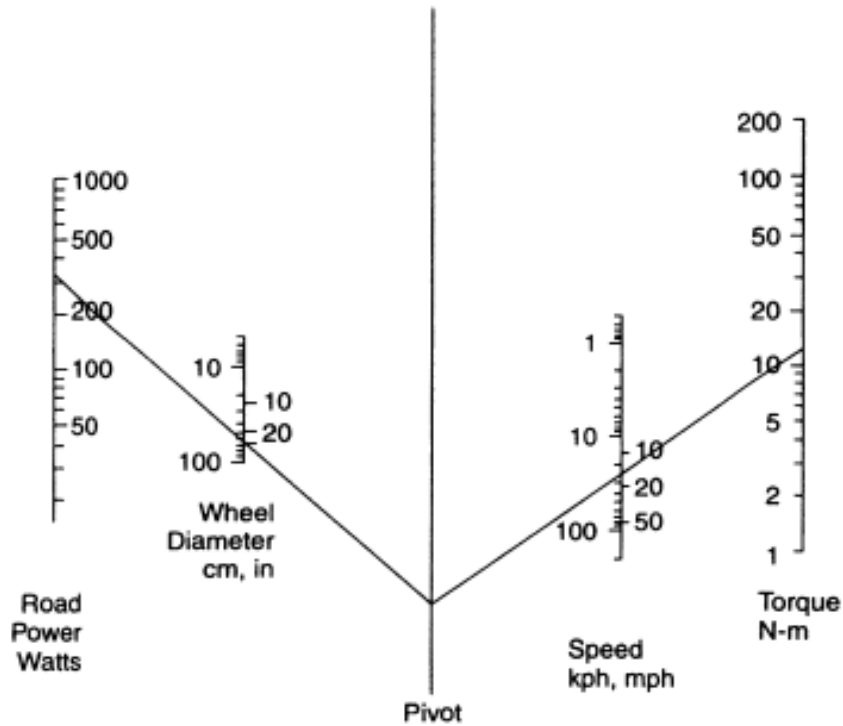
di mana P adalah daya dalam watt, d adalah diameter roda dalam sentimeter, dan S adalah kecepatan perjalanan dalam kilometer/jam. Gambar 6.8 menunjukkan solusi umum untuk persamaan ini dalam bentuk anornograf. Dengan grafik ini seseorang dapat menentukan satu nilai dari empat dengan pengetahuan tentang tiga lainnya. Contoh motor hub di atas digunakan untuk menentukan torsi motor yang diinginkan untuk kondisi kemiringan 2 persen.



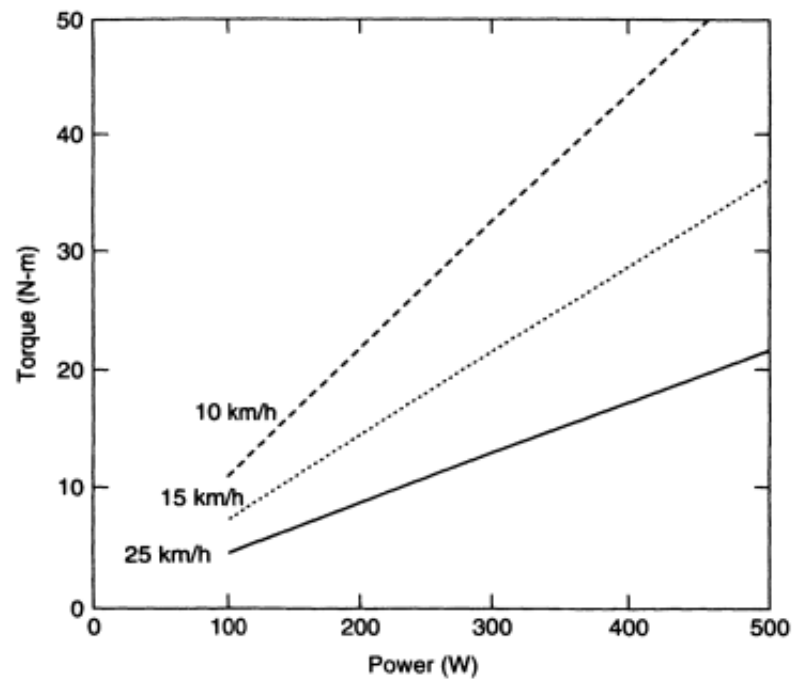
Jawaban sekitar 12 N-rn ditunjukkan untuk daya keluaran motor 320 W, diameter roda 66 cm, dan kecepatan perjalanan 25 km/h. Gambar 6.9 dan 6.10 menunjukkan hasil yang lebih spesifik untuk dua diameter roda biasa.

Tingkat rotasi roda diberikan oleh Persamaan. (5.9):

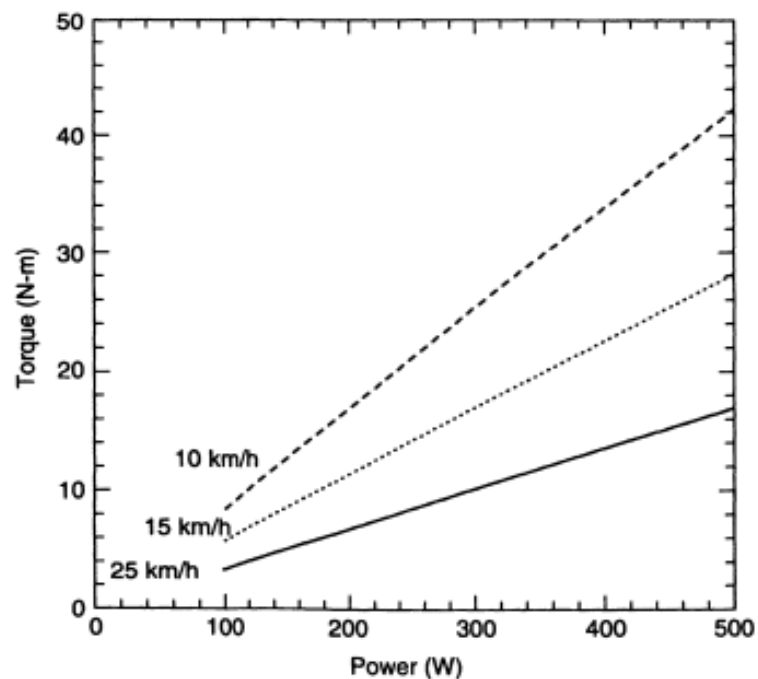
$$\omega = 55.63S/d_{cm} \text{ (rad/s)}$$



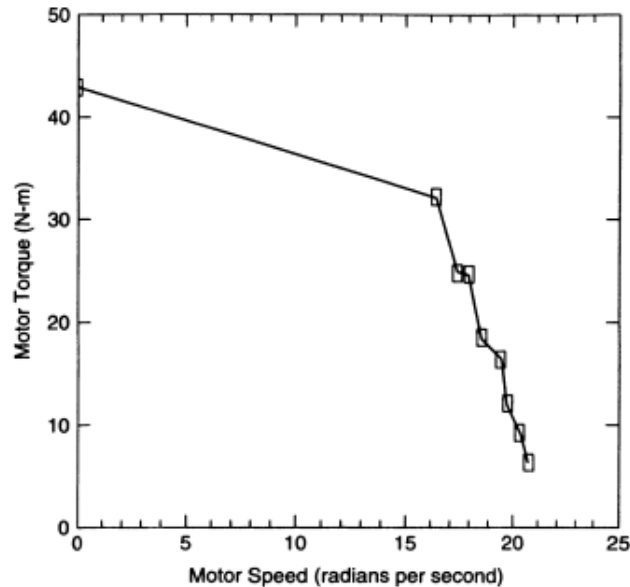
**Gambar 6.8** Solusi umum Nomograph untuk konversi antara tenaga jalan dan torsi. Dengan grafik ini seseorang dapat menentukan satu nilai dengan pengetahuan tentang tiga lainnya. Garis lurus digambar di antara titik-titik pada sumbu berskala di setiap sisi perpotongan garis pivot seperti yang diilustrasikan. Misalnya, garis yang ditarik antara daya jalan 320 W dan diameter roda 66 cm menghasilkan persimpangan pada garis pivot. Garis lurus lain yang ditarik antara torsi roda 12 N-rn dan persimpangan pada garis poros itu memberikan jawaban untuk kecepatan kendaraan 25 km/jam.



**Gambar 6.9** Mengubah daya dan kecepatan menjadi torsi untuk roda 51-ern (20 inci). Kondisi parameter yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.8.



**Gambar 6.10** Mengonversi daya dan kecepatan menjadi torsi untuk roda 66-em (26 inci). Kondisi parameter yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.8.



**Gambar 6.11** Contoh spesifikasi kecepatan torsi motor.

Prosedur ini diulang untuk berbagai beban jalan untuk mendapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 6.11. Delapan titik data menunjukkan hasil untuk kemiringan jalan 0 hingga 6 persen dalam kisaran 16 hingga 21 rps. Hasil ini menggabungkan penyelidikan penggunaan diameter roda 51 cm dan 66 cm. Titik 0 rps (torsi berhenti) didasarkan pada arus maksimum yang diizinkan motor untuk menarik dan/atau percepatan yang diinginkan. Bab 2 mengacu pada nilai 43 N-m untuk percepatan  $1 \text{ m/s}^2$ . Nilai tersebut dibawa ke depan untuk contoh ini dan ditunjukkan pada Gambar 6.11.

Pada titik ini dalam desain sistem, akan bermanfaat untuk mencapai desain yang seimbang dengan menghubungi pabrikan motor dan mendiskusikan spesifikasi motor awal. Pengalaman mereka dengan karakteristik motor dapat digunakan untuk meningkatkan spesifikasi. Penyempurnaan ini dikombinasikan dengan putaran lebih lanjut dari prediksi kinerja sepeda yang menekankan parameter kinerja yang lebih ekstrem seperti kemiringan jalan yang lebih besar, waktu yang lebih lama pada kemiringan tertentu, akselerasi yang lebih besar atau lebih kecil, dan penggunaan pengisian baterai regeneratif atau tidak. Keputusan yang dibuat dengan menggunakan hasil ini kemudian akan diumpungkan kembali ke topik lain dalam desain sistem dengan perubahan konsekuensi pada motor dan spesifikasi komponen lainnya tergantung pada kompromi yang diterima bersama di masing-masing.

Spesifikasi Baterai Spesifikasi baterai dapat dikembangkan bersamaan dengan pengembangan spesifikasi untuk kinerja yang diinginkan secara keseluruhan dan spesifikasi motor. Keberhasilan atau kegagalan sepeda listrik sebagian besar bergantung pada kinerja dan biaya baterai. Kami telah memberikan banyak contoh kegagalan kendaraan listrik abad kedua puluh karena jarak tempuh yang pendek.

Tabel 6.2 data memberikan dasar untuk membuat spesifikasi baterai. Dimensi baterai uji coba, menggunakan distribusi ukuran 1: 2: 4, telah sesuai dengan desain sepeda uji coba dan dapat diterima. Seperti yang kita temukan di Bab 2, arus motor untuk contoh motor 36-V adalah 32 A sesuai dengan penarikan daya dari baterai 1152 W. Kita melihat bahwa tanpa meningkatkan ukuran baterai zinc-air yang berukuran pada Tabel 6.2 baterai ini tidak akan

mampu memberikan kekuatan puncak ini. Dapat dilihat bahwa massanya perlu ditingkatkan dengan faktor 2,5 menjadi 5,8 kg.

Masa pakai baterai zine-air yang dapat diisi ulang dibatasi hingga sekitar 200 siklus dalam kisaran 70 hingga 100 persen kedalaman pelepasan. Tidak ada nilai yang jelas untuk siklus hidup untuk kedalaman pelepasan yang lebih rendah. Oleh karena itu, baterai ini perlu diganti 6,25 kali lebih sering dibandingkan dengan baterai lain dan tidak memenuhi masa pakai yang dibutuhkan eustomer selama 8 tahun. Namun, seperti yang ditunjukkan di Bab 3, beberapa baterai zine-air dapat dibuat sedemikian rupa sehingga hanya bubuk zine yang diganti. Maka, dalam pengertian ini, baterai itu akan dikosongkan hingga hampir 100 persen setiap kali, dan digunakan lebih seperti "tangki bensin". Tidak ada data biaya yang dipublikasikan untuk mendukung perkiraan biaya untuk fitur ini.

Baterai timbal-asam yang disegel tidak dapat dibuang ke kedalaman yang serupa dengan baterai NiCd, NiMH, dan Li ion untuk masa pakai siklus yang sama. Akibatnya, untuk mencapai umur eyele yang sama, kelebihan massa baterai harus dibawa oleh bicycle. Massanya untuk masa pakai yang sama adalah 2,5 kali lebih besar dari baterai berikutnya, NiCd, pada Tabel 6.2. Tampaknya pada tahap awal ini baterai NiCd, NiMH, dan Li ion adalah pesaing untuk seleksi. Persaingan adalah perdagangan khas antara ukuran dan massa yang berbanding terbalik dengan biaya. Pada titik ini, akan bermanfaat untuk mendiskusikan pertukaran antara berbagai faktor dengan produsen baterai untuk mendapatkan perdagangan terbaik antara ukuran, biaya, dan kinerja.

### **Mengembangkan Rencana Verifikasi Desain Detail**

Rencana Verifikasi Desain Motor Rencana verifikasi desain motor terdiri dari, pertama, pengukuran dimensi dan berat untuk memverifikasi bahwa itu sesuai dengan gambar. Kemudian, pengukuran eharacteristik listrik seperti penarikan arus tanpa beban dan hambatan listrik akan mengikuti. Akhirnya, pengukuran, seperti diuraikan dalam Bab 7, dari daya keluaran mekanis akan memberikan verifikasi akhir bahwa motor bekerja sesuai dengan persyaratan yang ditentukan. Keberangkatan dari yang ditentukan harus diumpankan ke proses desain untuk ditentukan jika dapat diterima. Rencana verifikasi diajukan untuk mendapatkan persetujuan dari tim desain, termasuk pemasok.

Rencana Verifikasi Baterai Rencana verifikasi baterai harus mengikuti ide yang sama yang disajikan untuk motor; pertama, pengukuran dimensi dan berat yang diikuti dengan pengukuran untuk menentukan daya dan energi seperti yang ditentukan disediakan oleh baterai. Karakteristik masa pakai baterai mungkin paling baik ditentukan di pabrik baterai.

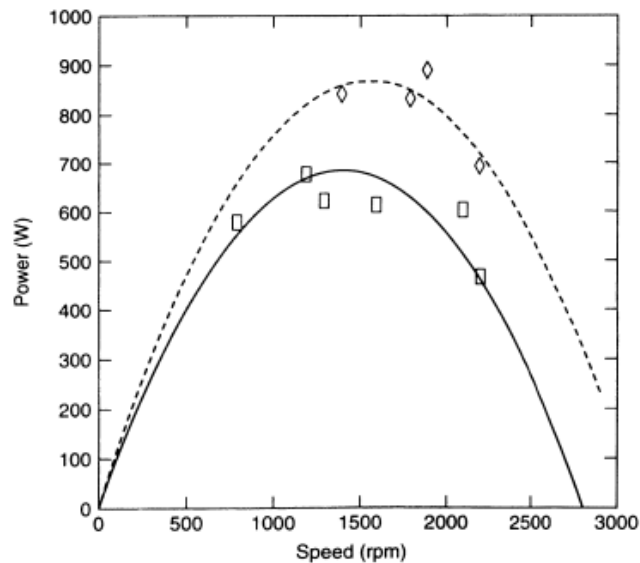
### **Pengujian Subsistem**

Banyak sepeda listrik yang dirancang dan dijual untuk umum telah menghilang dari pasar. Penyebab biasanya adalah kegagalan komponen yang dapat diperbaiki dalam proses desain dan pengujian sepeda. Setelah memilih calon motor, kami melakukan tes untuk menentukan apakah motor benar-benar akan tampil sesuai spesifikasi. Hasil pengujian daya keluaran motor yang diperoleh dengan menggunakan metode rem Prony, yang dijelaskan pada Bab 7, ditunjukkan pada Gambar 6.12. Jika penyebaran data tentang daya keluaran yang diharapkan tidak dapat diterima, maka metode pengujian yang lebih baik perlu diselidiki. Perangkat uji dinomotor yang dikalibrasi secara menyeluruh di pabrikan motor dapat menjadi alternatif yang lebih baik.

Menyaksikan pengujian tersebut dan menyetujui hasil yang diperoleh di pabrik dapat menjadi solusi yang lebih hemat biaya.

### Integrasi dan Pengujian Sistem

Daripada mengambil sepeda prototipe di luar ruangan untuk diuji, fasilitas pengujian dalam ruangan mungkin dipertimbangkan di sini. Mungkin perlengkapan dudukan uji dapat digunakan yang mencakup dinamotor roda yang dapat mensimulasikan berbagai beban motor, peralatan pengujian baterai bersamaan, tampilan bersamaan, dan pengujian sistem kontrol. Efek air dan cuaca harus dipertimbangkan pada saat ini.



**Gambar 6.12** Contoh pengukuran keluaran daya motor dibandingkan dengan nilai teoritis.

### Demonstrasi Bidang Sistem

Pada akhirnya, kinerja sepeda perlu didemonstrasikan di lingkungan dunia nyata. Desainer juga harus mempertimbangkan pengujian sampel sepanjang tahun dengan berbagai pengendara untuk mempelajari efek jangka panjang yang tidak terlihat dalam hasil pengujian yang lebih langsung.

## BAB 7

### PENGUKURAN KINERJA

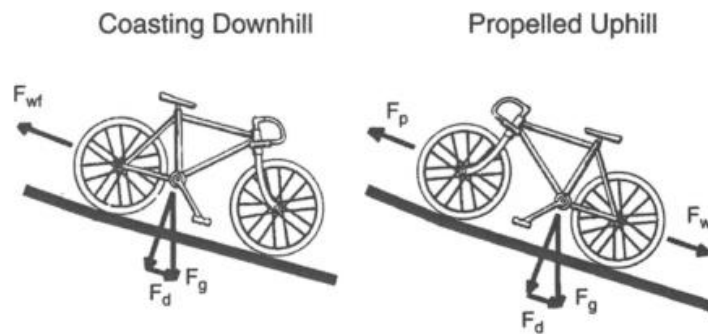
Sampai batas tertentu apakah Anda pengguna sepeda listrik, pemilik baru, vendor, perencana, atau perancang, Anda akan tertarik untuk menguji dan mengukur beberapa aspek sepeda listrik. Kami menjelaskan di sini prinsip-prinsip yang terlibat dalam mengukur parameter kinerja utama yang menarik. Pertama, akan dijelaskan pengukuran efisiensi tenaga penggeraksepeda sehingga Anda dapat memahami seberapa jauh baterai akan memberi daya pada sepeda. Pengetahuan tentang tenaga motor dan efisiensinya juga dibahas. Termasuk adalah pengukuran kapasitas baterai. Kami membahas metode pengumpulan data untuk membantu Anda dalam memilih metode apa yang akan digunakan.

#### 7.1 MENGUKUR DAYA PROPULSI UNTUK MENENTUKAN EFISIENSI PROPULSI

Bab 2 menyajikan cara analitis untuk menentukan daya propulsi. Di sini kami menyajikan metode empiris. Pengukuran dapat digunakan untuk memperbaiki beberapa konstanta yang digunakan dalam metode analitik. Misalnya, kami awalnya menggunakan koefisien hambatan aerodinamis 1,4 untuk sepeda dan pengendara sepeda. Kami menemukan bahwa koefisien 1,0 menghasilkan konsumsi daya yang lebih sesuai dengan nilai yang diukur selama pengujian kami.

Kunci pengujian kami adalah kecepatan terukur sepeda dan pengendara saat meluncur menuruni lereng konstan pada hari yang tenang. Kemudian kami menggunakan motor untuk mendorong sepeda dan pengendara ke atas bukit dengan kecepatan yang sama. Kami mengukur kemiringan dengan level surveyor. Dengan tidak adanya angin sepeda mencapai kecepatan tertinggi di mana windage-and-friction drag tepat menyeimbangkan gaya dari komponen maju gravitasi, Gambar 7.1. Kemudian kami kembali menanjak, menggunakan tenaga yang cukup untuk membuat sepeda bergerak dengan kecepatan yang sama seperti saat meluncur ke bawah. Daya menanjak yang diperlukan diperoleh dari dua gaya yang sama yang diperlukan,  $F_d$  dan  $F_{wf}$  ditunjukkan pada Gambar 7.1. Salah satunya adalah gaya yang mengatasi windage dan gesekan pada kecepatan perjalanan,  $F_{wf}$ , dan yang lainnya adalah gaya yang menggerakkan sepeda dan massa pengendara menanjak,  $F_d$ . Artinya,  $F_p = F_{wf} + F_d$ .

Perhatikan bahwa uji luncur menurun  $F_{wf} = F_d = F_g \sin \varphi = F_g G$ , di mana  $G$  adalah derajat yang dinyatakan sebagai pecahan, dan sudut kemiringannya adalah  $\varphi$ . Oleh karena itu, setelah menggantikan  $F_d$  untuk  $F_{wf}$ , kita temukan bahwa  $F_p = 2 F_{wf}$ . Jadi, daya yang diberikan oleh roda penggerak sepeda dalam perjalanan menanjak adalah dua kali daya yang dibutuhkan untuk mengatasi angin dan gesekan dan adalah  $P_p = F_p V_p$ , di mana  $V_p$  adalah kecepatan meluncur konstan.



**Gambar 7.1** Gaya yang terlibat dalam pengukuran daya propulsi.

Sebagai contoh, pastikan bahwa sepeda dengan pengendara berbobot 122 kg (2691b) meluncur menuruni kemiringan konstan dengan kemiringan 1,78 derajat (kemiringan 3,0 persen) mencapai kecepatan tertinggi 5,5 m/s (20 km/jam) (12 mi/h). Gaya  $F_d$  untuk kasus ini adalah  $122 \times 0,03 = 3,66$  kg, yaitu  $9,807 \times 3,66 = 36$  N (newton). Lihat Lampiran untuk faktor konversi. Daya dorongnya adalah  $P_p = 2F_d V_p = 2 \times 36 \text{ N} \times 5,5 \text{ m/s} = 396 \text{ W}$ .

Baterai sepeda harus menyalurkan tenaga roda ditambah listrik dan kerugian mekanis. Metode pengujian di atas menghilangkan efek dari beberapa kerugian mekanis seperti tahanan gelinding. Namun, kerugian propulsi, seperti yang ada di penggerak roda dan di dalam motor, tidak dibatalkan. Kita dapat menyatakan efek kerugian ini sebagai efisiensi propulsi, yang kita anggap sebagai efisiensi sistem. Efisiensi sistem ini sama dengan  $P_b / E_p I_p$ , dimana  $P_b$  adalah daya yang ditentukan dari pengujian di atas. Tegangan,  $E_p$ , dan nilai arus,  $I_p$  adalah yang dicatat selama perjalanan menanjak.

Efisiensi sistem dapat diidentifikasi lebih lanjut dari komponen efisiensi motor, efisiensi sistem kelistrikan, dan efisiensi sistem penggerak. Pengukuran atau analisis terpisah dapat mengevaluasi setiap komponen untuk tujuan memahami apa yang penting untuk meningkatkan kinerja. Efisiensi motor dapat diukur dalam tes terpisah atau ditentukan dari data pabrik. Kerugian sirkuit dapat dihitung dari data yang disajikan dalam tabel kawat. Rugi-rugi pensaklaran, baik keadaan mekanis atau padat, dapat ditentukan dari data pabrik. Kerugian konektor juga dapat ditemukan dalam manual referensi.

### Sumber Kesalahan

Setiap pengukuran memiliki kesalahan yang terkait dengannya. Dalam hal ini setiap istilah yang menggambarkan gaya dan daya yang terlibat dalam penggerak sepeda listrik tidak tepat. Kita hanya bisa berharap untuk menerima apa yang masuk akal. Untungnya, dalam bidang perjalanan kita tidak perlu terlalu teliti karena masih banyak faktor utama lain yang mempengaruhi biaya perjalanan. Tampaknya bagi kami bahwa kesalahan akhir sebesar 5 persen harus dapat diterima. Jika daya 250 W dianggap dapat diterima untuk penggerak sepeda, kesalahan dalam 13 W masuk akal. Kami mendefinisikan kesalahan di sini sebagai nilai rms (root mean square), yang sesuai dengan satu standar deviasi dari nilai rata-rata kesalahan terdistribusi Gaussian. Ini harus menjadi kasus untuk situasi kita di mana kita memiliki banyak koleksi sumber kesalahan dengan satu pengecualian. Pengecualian adalah efek angin angin. Untuk semua pengukuran lain tampak bagi kita bahwa mereka dapat digabungkan dengan cara yang tepat. Kesalahan rms total adalah akar kuadrat dari jumlah kuadrat dari setiap kesalahan komponen.

Perhatikan bahwa gaya propulsi yang diperlukan untuk mengatasi hambatan udara bervariasi sebagai kuadrat dari kecepatan relatif sepeda terhadap angin kepalanya. Tenaga penggerak yang diberikan ketika ban menyentuh tanah bervariasi secara langsung dengan kecepatan perjalanan di atas tanah. Sebagai contoh, sebuah sepeda yang melaju dengan kecepatan 10 m/s menjadi angin kencang 2 m/s dapat membutuhkan daya penggerak 290 W. Sepeda yang sama yang melaju dengan kecepatan 7 m/s ke arah angin 5 m/s hanya membutuhkan 203 W. Kedua pengendara sepeda akan merasakan udara 12 m/s yang sama di wajah mereka saat mereka bersepeda.

Sumber kesalahan yang penting dapat berupa perubahan kecepatan udara 1-m/s, yang sulit diukur selama uji coba karena kecepatan angin lokal mungkin tidak konstan sepanjang rute uji coba. Misalnya, pengendara sepeda yang berkendara dengan kecepatan 10 m/s di udara yang sangat tenang membutuhkan tenaga penggerak 198 W. Asumsikan bahwa dia mempertahankan kecepatan 10-m/s nya tetapi memasuki head wind 1-m/s. Kemudian konsumsi dayanya naik menjadi 243 W. Pengujian berulang dan analisis data yang cermat diperlukan untuk mengurangi efek sumber kesalahan. Analisis statistik dan penilaian yang dikombinasikan dengan perbandingan dengan nilai-nilai teoretis akan membantu dalam mengidentifikasi data "terluar" untuk diabaikan, yaitu data yang jauh dari norma.

Meskipun kami menyebutkan kesalahan total 5 persen, kami tidak bermaksud menyiratkan kecerobohan dalam pengukuran. Secara teoritis, jika ada 10 komponen yang masing-masing memiliki kesalahan yang sama, kesalahan yang diijinkan untuk masing-masing adalah sekitar sepertiga dari 5 persen total kesalahan, yaitu 1,6 persen kesalahan yang diijinkan untuk masing-masing. Kasus umum adalah bahwa setiap komponen dari  $n$  komponen harus memiliki kesalahan tidak lebih dari total kesalahan yang diijinkan dibagi dengan akar kuadrat dari jumlah komponen tersebut. Ini dimaksudkan sebagai pedoman. Tidak masuk akal untuk menganggap semua komponen memiliki kesalahan yang sama. Jika itu penting, seseorang harus melakukan analisis kesalahan yang lebih menyeluruh.

Ukuran, bentuk, dan postur tubuh pengendara sepeda mempengaruhi koefisien drag. Perubahan postur tubuh antara bagian tes yang menurun dan menaik dapat mengubah hasilnya. Pengukuran berulang dengan bobot pengendara yang berbeda dan pakaian dapat digunakan untuk mengurangi kesalahan.

### **Menemukan Koefisien Drag**

Pengujian downhill/uphill yang disarankan menyediakan data untuk menghitung gaya hambatan udara, yang merupakan salah satu komponen windage dan gesekan ( $F_{wf}$ ). Namun, salah satu harus menghapus komponen rolling resistance. Pengukuran kami memastikan bahwa  $F_{wf}$ , hambatan udara dan kerugian gesekan, sama dengan komponen gaya gravitasi menuruni bukit, yang kami tunjukkan di atas sebagai produk dari massa sepeda dan pengendara serta kemiringan jalan. Pengukuran terpisah mengikuti prosedur yang diberikan dalam Bab 2 tahanan gelinding atau datanya mungkin cukup. Mengurangi rolling resistance dari  $F_{wf}$  menentukan hambatan udara. Mengetahui kekuatan hambatan udara kita dapat menyimpulkan produk dari area frontal dan koefisien hambatan; lihat Bab 2. Kami menentukan penampang bidang frontal dari foto, baik digital, video, atau film, yang diambil dari pengendara dan sepeda secara langsung beserta standar panjangnya. Memperbesar foto-foto tersebut akan membantu dalam mendapatkan penentuan yang akurat dari daerah



frontal. Membagi produk deduksi dari area frontal dan koefisien drag dengan area frontal menentukan koefisien drag.

## 7.2 MENGUKUR EFISIENSI MOTOR TERMASUK PENGUKURAN DAYA MOTOR

Meskipun efisiensi motor bisa tinggi, bahkan lebih besar dari 90 persen, rentang kondisi perjalanan yang luas memerlukan kecepatan motor yang sering kali melampaui rentang operasi efisiensi tinggi motor. Karena kita tidak dapat mengasumsikan efisiensi tinggi, dan dengan demikian mengabaikannya dalam pengoperasian sepeda kita, kita harus tahu apa itu. Meskipun pabrikan motor memiliki data ini, data tersebut mungkin tidak tersedia. Biasanya, ukuran efisiensi motor adalah bidang khusus, dan untuk hasil terbaik sebaiknya diserahkan kepada ahli motor. Kami hadir di sini, garis besar teknik pengukuran yang dapat diterapkan oleh non-ahli.

### Daya dan Efisiensi Output Motor

Pengukuran efisiensi motor memerlukan pengukuran daya input dan output motor. Efisiensi ditentukan oleh persamaan:  $\eta = 100 \times P_{out} / P_{in}$ , di mana  $\eta$  dinyatakan sebagai persentase,  $P_{out}$  adalah daya keluaran, dalam watt, dan  $P_{in}$  adalah daya masukan dalam watt. Daya input adalah produk dari arus dan tegangan pada terminal listrik motor. Daya keluaran diperoleh dengan mengukur kecepatan dan torsi yang dihasilkan motor. Namun, terkadang daya keluaran ini diubah menjadi tegangan dan arus yang mewakili daya mekanik. Contohnya adalah dinamometer yang merupakan generator listrik terkalibrasi yang memberikan beban resistif. Beban resistif menghilangkan output daya motor yang diuji. Amperemeter dan volt meter, atau yang setara, menunjukkan daya yang mengalir ke beban resistif.

Dengan ekuivalen yang kami maksud adalah arus dan tegangan yang diproses secara digital yang, ketika dikalikan bersama-sama, memberikan nilai daya yang secara akurat sesuai dengan daya yang dikirimkan pada poros motor yang sedang diuji. Untuk nonahli kami menyarankan metode pengukuran uji rem prony.

Metode ini menggunakan gesekan pada poros motor sementara poros memberikan gaya yang terukur. Salah satu cara untuk mencapai ini adalah dengan menggunakan sabuk statis dan katrol yang dipasang pada poros motor. Setiap ujung sabuk statis memiliki alat pengukur tegangan antara ujung sabuk dan benda yang stabil, seperti lantai atau meja bangku uji. Beberapa cara penyesuaian tegangan memungkinkan memvariasikan beban mekanis pada motor. Untuk setiap penyetelan dua gaya tegangan, kecepatan motor dicatat serta nilai tegangan dan arus input motor yang sesuai.

Suatu cara untuk mendinginkan katrol dan sabuk kemungkinan akan diperlukan. Jika tidak, peralatan perlu mendingin secara alami di antara pengaturan tegangan. Penggunaan sistem akuisisi data digital memungkinkan pengumpulan data yang cepat dan memungkinkan berbagai penyesuaian tegangan tanpa menggunakan pendinginan. Pengulangan tes akan meningkatkan akurasi pengukuran.

Ingat dari Bab 3 bahwa daya untuk perangkat berputar adalah  $P = T\omega$ . Untuk daya dalam watt,  $T$  dinyatakan dalam newton, dan  $(J)$  dinyatakan dalam radian/detik. Untuk metode sabuk dan puli,  $T$  adalah selisih antara dua nilai tegangan bel statis dikalikan diameter gesekan puli. Lihat Lampiran untuk konversi nilai gaya dan kecepatan menjadi tenaga mekanik. Implementasi lain dari metode rem prony adalah memasang tromol dengan pita rem di

sekelilingnya ke poros motor. Jika motornya adalah "motor hub roda", maka hanya diperlukan pita rem eksterior. Lengan torsi terpasang pada rem.

Gaya pada lengan torsi diukur saat gesekan rem pada tromol atau hub divariasikan. Torsi dalam hal ini adalah gaya pada lengan torsi dikalikan radius dari sumbu motor ke titik gaya. Kecepatan motor dan tegangan input dan arus dicatat pada waktu yang sama seperti di atas, dan daya output motor dihitung. Daya input motor dihitung dengan cara yang dijelaskan di bawah ini. Jika diinginkan, rem serupa dapat diterapkan pada roda penggerak sepeda. Dengan pengetahuan tentang daya keluaran motor dan daya keluaran roda, ODe dapat menentukan efisiensi mekanisme penggerak roda. Dimungkinkan untuk menghilangkan penggunaan lengan torsi dengan menggunakan perangkat komersial yang dipasang di sekitar poros motor atau memasangkan poros ke beban. Perangkat ini dapat memberikan sinyal digital untuk perekaman. Monitor sel paksa atau pengukur regangan tersedia untuk mengukur gaya.

### **Penginderaan Kecepatan Motor**

Kecepatan poros motor dapat diukur dengan sensor putaran atau takometer. Tachometer dapat berupa perangkat mekanis atau elektrik. Pengukuran mekanis menggunakan penghitung rotasi dan pengatur waktu atau indikator Biddle. Pengukuran listrik dianjurkan karena dengan itu kecepatan motor dapat lebih akurat dikorelasikan dengan pengukuran gaya, tegangan input motor, dan pengukuran arus. Motor pengukur kecil yang dikalibrasi, digabungkan ke motor sepeda yang diuji dengan menggunakan serat atau cakram karet, memberikan sinyal listrik yang sebanding dengan kecepatan motor uji. Penginderaan rotasi dapat dilakukan dengan sensor optik atau magnetik.

Metode optik menggunakan dioda pemancar cahaya (LED) untuk menerangi disk yang berputar dan transistor optik untuk merasakan gangguan transmisi cahaya atau variasi refleksi selama rotasi objek. Sensor magnetik dapat digunakan untuk mengukur kecepatan dengan memberikan perubahan keluaran sinyal dari magnet yang berputar. Magnet dapat berupa individu atau kontinu dalam cincin magnet yang memiliki kutub utara dan selatan yang bergantian sepanjang keliling. Sensor dapat didasarkan pada keengganan variabel atau sensitivitas semikonduktor terhadap medan magnet. Penginderaan reluktansi variabel menggunakan kumparan pickup yang menghasilkan perubahan tegangan keluaran kumparan untuk perubahan medan magnet yang berputar. Penginderaan semikonduktor menggunakan perangkat efek Hall solid-state untuk menghasilkan perubahan tegangan output baik untuk medan magnet yang berputar atau interupsi dalam medan magnet statis yang dihasilkan oleh baling-baling baja yang berputar. Ada juga perangkat Hall effect dengan magnet kecil di dalamnya. Hal ini kemudian digunakan untuk merasakan eog berputar atau gigi gir.

### **Daya Masukan Motor**

Pengukuran daya input motor harus dilakukan pada terminal motor. Cara untuk mencapai pengukuran ini akan tergantung pada apakah desain motor adalah dc atau ac. Sebuah motor ac dapat dirancang untuk berjalan pada satu fase atau multifase ac. Untuk menghindari kesesuaian pengukuran motor dc ac atau brushless, kita mungkin ingin menghindari rugi-rugi inverter dan pengontrol dengan rugi-rugi motor hanya dengan mengukur arus dan tegangan yang berasal dari baterai. Namun, dalam melakukannya akan lebih baik menggunakan rms meter karena beban yang berubah-ubah terhadap waktu dapat

menyebabkan arus dan tegangan yang berubah-ubah pada terminal baterai. Juga mungkin ada sejumlah kecil energi baek yang mengalir ke baterai dari inverter.

Tegangan dan arus untuk sebuah motor listrik mencapai puncaknya pada waktu yang sedikit berbeda, dan kadang-kadang selama satu silinder, motif magnet mereka saling menekan. Meter rms atau alat yang setara diperlukan untuk mendapatkan ukuran yang tepat dari daya masukan motor. Dalam rms meter, elemen yang bergerak merespon dalam gerakan ke atas yang positif terhadap torsi yang dihasilkan oleh bagian negatif dan positif dari arus yang berubah. Dalam de meter biasa, gerakan yang dikurangi oleh bagian negatif dan positif dari arus bolak-balik saling tegak lurus dan meteran membaca nol.

Pengujian voltmeter, baik digital atau tidak, adalah untuk mengukur tegangan gelombang sinus dengan dan tanpa dioda secara seri dengan salah satu kabel pengukur. Meteran mengukur nilai rms yang sebenarnya jika tegangan dengan dioda dalam eireuit pengukuran adalah 70 persen dari pengukuran tanpa dioda [1]. Cara yang setara untuk menentukan daya rms adalah dengan wattmeter atau sistem akuisisi data digital seperti yang dibahas dalam Bab 7.3.1. Penggunaan metode wattmeter dibatasi oleh respons frekuensi atas meter. Wattmeter era sebelumnya dapat merespons frekuensi hingga sekitar 1 kHz. Namun, desain yang lebih baru dapat merespon frekuensi yang digunakan untuk menggerakkan motor multifase modem [2, 3]. Pengukuran daya input motor ke motor multifase memerlukan pertimbangan khusus. Untuk aplikasi eleetrie bieycle dapat diasumsikan 11 fase motor diseimbangkan. Dengan asumsi ini, pengukuran daya input ke satu fasa cukup, dan daya total adalah jumlah fasa dikalikan daya input ke fasa ODe.

Resistor indra arus adalah metode eommon yang menyediakan sarana untuk mengukur arus. Resistor sense memiliki resistansi kecil, biasanya kurang dari 1 ohm ( $\Omega$ ). Merasakan penurunan tegangan pada resistor memberikan informasi untuk menaikkan arus: penurunan tegangan pada resistor dibagi dengan resistansi. Resistan harus cukup kecil sehingga arus yang dipercepat tidak akan memanaskan resistor secara signifikan. TIDAK harus terlalu tinggi untuk mengurangi tegangan yang disuplai ke motor secara signifikan. Sebaliknya resistansi harus cukup tinggi untuk memberikan pengukuran yang akurat. Contohnya adalah 10 A mengalir melalui resistor indera 0,022-  $\Omega$ . Penurunan tegangan pada resistor, produk dari arus dan resistansi, akan menjadi 220 mV. Daya yang dihamburkan dalam resistor akan menjadi produk dari kuadrat arus dan resistansi, 2,2 W dalam contoh ini. Peringkat daya untuk resistor indera ini adalah 5 W. Pabrikan atau lembar data mereka harus berkonsultasi untuk aplikasi sehubungan dengan keakuratan resistansi dan perubahannya saat dipanaskan. Nilai rms arus dan tegangan harus ditentukan terlebih dahulu sebelum mengalikan kedua nilai tersebut.

### **7.3 MENGUKUR KARAKTERISTIK BATERAI**

#### **Pengumpulan Data**

Data dapat dikumpulkan dengan banyak cara sekarang. Metode asli tulisan tangan informasi data di atas lembaran kertas, buku catatan, atau formulir yang disiapkan secara khusus tentu tersedia. Untuk pengukuran kami di mana kami khawatir tentang mendapatkan satu set data yang kongruen, kami akan membutuhkan hingga empat orang untuk merekam

secara bersamaan apa yang terjadi dan menginformasikan pencatat data tentang nilainya. Prosedur ini sulit dan rentan terhadap kesalahan.

Langkah selanjutnya adalah menggunakan perekam grafik strip. Mereka bisa mahal dan mungkin tidak portabel. Pencatat data tanpa kertas mungkin memuaskan untuk memperoleh data kongmen. Namun, pencatat data tanpa kertas memiliki laju sampel yang relatif rendah dan mungkin memiliki memori solid-state yang terbatas. Mereka dibangun dari sirkuit berpemilik, membuat biaya pembelian dan biaya suku cadang relatif tinggi.

Saat ini, ada sistem akuisisi data yang disesuaikan untuk penggunaan komputer pribadi atau laptop yang menggunakan kartu plug-in atau lampiran port. Sistem akuisisi data berbasis komputer menggunakan kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak komputer dan peralatan pengkondisi sinyal yang mengumpulkan, menyimpan, dan memproses data untuk analisis, tampilan, dan pelaporan.

Perekam Strip Chart Perekam strip chart mungkin memadai untuk aplikasi laboratorium jika sudah dimiliki oleh penguji. Namun, mereka umumnya besar dan berat dan tidak dimaksudkan untuk penggunaan portabel. Mereka mengkonsumsi kertas dan pena yang mungkin tidak berfungsi. Selain itu, pena hanya dapat menyediakan perekaman monokrom, membuat sinyal yang tumpang tindih tidak dapat dibedakan. Mereka juga membutuhkan keakraban menyeluruh dengan konfigurasi unik dan prosedur operasi mereka dan dibangun dari sirkuit dan mekanisme berpemilik, membuat biaya pembelian dan biaya suku cadang relatif tinggi.

Sinyal uji yang memberi makan berbagai pena perekam harus dimodifikasi agar sesuai dengan rentang tegangan galvanometer dan penguat penggerak. Galvanometer inilah yang menyebabkan pena perekam bergerak sebagai respons terhadap sinyal uji yang direkam. Selanjutnya, frekuensi sinyal uji mungkin harus diterjemahkan berada dalam rentang frekuensi perekam. Sinyal uji digital perlu diubah menjadi sinyal analog dengan skala yang sesuai.

Data yang direkam pada grafik strip bisa sulit untuk direduksi menjadi bentuk yang mudah dianalisis. Salah satu kesulitannya adalah mengkorelasikan data dengan kejadian. Coretan cepat pada kertas cbart mungkin tidak terbaca. Data yang direkam mungkin tidak memiliki rentang dinamis yang cukup. Misalnya, mungkin mudah untuk melihat volt tetapi bukan nilai kecil dari sepersepuluh volt pada kertas rekaman. Kecepatan kertas perekam mungkin cukup untuk beberapa sinyal pengujian tetapi tidak untuk sinyal lainnya selama pengujian.

Data Digital Akuisisi data digital diimplementasikan bertahun-tahun yang lalu pada perangkat keras khusus yang menghabiskan biaya ribuan dolar. Sedikit atau 00 kemampuan akuisisi data digital tersedia di komputer pribadi (PCs) dan sistem yang lebih murah. Namun, banyak vendor sekarang menjual papan perangkat keras dan paket perangkat lunak yang menerapkan kemampuan akuisisi data digital yang sangat kuat. Akuisisi data adalah alat yang sangat umum dan diperlukan dalam teknologi teknologi saat ini. Sistem akuisisi data menangkap serangkaian sampel sinyal pada interval waktu tertentu.

Setiap sampel berisi informasi tentang sinyal pada waktu tertentu. Dengan mengetahui waktu yang tepat dari setiap konversi dan nilai sampel, seseorang dapat merekonstruksi sinyal sampel. Hal ini benar sejauh sinyal sampel cukup sering. Pengambilan

sampel harus terjadi setidaknya dua kali frekuensi sinyal, tetapi sinyal dapat direproduksi dengan lebih akurat jika sampel diambil pada frekuensi lima kali. Karakteristik unit yang diuji menentukan frekuensi sampling yang harus digunakan. Sinyal yang paling lambat kemungkinan adalah yang terkait dengan suhu. Selama perjalanan, sinyal yang lebih cepat seperti kecepatan dan permukaan jalan perlu direkam. Komponen elektronik pada sepeda cenderung menghasilkan sinyal frekuensi tertinggi. Khususnya ics elektron pengontrol motor, jika bentuk gelombang penggerak motor perlu dipantau, akan menjadi sumber frekuensi uji tertinggi. Bentuk gelombang ini dengan perubahan tegangan yang terjadi dalam mikrodetik akan membutuhkan frekuensi sampling dalam urutan megasamples per detik. Namun, ini adalah area untuk spesialis sirkuit. Untuk pengukuran torsi, mudah untuk melihat bahwa seseorang mungkin ingin mengetahui bagaimana torsi motor bervariasi dalam satu putaran. laju samplingnya adalah:

$$s = 6k R_{pm}/\alpha \quad (\text{samples/second}) \quad (7.1)$$

di mana  $k$  adalah konstanta yang mewakili seberapa setia sebuah gelombang harus direproduksi (disarankan 2,5 hingga 5),  $R_{pm}$  adalah laju putaran motor, putaran/menit, dan  $\alpha$  adalah perubahan rotasi antara sampel, derajat/sampel. Untuk perjalanan seseorang dapat menggunakan hubungan:

$$s = k\beta v_g/3.6 \quad (\text{samples/second}) \quad (7.2)$$

di mana  $k$  adalah seperti di atas,  $\beta$  adalah jumlah sampel per meter perjalanan, dan  $v_g$  adalah kecepatan perjalanan, kilometer/jam. Contohnya adalah untuk perjalanan dengan kecepatan 20 km/h, dengan kebutuhan untuk mendapatkan satu sampel untuk setiap jarak sumbu roda perjalanan sepeda. Dengan asumsi panjang wheelbase adalah 1.1 m, maka kita menemukan bahwa  $\beta = 1/11 = 0,91$  dan  $k = 1$  dalam contoh ini. Maka  $s = 5.05$  sampel per detik.

Jumlah bit biner yang digunakan dalam pengambilan sampel menentukan langkah-langkah inkremental dimana tegangan sinyal dapat dilaporkan. Komputer menggunakan nilai digital ini:

$$\delta V = V/2^b \quad (7.3)$$

di mana  $V$  adalah rentang tegangan sinyal, dan  $b$  adalah jumlah bit biner. Untuk 8 bit itu akan menjadi kenaikan  $V/256$  volt dan untuk 12 bit itu akan menjadi kenaikan  $V/4096$  volt.

Sinyal uji pada sumbernya dalam peralatan kemungkinan tidak cocok untuk koneksi langsung ke konverter analog-ke-digital (ND) yang digunakan untuk akuisisi data. Sinyal-sinyal ini mungkin perlu diperkuat, dilemahkan, atau dimodifikasi dengan cara lain. Misalnya, asumsikan A/D memiliki jangkauan fungsional 0 hingga 5 V. Jika sinyal uji memiliki rentang -10 hingga +10 V, maka perlu dilemahkan dengan faktor 4 dan mengimbangi nilai paling negatif

ke O. Yang terbaik adalah mengkondisikan setiap sinyal uji sehingga rentangnya sama atau sama. sedikit kurang dari kisaran A/D.

Sistem akuisisi data untuk digunakan dengan komputer mencakup unit antarmuka untuk antarmuka dengan komputer, memori data kontrol untuk menyimpan data kontrol yang terkait dengan kontrol untuk komputer; dan memori data file untuk menyimpan data file yang akan diperoleh oleh komputer. Sistem pemrosesan disediakan untuk mengontrol transfer data ke sistem memori komputer, yang memiliki hard drive atau memori flash, tergantung pada komputer yang digunakan.

Sebagian besar sistem akuisisi data digital yang tersedia di pasar untuk pes dan workstation serupa, serta laptop, memiliki paket perangkat lunak sendiri untuk memungkinkan perangkat keras vendor (papan plug-in, kabel, sensor, dll.) dikendalikan oleh komputer. Keuntungan dari setiap vendor yang menyediakan perangkat lunaknya sendiri adalah bahwa vendor kemudian memiliki kendali atas bagaimana perangkat keras diakses, dikendalikan, dan digunakan, sehingga memastikan operasi yang benar dari keseluruhan sistem akuisisi data digital. Perangkat lunak vendor dapat menjadi antarmuka yang baik untuk program akuisisi data digital lainnya jika digunakan, seperti program plotting, grafik, dan perekam data. Namun, perangkat lunak akuisisi data itu sendiri kemungkinan mencakup kemampuan merencanakan dan membuat grafik.

Salah satu kelemahan dari setiap vendor yang menyediakan perangkat lunak antarmuka akuisisi data digitalnya sendiri adalah interoperabilitas. Jika pengguna menyukai utilitas plot yang disediakan oleh paket akuisisi data digital vendor X, tetapi membutuhkan karakteristik kinerja papan plug-in vendor Y, hampir dijamin bahwa kedua bagian tersebut tidak akan bermain bersama. Dalam lingkungan terik saat ini, komputer baru yang lebih cepat keluar hampir setiap bulan, interoperabilitas perangkat keras dan perangkat lunak akuisisi data digital antara sistem yang berbeda akan sangat diinginkan.

Dua kelemahan lain dari setiap vendor yang menyediakan perangkat lunak antarmuka akuisisi data digitalnya sendiri adalah kurva biaya dan pembelajaran. Biasanya, setiap vendor menyediakan paket perangkat lunak yang paling buruk kepemilikannya, atau standar industri semu. Seseorang harus pergi ke vendor ini untuk perangkat lunak lain seperti paket analisis dan paket pemrosesan sinyal yang bekerja dengan perangkat keras akuisisi data digital dan perangkat lunak antarmuka, dan sebagainya. Ini menahan satu menjadi satu vendor untuk menerima paket perangkat lunak yang kurang disukai sebagai hasilnya, hanya karena antarmuka perangkat lunaknya. Dengan perangkat lunak antarmuka akuisisi data digital masing-masing vendor baru, pengguna kemudian harus mempelajari cara menggunakan paket, mengatasi bug apa pun, dan menjadi mahir dengannya hingga ke titik di mana akuisisi data digital pekerjaan menjadi efisien dan produktif.

Martin [4] menunjukkan kepada kita bagaimana sistem akuisisi data digital dapat disediakan untuk meniru hard drive. Ini mengambil keuntungan dari fakta bahwa perangkat lunak aplikasi diisolasi dari perangkat keras tingkat rendah oleh sistem operasi untuk mencapai tidak hanya kemandirian perangkat lunak aplikasi tetapi juga portabilitas sistem dan interoperabilitas. Salah satu kesamaan di hampir semua komputer yang melakukan data digital adalah penyimpanan hard disk. Hard drive adalah bagian mendasar dari hampir semua

komputer, dan pengguna umumnya nyaman menggunakannya dan membuka dan menutup file, menyalin dan menghapus file, mengatur disk mereka, dan sejenisnya.

Kerugian yang dibahas mungkin tidak berlaku untuk persyaratan tertentu. Diskusi dengan vendor dalam bisnis akuisisi data dan analisis data pengujian merupakan persyaratan sebelum desain pengujian.

## BAB 8

### PERKEMBANGAN UNTUK DIPERHATIKAN

Sepeda listrik bertenaga baterai akan menjadi sarana penting untuk pergerakan pribadi di seluruh dunia seiring dengan meningkatnya biaya sarana alternatif. Kebutuhan ini akan mempercepat perkembangan teknis, yang sudah terjadi dengan kecepatan yang terus meningkat. Misalnya, pasar yang berkembang untuk komputer laptop ringan memotivasi dalam 5 tahun industri baterai baru yang pada tahun 1997 memproduksi baterai lithium isi ulang senilai Rp 150.000 miliar. Perkembangan yang akan mempengaruhi kinerja dan biaya sepeda listrik antara lain:

- Baterai lithium sel besar
- Baterai seng-udara
- Baterai nikel-logam hidrida
- Sumber sel bahan bakar tenaga listrik
- Motor tanpa biji dengan efisiensi tinggi
- Sistem pengisian tenaga surya
- Aplikasi mikrokontroler dan mikroprosesor lebih lanjut
- Rangka sepeda yang diperkuat serat karbon
- Pakaian cuaca dingin tahan hujan yang nyaman
- Pertumbuhan penduduk dunia

Perkembangan baru akan datang dengan cepat. Tiga bidang di mana perkembangan penting perlu diperhatikan adalah:

1. Produksi minyak bumi dunia akan menurun, seperti yang disebutkan dalam Bab 3.
2. Negara-negara yang mendorong penggunaan sepeda listrik secara ekonomis menghasilkan produk ekspor yang bersaing sangat efektif di pasar dunia. Misalnya, penjualan sepeda listrik China lebih dari 4 juta pada tahun 2003.
3. Perkembangan baru dalam penyimpanan energi, motor penggerak, dan kontrol mengurangi biaya perjalanan sepeda dan meningkatkan jarak perjalanan yang tersedia bagi pengendara sepeda listrik. Seorang pengendara yang menempuh 100 mil dengan sepeda listrik harus membayar 8 sen untuk energi tersebut jika biayanya Rp 1.950/kWh. Bensin seharga Rp 37.500/gal, untuk perjalanan 100 mil dengan SUV, akan berharga Rp 135.000 pada tahun 2004.

#### 8.1 SISTEM SEPEDA

##### Desain Bingkai, Pakaian, dan Manajemen Energi

Rangka Sepeda Bertulang Serat Karbon yang Dicitak Rangka sepeda dibuat secara tradisional dengan mengelas atau mematri pipa berkekuatan tinggi ke dalam alat kelengkapan seperti braket bawah dan headset. Konstruksi ini telah menghasilkan sepeda kokoh yang telah terbukti aman selama puluhan tahun servis. Teknologi material baru mengubah desain produk manufaktur lainnya. Misalnya, badan empedu mobil dibuat dengan mengelas bersama ratusan potongan logam. Pembangun mobil listrik menemukan bahwa mereka dapat membentuk tubuh dengan plastik tahan lama untuk sebagian kecil dari biaya binaraga



tradisional. Pabrikan pesawat telah menemukan bahwa dengan penguat serat karbon bahkan struktur yang sangat penting untuk keselamatan dapat dibuat dengan plastik daripada logam.

Rangka sepeda yang diperkuat serat karbon sedang dibuat. Opsi yang memungkinkan mencakup ketentuan untuk memasang motor penggerak dan ruang tertutup untuk baterai dalam struktur yang juga membawa tekanan. Kabel listrik dapat ditutup dalam struktur rangka untuk melindunginya dari kelembaban dan kerusakan akibat kecelakaan. Anggota bingkai juga dapat dirancang untuk meminimalkan hambatan udara. Konfigurasi sepeda saat ini telah berevolusi dari sepeda pertama. Studi faktor manusia telah mengubah banyak posisi tubuh tradisional untuk mencapai hasil yang efisien. Misalnya, pesawat Raven bertenaga manusia dirancang untuk pertempuran nonstop 5 jam 100 mil. Pemodelan pesawat di komputer, yang dapat menghitung kinerjanya, meminimalkan daya propulsi yang diperlukan.

Variasi konfigurasi diuji dalam model, dan desain daya terendah diadopsi. Namun, desain ini secara dinamis tidak stabil, dan juga mendekati batas keluaran daya dari pilot yang dikondisikan secara atletis. Pilot akan stres berlebihan jika dia harus terus-menerus mengendalikan sikap pesawat, serta mengayuh pedal dengan penuh semangat. Menambahkan autopilot bertenaga baterai 1-lb yang menggerakkan kemudi untuk meredam ketidakstabilan memecahkan masalah ini.

Menerapkan pengetahuan faktor manusia saat ini ke dalam desain sepeda listrik dapat menghasilkan moda transportasi pribadi yang nyaman dan mengejutkan. Pakaian Nyaman Tahan Hujan di Cuaca Dingin Bill Woods bersepeda melintasi rute-rute menarik di Amerika Serikat Barat Laut dan menulis buku yang menjelaskannya secara rinci. Komentarnya tentang pakaian adalah: "Kamu akan basah karena keringat atau hujan, jadi pakailah pakaian yang minimum." Panas dari bard mengayuh bisa tidak ada saat mengendarai sepeda listrik. Juga, basis teknologi pembekuan saat ini memberikan kenyamanan untuk tugas-tugas mulai dari menyelam di bawah laut hingga bekerja di pesawat ruang angkasa.

Teknologi kain dan insulasi yang sekarang tersedia memungkinkan desain dan fabrikasi pakaian yang dapat dikenakan di atas pakaian kerja untuk menjaga kenyamanan pengendara sepeda. Pengendara sepeda listrik tidak perlu memiliki kebebasan gerakan kaki yang terus menerus. Dia tidak perlu berdiri untuk memompa tagihan curam. Selain itu, dia akan menghargai tidak harus mandi setelah dia tiba di tempat kerjanya dengan sepeda. Memenuhi tantangan ini adalah dalam kemampuan industri pakaian.

Manajemen Energi Sumber Daya Aplikasi baru dari algoritma dalam mikroprosesor untuk meminimalkan pengeluaran energi dalam propulsi sepeda adalah suatu kemungkinan. Inclinometers dalam sirkuit dan input operator dari parameter perjalanan yang diinginkan dan data peta digital dapat digunakan oleh mikroprosesor untuk menghitung dan membantu dalam mengendalikan kecepatan sepeda untuk energi minimum untuk memenuhi parameter perjalanan yang ditentukan.

### **Sistem Transportasi Rieyele**

Pertumbuhan Populasi Dunia Populasi dunia berlipat ganda antara tahun 1830 dan 1930. Pada tahun 1987 pertumbuhannya mencapai 488.000 per tahun. Pertumbuhan yang lebih cepat dapat diharapkan di masa depan. Transportasi orang akan menjadi tantangan besar di abad kedua puluh satu. Membangun jalan raya baru di mana orang-orang berkendara ke tempat kerja menjadi sulit. Bahkan pelebaran jalan tol yang ada untuk meningkatkan

kapasitasnya tidak mungkin dilakukan di banyak kota. Hasil kemacetan lalu lintas yang memakan waktu. Saint Petersburg, Rusia, menawarkan contoh bagaimana menangani pertumbuhan penduduk. Mendefinisikan apartemen besar di pusat kota tidak lagi praktis, jadi mereka membangun sebuah desa apartemen 20 lantai 10 mil di luar perbatasan kota. Kereta api penumpang menghubungkan desa ke pusat kota Saint Petersburg, sehingga sangat sedikit tempat parkir untuk mobil yang disediakan di desa. Namun, selain bepergian ke pusat kota untuk bekerja, orang-orang ingin berkeliling di sekitar pedesaan dan mengunjungi pantai. Sepeda listrik dapat mensuplai kebutuhan transportasi ini, begitu juga dengan perjalanan dari stasiun pusat kota ke tempat kerja.

Perkembangan penting yang harus diperhatikan adalah kemungkinan efek pada defisit perdagangan AS karena sepeda menggantikan mobil untuk perjalanan pribadi di negara lain. Di Amerika Serikat defisit perdagangan kita akan tumbuh dan nilai dolar kita akan menurun karena kita harus mengimpor lebih banyak minyak bumi karena sumber daya minyak kita mendekati kelelahan. Perkembangan ini dapat membuat di negara ini semakin banyak pekerja yang dipekerjakan dalam pekerjaan bergaji rendah seperti penjualan eceran, jasa pengiriman, dan pemeliharaan pekarangan, tanduk, pabrik, dan toko. Di Cina, di mana pekerjaan berpenghasilan rendah mendominasi, sepeda umum digunakan. Penggunaan sepeda listrik tumbuh, dan produksi sepeda listrik lebih dari 2,5 juta per tahun pada tahun 2004, hampir 35 persen peningkatan tahunan dari tahun 2002.

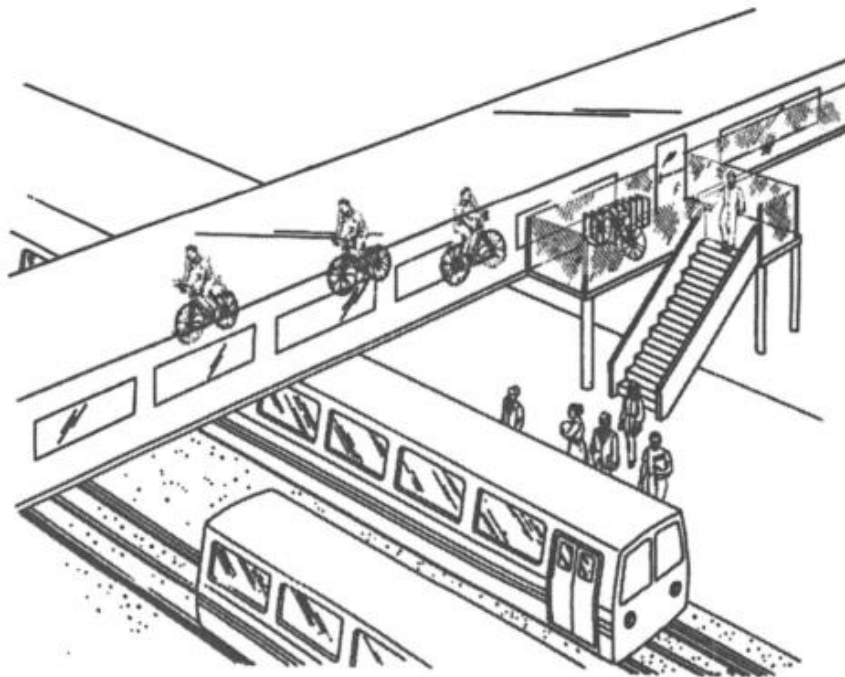
Kemitraan Swasta dan Publik Keuntungan dari sepeda listrik adalah tidak memerlukan tempat parkir Rp 300.000.000. Tempat parkir valet dapat menyimpan sepeda listrik di kompleks apartemen dan juga di stasiun kereta di pusat kota. Selain itu, ruang parkir mobil standar dapat menampung delapan ruang parkir sepeda. Membangun jalan dan memeliharanya mahal, menghabiskan jutaan rupiah per lajur mile, Bikeways, dengan bahu dan trotoar yang terpelihara dengan baik jauh lebih murah. Pada tahun 1994, harga jalur sepeda khas dari Rp 3.750.000.000 menjadi Rp 7.500.000.000 per mil. Ini dapat menampung lalu lintas sebanyak atau lebih dari jalur jalan bebas hambatan [1].

Dan dalam lalu lintas perkotaan yang padat, cyclist biasanya berkeliling kota lebih cepat daripada mobil. Di Amerika Serikat, di mana sepeda digunakan paling sedikit dari semua dan di mana keuntungan terbesar dapat diperoleh dalam konservasi energi, perlu ada kerjasama yang paling banyak antara sektor publik dan swasta. Sektor swasta perlu mengambil inisiatif, tetapi sektor publik dapat membentuk kepemimpinan. Kapal mitra dapat menjadi tempat warga (sektor swasta) melakukan studi dan inventarisasi tentang apa yang perlu dilakukan untuk mengakomodasi dan mendorong pengendara sepeda. Sektor publik perlu membimbing sektor swasta dalam masalah keuangan, teknik, dan peraturan, Perencana publik perlu dididik dan diyakinkan untuk mengubah pandangan mereka tentang mobil dan transportasi umum.

Sistem Transportasi Kota Masalah ada di Amerika Serikat yang membatasi jumlah pengendara sepeda. Untuk pengendara, ini termasuk bahaya dari mobil, mengemudi stop-and-go di jalan yang tidak dirancang dan dirawat untuk ban kurus, dan cuaca buruk. Selain itu, lalu lintas sepeda memperlambat lalu lintas mobil ketika keduanya bercampur. Dan bagi pemerintah daerah, jalur sepeda mengambil ruang yang berharga tanpa memberikan pendapatan. Brown [2] telah mempresentasikan konsep sistem transportasi sepeda yang

ditinggikan dan tertutup yang memungkinkan sepeda listrik menjadi bentuk transportasi yang dapat diterima oleh masyarakat umum dan mengurangi polusi udara dan ketergantungan pada minyak asing. Itu akan menjadi kantilever di atas jalan-jalan kota yang ada. Jamerson [3] menyajikan sistem serupa, yang disebut Trans Guide 2000, yang dipertimbangkan di Norwegia.

Setiap konsep menggunakan jalur sepeda tertutup yang ditinggikan. Gambar 8.1 menunjukkan konsep Brown. Meskipun gambar tersebut menunjukkan akses dari bangunan terdekat, konsepnya tidak terbatas pada jenis akses itu saja. Akses ke jalur sepeda dapat dilengkapi dengan landai, lift, dan sarana lainnya. Brown menyarankan kandang ber-AC, dan konsep Trans Guide menggunakan angin yang diinduksi ke arah perjalanan sepeda. Idanya adalah untuk memiliki kecepatan angin di belakang pengendara sepeda untuk melawan efek hambatan udara. Jalur sepeda yang ditinggikan akan memisahkan perjalanan dua arah sehingga mereka yang pergi atau datang akan mendapat angin di punggung mereka. Klaimnya adalah bahwa pengendara sepeda akan dapat berkendara 10 km di dalam enklosur dengan jumlah energi yang sama dengan yang mereka gunakan untuk berkendara 1 km di luar sistem.



**Gambar 8.1** Jalan sepeda tertutup yang ditinggikan [1].

Sistem jalan sepeda yang lengkap akan terdiri dari kisi-kisi jalan di atas jalan-jalan kota, berjarak beberapa blok terpisah dalam gagasan Brown. Pengusaha dapat memiliki pintu masuk dan loker penyimpanan di tingkat jalan sepeda. Jalur sepeda dari ujung jaringan kota akan menyebar ke pinggiran kota sekitar 10 km dari pusat kota. Kota-kota dengan sistem kereta bawah tanah dapat memiliki jalan sepeda dari stasiun kereta bawah tanah ke komunitas perumahan terdekat, mengurangi masalah parkir di stasiun. Perkiraan biaya Brown adalah bahwa jalur sepeda akan sama dengan biaya per unit jarak dari jalan aspal dua jalur di daerah pedesaan. Brown memperkirakan jalur sepeda dapat mengizinkan sekitar 3200 orang per jam untuk bergerak di setiap arah jika berjarak 10 m dan melaju dengan kecepatan 25 km/jam dalam koridor dua arah dengan lebar 4,5 m.

Perjalanan Jalan Raya dan Jalan Bebas Hambatan Jalan raya dan jalan bebas hambatan yang ada saat ini merupakan lahan kosong untuk sepeda. Para perencana, perancang transportasi, dan pemerintah harus menyadari bahwa kemacetan lalu lintas dapat jauh berkurang jika sepeda diizinkan menggunakan jalan-jalan ini. Dengan perlindungan yang tepat, penggunaan seperti itu harus terbukti mungkin. Untuk pengendara sepeda, rute langsung dan perjalanan yang lebih cepat antar tujuan akan dimungkinkan. Tingkat perlindungan pengendara sepeda dapat bervariasi sesuai dengan kepadatan dan kecepatan lalu lintas mobil yang akan berbagi jalan raya atau jalan bebas hambatan.

Rute dalam kota dapat menggunakan jalur sepeda layang yang mirip dengan desain Brown. Lokasi yang tidak terlalu padat seperti daerah pinggiran kota dapat menggunakan permukaan yang ditinggikan berpagar untuk sepeda. Di daerah pedesaan pagar rendah atau pemisah sekat beton dapat digunakan.

Peristiwa yang Akan Datang: Penemuan dalam Riset Ilmiah Teknologi baru memungkinkan para ilmuwan menemukan cara kerja proses alam yang efisien. Berkaitan dengan kendaraan adalah efisiensi tinggi dari museum yang digunakan manusia dan hewan untuk menghasilkan tenaga penggerak. Otot terdiri dari serat-serat yang sangat kecil yang saling bergesekan untuk menciptakan ketegangan ketika diperintahkan secara elektrik untuk melakukannya. Proses ini mengkonsumsi sukrosa dan oksigen. Hal ini memungkinkan lumba-lumba untuk berenang 3000 mil dengan makanan yang mengandung energi setara dengan 1 gal bensin. Kami belum belajar haluan untuk memanfaatkan proses kekuatan otot di mesin propulsi. Mampu mengekstraksi oksigen murni dari udara akan memungkinkan pengembangan mesin penggerak sepeda efisiensi tinggi baru.

## 8.2 SUMBER ENERGI

### Baterai

Baterai Lithium Sel Besar Sel lithium dalam ukuran yang sesuai untuk sepeda listrik sedang dibuat untuk prototipe mobil listrik. Bahan yang digunakan untuk membuat sel relatif murah, dan banyak proses manufaktur otomatis telah dikembangkan. Baterai lithium akan menjadi kandidat utama untuk menyalakan sepeda listrik segera setelah pabrik mulai memproduksi sel 20 dan 30 Ah. Untuk sepeda eleetrie kandungan energi baterai sangat penting. Sebuah litium baterai, yang menghasilkan 120 Wh/kg, akan membawa pengendara 5 kali jarak yang bisa dia dapatkan dari baterai timbal-asam yang menghasilkan 24 Wh/kg.

Namun, membuktikan masa pakai siklus pengisian-pengosongan baterai di lingkungan pengoperasian yang diharapkan membutuhkan waktu. Baterai harus diuji di ruang yang dapat mempertahankan suhu mulai dari di bawah nol di musim dingin utara hingga di atas 100 °F yang terjadi di gurun di musim panas. Baterai yang bertahan 1000 siklus charge-discharge akan menarik untuk menyalakan sepeda. Kita sudah tahu bahwa baterai lithium akan membutuhkan pengisi daya "pintar". Namun, untuk menyederhanakan proses pengisian, solusi elektrokimia untuk masalah ketidakseimbangan muatan juga sedang dikembangkan.

Perbaikan Nikel-Metal Hidrida Biaya bahan untuk baterai hidrida nikel-logam dapat menjadi signifikan untuk ukuran baterai yang sesuai untuk menyalakan sepeda listrik. Baterai ini mirip dengan sel bahan bakar yang selama pelepasan hidrogen bergabung dengan oksigen untuk menghasilkan air. Selama pengisian, hidrogen diperoleh kembali dengan

mengelektrolisis air ini. Gas hidrogen disimpan dalam hidrida logam. Hidrida logam terdiri dari senyawa mahal, seperti titanium, zirconium, vanadium, mangan, dan paladium [4]. Unsur tanah jarang yang diperlukan adalah produk sampingan dari tambang dan kilang yang menghasilkan produk lain yang dapat dipasarkan. Permintaan yang besar untuk elemen-elemen ini dapat menyebabkan harga naik. Di sisi lain, para peneliti sedang menguji senyawa penyimpanan hidrogen lainnya. Selain itu, uji masa pakai siklus pengisian-pengosongan sedang berlangsung. Hasil pengembangan ini akan menentukan jika baterai nikel-metal hidrida adalah pilihan terbaik untuk menyalakan sepeda listrik.

Baterai Zinc-Air Baterai zinc-air tidak dapat diisi ulang dengan pengisi daya sederhana. Kaset karena itu harus masuk ke stasiun pengisian di mana mesin otomatis menghilangkan oksida seng, elektrokimia memulihkan seng, dan merakit kaset baru. Tanpa infrastruktur ini baterai zinc-air tidak praktis. Namun, infrastruktur tidak perlu lokal. Misalnya, di bawah sinar matahari gurun, panel sel surya berukuran 10 m kali 10 m suatu hari dapat menghasilkan energi yang diperlukan untuk mengisi ulang kaset dari sepeda yang telah menempuh jarak 9160 mil. Dalam infrastruktur yang dikembangkan, kaset yang diisi ulang dapat tersedia di toko lokal, dan pemilik sepeda akan memiliki persediaan di tanduknya. Kaset bekas akan dikirim ke stasiun pengisian dekat pembangkit listrik tenaga surya, nuklir, atau mungkin pembangkit listrik sel bahan bakar masa depan. Siklus hidup charge-discharge tidak lagi menjadi masalah karena kaset yang diisi ulang tidak dapat dibedakan dari yang baru. Baterai Lainnya Sebagian besar baterai yang baru ditemukan menunjukkan kinerja yang menarik, tetapi juga memiliki kelemahan dasar yang ditemukan kemudian. Misalnya, seperti yang dibahas dalam Bab 3, sel nikel-zinc yang dapat diisi ulang tampaknya berbiaya rendah, tetapi kumis seng tumbuh di pelat negatif setiap kali sel diisi ulang.

### **Sel Bahan Bakar**

Dalam bentuk umum dari sel bahan bakar, gas hidrogen digabungkan dengan oksigen untuk menghasilkan tenaga listrik. Pembangkit listrik sel bahan bakar telah dibangun, tetapi mereka telah ditinggalkan karena hidrogen yang dibuat dari metana dalam gas alam membawa sisa kotoran. Kotoran ini merusak pelat sel bahan bakar, menambah biaya perawatan. Zinc-Air Fuel Cell- Perkembangan yang Harus Diperhatikan Dalam aplikasi sepeda listrik, biaya energi yang dikonsumsi dalam menyalakan bielele dapat mempengaruhi kepenuhan penggunaannya. Misalnya, biaya perjalanan ke tempat kerja oleh orang-orang tingkat kemiskinan di Cina dan India sangat penting. Jangkauan perjalanan yang panjang untuk setiap pengisian energi juga penting dalam semua perjalanan karena sumber energi mungkin tidak tersedia dengan mudah di tempat di mana pasokan energi sepeda habis.

Sel bahan bakar seng-udara sekarang menghasilkan 400 Wh/kg. Menggerakkan sepeda di jalan biasa menghabiskan sekitar 15 Wh/mil (10 Wh/km), tergantung pada kecepatan perjalanan sepeda. Jadi 1 kg pelet sel bahan bakar zinc akan mendorong sepeda listrik menempuh jarak sekitar 25 mil (40 km). Performa ini menjadikan sel bahan bakar seng-udara sebagai pengembangan yang harus diperhatikan.

### **Ultrakapasitor dan Sel Bahan Bakar untuk Mengganti Baterai**

Bab 6 menunjukkan ultrakapasitor eksperimental memiliki densitas energi 27 hingga 60 Wh/kg. Kapasitor tersebut memiliki tegangan operasi sekitar 3,8 V. Kapasitor pengenal 27-Wh/kg memberikan daya spesifik 8 kWh/kg, dan kapasitor 60-Wh/kg memiliki daya spesifik 540

W/kg. Nilai energi spesifik sebanding dengan timbal-asam, nikel-logam hidrida, dan baterai nikel-kadmium. Penyambungan seri 6 sampai 9 kapasitor tersebut akan memasok tegangan dan daya untuk bicycle electric. Namun, dimungkinkan untuk menggunakan satu kapasitor jika menggunakan teknik pompa muatan yang mengalikan tegangan kapasitor, mengikuti pengajaran Nebrigic et al. [5]. Jika tidak, koneksi seri kapasitor akan memerlukan teknik pemerataan sel yang serupa dengan yang digunakan untuk sel baterai lithium yang dijelaskan dalam Bab 4.

Sebuah ultrakapasitor yang dikombinasikan dengan sel bahan bakar dapat digunakan untuk meningkatkan jangkauan perjalanan dengan menyediakan peningkatan efisiensi motor selama periode perjalanan menanjak. Lebih lanjut, Dowgiallo dan Hardin [6] mengatakan bahwa lebih dari 100.000 siklus kehidupan diharapkan untuk ultracapacitor.

### 8.3 SISTEM PENGISIAN TENAGA SURYA

#### Menyimpan Energi Matahari dalam Seng - Perkembangan yang Harus Diperhatikan

Energi bebas dari tenaga surya dapat menjadi sumber daya penggerak sepeda yang diinginkan lingkungan untuk beberapa pengendara sepeda di Amerika Serikat. Ini bisa menjadi sumber energi praktis untuk memperluas kesempatan pendidikan di kawasan hutan Afrika. Namun, biaya pembangunan jalan, ditambah jaringan pipa untuk membawa bahan bakar minyak, berada di luar sumber daya yang tersedia saat ini dari masyarakat tersebut. Jalur sepeda bisa dibangun dengan tenaga kerja lokal, dan bahkan melewati bukit yang curam, sehingga para siswa bisa bersepeda ke kampus setiap morning. Sepeda listrik dapat menggandakan jarak tempuh dan empat kali lipat area yang dilayani oleh kampus.

Energi matahari, yang tidak tersedia pada malam hari atau pada hari berawan, dapat menjadi disimpan dalam baterai atau tangki hidrogen. Tangki hidrogen akan menjadi buge kecuali gas disimpan pada tekanan tinggi yang dihasilkan oleh kompresor. Baterai adalah tangki elektrokimia mahal yang mengandung banyak komponen canggih. Baterai timbal-asam berat yang sering digunakan dalam penyimpanan energi akan menurun kapasitasnya seiring bertambahnya usia. Di sisi lain, pelet seng dapat disimpan dalam jumlah yang sesuai dengan biaya rendah dalam kotak berlapis plastik.

Untuk mendukung community college daerah tropis, komponen kuncinya dapat berupa sel bahan bakar zinc-air dan "stasiun pengisian" zinc-air yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. SPBU akan berlokasi di community college. Di stasiun, setiap siswa akan mengantarkan cairan zincate dari sel bahan bakar zinc-air selama setiap hari sekolah di sepeda listriknya. Kemudian siswa akan menerima elektrolit kalium hidroksida dan pelet seng yang cukup untuk bersepeda pulang dan kembali ke sekolah keesokan paginya.

#### Sel Termovoltai

Sebuah generator termoelektrik [7], yang mengubah panas langsung dari sumber panas menjadi energi listrik, dapat diterapkan untuk mengisi baterai. Perangkat, bagaimanapun, hanya menyediakan listrik yang berguna pada suhu tinggi, biasanya 1200 °C. Outputnya adalah sekitar 0,8 W/cm<sup>2</sup> area sel pada tegangan 0,38 V. Sel-sel telah dikombinasikan dengan sel fotovoltaik untuk aplikasi luar angkasa. Selain itu panel termovoltai telah dikombinasikan dengan tungku pembakaran kayu untuk memberikan daya 100 W pada 12 V dc [8].

Sel-sel menciptakan listrik dengan penerapan gaya gerak listrik eksternal (ggl) melintasi semikonduktor yang dipanaskan untuk menghasilkan perpindahan elektron dan dengan demikian menghasilkan arus dalam semikonduktor yang dapat digunakan dalam beban. Pengoperasian dimungkinkan pada efisiensi maksimum mendekati 80 persen. Ketika digunakan dalam kombinasi dengan lensa konsentrat atau kombinasi dari penyerap panas dan exchanger panas, sel dapat mengubah energi matahari menjadi listrik [7].

#### **Integrasi Sel Surya Fleksibel dengan Baterai**

Teknologi sel surya maju ke titik di mana plastik fleksibel memiliki bahan semi konduktor yang disimpan di atasnya. Sel surya fleksibel film tipis dibangun dengan cara ini. Lapisan tipe-p kadmium telluride dan lapisan tipe-n kadmium sulfida diendapkan ke plastik pada suhu yang cukup rendah untuk menghindari kerusakan atau melelehkan plastik. Lapisan oksida konduktif transparan yang dilapisi oleh jaringan bus bar diendapkan di atas lapisan tipe-n. Lapisan kontak balik dari logam konduktif diendapkan di bawah lapisan tipe-p yang melengkapi rangkaian pengumpul arus. Lapisan semikonduktor mungkin amorf atau polikristalin dalam struktur.

Panel surya saat dibayangi sebagian menunjukkan kehilangan daya keluaran yang signifikan. Oleh karena itu, permukaan panel silindris atau melengkung lainnya yang bertemu dengan bayangan tidak akan memberikan daya seperti yang diharapkan. Namun, bagian tersegmentasi yang tidak dibayangi secara individual akan memberikan daya nominal. Dimungkinkan untuk membuat permukaan aerodinamis dengan sistem panel surya untuk menghasilkan daya dan mengurangi hambatan. Memarkir sepeda dengan orientasi yang tepat ke matahari dapat memberikan beberapa tingkat pengisian baterai saat pengendara sepeda sedang sibuk. Kira-kira, di bawah sinar matahari Arizona yang baik, seseorang dapat menyadari sekitar 13 Wh/m<sup>2</sup>/hari energi panel surya dengan panel planar.

#### **8.4 MOTOR EFISIENSI TINGGI**

Motor sinkron magnet permanen sekarang memberikan efisiensi tinggi, pada urutan 90 persen, yang sebelumnya tidak dapat dicapai pada motor sinkron yang memiliki kumparan medan yang mengkonsumsi energi, atau pada motor induksi yang memiliki batang rotor yang mengkonsumsi energi. Jarak tempuh yang jauh pada sepeda listrik menjadi tersedia ketika sangat sedikit energi baterai yang terbuang karena rugi-rugi motor.

Motor ringan berkecepatan tinggi perlu dipasangkan ke poros pedal sepeda atau roda penggerak dengan roda gigi pengurang kecepatan yang memiliki rugi daya. Motor yang dihubungkan langsung ke roda akan berputar dengan kecepatan lambat, dan akan menjadi berat, tetapi kerugian pada gigi pengurang kecepatan akan dihilangkan. Alternatif yang berhasil adalah motor hub, yang dibangun menjadi hub roda belakang yang diperbesar. Diameter motor dan rasio roda gigi dioptimalkan untuk mencapai kombinasi yang memberikan jarak tempuh terbesar per watt-jam energi yang dikonsumsi dari baterai sepeda.

Sebuah motor sinkron dapat memiliki astator yang terpasang pada garpu sepeda, Belitan stator akan dikonfigurasi untuk menarik magnet medan yang lewat yang dipasang di sisi tepi roda sepeda. Motor ini dapat menghasilkan tenaga penggerak dengan efisiensi setinggi mungkin karena kerugian pada roda gigi pengurangan kecepatan dapat dihindari. Namun, banyak magnet permanen yang mahal harus dibeli dan dipasang di tepinya. Kandang

tupai alternatif rim motor akan memiliki “roteor” yaitu kombinasi bantalan besi dan jeruji aluminium di sisi pelek roda. Beberapa motor ini telah dibuat (lihat Gambar 5.6), tetapi kinerjanya belum dilaporkan dalam data yang dapat dianalisis dan dioptimalkan. Ini perkembangan yang perlu diwaspadai. Kemungkinan hambatan untuk motor sepeda yang efisien adalah biaya jaring magnet tanah jarang. Magnet untuk sebuah motor prototipe akan berharga sekitar Rp 1.500.000 pada dolar tahun 2005.

Kuantitas harga akan lebih rendah. Namun, motor magnet permanen juga akan memungkinkan mobil untuk melakukan perjalanan lebih jauh dengan mengisi baterai. Pasar mobil dapat mengkonsumsi begitu banyak unsur tanah jarang sehingga harganya akan naik sampai tambang baru dibuka untuk memproduksi unsur-unsur ini. Hari ini mereka adalah produk sampingan dari tambang logam mulia.

## 8.5 KONTROLER

Teknologi kontrol kecepatan motor listrik telah dikembangkan untuk aplikasi industri dan propulsi. Didokumentasikan secara menyeluruh dalam manual desain dan program komputer adalah prosedur untuk memilih konfigurasi kontrol kecepatan, dan komponennya, untuk klasifikasi motor tertentu yang memenuhi persyaratan mesin yang digerakkan. Ketersediaan data ini dihasilkan dari kebutuhan kecepatan motor yang dikontrol dengan tepat untuk banyak aplikasi industri. Juga, chip komputer canggih tersedia untuk menjalankan fungsi kontrol motor seperti yang diperlukan untuk mobil listrik dan hibrida.

Aplikasi sepeda bervariasi dari perjalanan belanja sederhana di lingkungan pengendara hingga perjalanan liburan yang melintasi pegunungan. Saat ini, pengontrol motor sepeda yang tersedia akan membuat sepeda berjalan pada kecepatan yang dipilih pengendara tetapi memperlambat kecepatan sepeda jika mendaki bukit yang curam jika kecepatan yang dipilih akan membebani motor.

Kontrol motor yang juga akan mendeteksi tegangan berlebih pada baterai lithium ion yang memasok daya propulsi juga dimungkinkan. Baterai lithium adalah sumber energi yang baik karena dapat menghasilkan lebih dari 133 Wh/kg massa. Namun, mengosongkan baterai lithium ion sepenuhnya dapat merusak beberapa selnya jika berada pada suhu yang berbeda. Pelaporan terus menerus tentang status pengisian baterai sepeda kepada pengendara sepeda akan menjadi layanan yang berguna. Pengendali motor canggih sedang dikembangkan untuk mobil listrik. Kontroler ini adalah perkembangan yang harus diperhatikan karena dapat beradaptasi dengan sepeda listrik.

Kontroler harus menjadi lebih kecil dengan kemajuan dalam industri semikonduktor. Driver motor setengah jembatan yang mampu menggerakkan motor hingga 250 W tanpa menggunakan heat sink sekarang tersedia dalam satu chip semikonduktor, dan hingga 400 W jika heat sink. Tiga unit seperti itu, yang diperlukan untuk menggerakkan motor dc brushless tiga fase, mungkin tidak jauh di belakang. Mikroprosesor untuk mengontrol driver ini juga ada dalam satu chip. Kita mungkin melihat desain seperti itu berkembang menjadi pengontrol yang terdapat pada beberapa chip yang dipasang dalam satu paket semikonduktor. Integrasi di dalam motor, yang sekarang terjadi, akan menjadi lebih umum.



## DAFTAR PUSTAKA

- A. C. Gross, C. R. Kyle, and D. 1. Malewicki, The Aerodynamics of Human-Powered Land Vehicles, *Scientific American*, September 1983, pp. 142-152.
- A. H. Zimmennan, Self-Diseharge Losses in Lithium-Ion Cells, *IEEEAES Systems Magazine*, Febroary 2004, pp. 19-24.
- A. J. Appleby, Acid Fuel Cell Technology-An Overview, Fuel Cell Seminar at Orlando, Florida, 1983.
- A. W. Swager, Smart Battery Technology: Power Management's Missing Link, *Electronic Design News*, March 2,1995, pp. 47-64.
- Bill Bently, Basics of Rechargeable Battery Management, *PCIM Magazine*, October 1995 pp. 66-70.
- Bimal K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, Piscatawdy, NJ 2002.
- Bradley A. Perkins, Smart Battery, V.S. Patent 5,747,189, May 5, 1998.
- Brian J. Stein III, John W. Baker and Pinakin M. Shah, Development of Light Weight LithiumIon Cells Using Aluminum Hardware, *Proceedings of AIAA, 2003-5987, First International Energy Conversion Engineering Conference*, August 2003, Portsmouth, VA.
- C. Liao, LT1510 High Efficiency Lithium-Ion Battery Charger, Design Note 111, *Linear Technology*, Milpitas, CA.
- Chin-Yu Chao, Chih-Jin Wang, Yin-Jao Luo, and Yuh-Wen Hwang, Power Transmission and Pedal Force Sensing System for an Electric Bicycle, V.S. Patent 6,196,347, March 6,2001
- City Electric International Consulting Group, Newsletter, November 2002.
- Clarence V. Christie, *The Theory and Characteristics of Electrical Circuits and Machinery*, McGraw-Hill, New York, 1931.
- Douglas M. Allen, Sodium-Sulfur Satellite Batteries: Cell Test Results and Development Plans, *Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS*, 1984, pp. 163-168.
- Dragan Danilo Nebrigic, Milan Marcel Jevtitch, Vladimir Gartstein, William Thomas Milam, James Vig Sherrill, Nicholas Busko, and Peter Hansen, Ultra-capacitor Based Dynamically Regulated Charge Pump Power Converter, V.S. Patent 6,370,046, April 9, 2002.

- E. Levy, Jr., Life, Engineering, and Acceptance Qualification Test Data on Air Force Design Nickel Hydrogen Batteries, Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS, 1984, pp. 85-88.
- Ed Benjamin, Cycle Electric International Consulting Group, Nov. 12, 2003, website: [www.cycleelectric.com](http://www.cycleelectric.com).
- Edward J. Dowgiallo and Jasper E. Hardin, Perspective on Ultra Capacitors for Electric Vehicles, IEEE Systems Magazine, August 1995, pages 26-31
- F. Goodenough, Battery-Management ICs Meet Diverse Needs, Electronic Design, August 19, 1996, pp. 79-96.
- F. Hoffart, Li-Ion Battery Charger Adapts to Different Chemistries, Electronic Design News, September 2, 1999, p. 146.
- Frank B. Tudron et al., Lithium Sulfur Rechargeable Batteries: Characteristics, State of Development, and Applicability to Powering Portable Electronics, Proceedings of the 41st Power Sources Conference, 14-17 June, 2004, pp. 341-344.
- Frank E. Jamerson, Electric Bikes Worldwide 2002: With Electric Scooters & Neighborhood EVs, January 15, 2002, 6th ed., Electric Battery Bicycle Company. Frank Jamerson, Electric Battery Bicycle Co., Naples, FL and Petoskey, MI, Publisher, can be contacted at e-mail [elecbike@aol.com](mailto:elecbike@aol.com) or [www.EBWR.com](http://www.EBWR.com)<<http://www.EBWR.com>>.
- Frank E. Jamerson, Electric Bikes Worldwide 97: China Exhibition, Shanghai Interbike Anaheim, Electric Battery Bicycle Co., Naples, FL and Petoskey, MI, January 20, 1997, 3rd ed.
- Frank E. Jamerson, Electric Bikes Worldwide: Intercycle Cologne 95, Electric Battery Bicycle Co., Naples, FL and Petoskey, MI, September 14-17 1995.
- G. Scott Rutherford, Light Rail, Heavy Politics, Pacific Northwest Executive, 1989, pp. 18-22.
- Gary Gardner, Bicycle Production Down Again, Vital Signs 1998, World Watch Institute, p.89.
- H. I. Mohamed-Nour et al., Design Considerations in an Efficient Electric Motorcycle, 0-7803-3631-3197 IEEE, 1997, pp. 283-287
- H. L. Steele and L. Wein, Comparison of Electrochemical and Thermal Storage for Hybrid Solar Power Plants, Paper 81-WAISol-27, ASME Winter Annual Meeting, 1981.
- Herman P. Raab, True RMS Operation Test, Supplement to Electronic Design, October 23, 1997.
- Hosea w. Libbey, Electric Battery, V.S. Patent 536,689, April 2, 1895.

- Issa Panahi, et al., Generate Advanced PWM Signals Using DSPs, *Electronic Design*, May 1, 1998, pp. 83-90.
- J. J. Taborek, *Mechanics Of Vehicles - Part 6: Resistance Forces*, pp. 26-29.
- J. S. Enochs et al., Nonantimonial Lead Acid Batteries for Cycling Applications, *Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS*, 1984, pp. 850-856.
- James B. Coate, *Design of an Efficient and Economical Electric Bicycle*, Masters of Science in Engineering Design, Tufts University, May, 1994.
- James H. Barnes, Presentation at Advanced Energy Storage Technologies-Potential and Status (Oral presentation at the first AIAA International Energy Conversion Engineering Conference, 2(03).
- James N. Constant; Thermoelectric Generator, V.S. Patent 4,292,579, September 29, 1981.
- Jean-Pierre Vandelac, Compact Fast Battery Charger, V.S. Patent 6,301,132, October 9, 2001.
- JXCrystals Internet website, [www.jxcrystals.com](http://www.jxcrystals.com), April 9, 2004.
- K. Leutwyler, Speed versus Need, *Scientific American*, October 1997, p. 98.
- K. Nozaki et al., Performance of ETL New 1-kW Redox Flow Cell System, *Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS*, 1984, pp. 844-849.
- Kazuyuki Sakakibara, Battery Charger and Battery Charging Method, V.S. Patent 6,476,584, November 5, 2002.
- Kevin Dotzler and Keisaku Hayashi, Lithium-Ion Battery Charger Power Limitation Method, V.S. Patent 6,664,765, December 16, 2003.
- Kevin I. Bertness, Battery Charge Control Device, V.S. Patent 6,696,819, February 24, 2004.
- King-Jet Tseng, and G. H. Chen, Computer-Aided Design and Analysis of Direct-Driven Wheel Motor Drive, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 3, May 1997.
- Lawrence E. Piercey, Smart Battery System and Interface, V.S. Patent, 5,557,188, September 17, 1996.
- Lester R. Brown, M. Renner, and B. Halweil, *Vital Signs 2000-The Environmental Trends That Are Shaping Our Future*, W.W. Norton, New York.
- M. Klein and A. Charkey, Nickel-Cadmium Battery System for Electric Vehicles, *Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS*, 1984, pp. 719-725.

- Michael A. Brown, Electric Bicycle Transportation System, IECEC 2002 Paper No. 20112.
- Michael A. Brown, Electric Bicycle Transportation System, Proceedings of the IEEE-sponsored 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 2002.
- Michael D. Skehan, Integrating Rail Transit and Bicycles in Kent, WA, American Association for the Advancement of Science, 75th Annual Meeting of the Pacific Division, June 22, 1994.
- Michael Kutter, Hybrid Drive Mechanism for a Vehicle Driven by Muscular Power, with an Auxiliary Electric Motor, U.S. Patent 6,286,616, September 11, 2001.
- Michio Okamura, Introducing the Nanogate Capacitor, IEEE Power Electronics Society Newsletter, First Quarter, 2004.
- Mohan N. Undeland, and William Robbins. Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Wiley, New York, 1995.
- N. Raman et al., Development of High Power Li-Ion Battery Technology for Hybrid Electric Vehicle (HEV) Applications. Proceedings of the 41st Power Sources Conference, 14-17 June, 2004, pp. 435-437.
- Nobuhiro Takano and Shigeru Moriyama, Battery Charger and Method of Detecting a Fully Charged Condition of a Secondary Battery, U.S. Patent 6,335,612, January 1, 2002.
- Ogden Bolton, Jr., Electrical Bicycle, U.S. Patent 552,271, December 31, 1895.
- Peter R. Holloway and Robert A. Mammano, Battery Charger Circuit Including Battery Temperature Control, U.S. Patent 5,504,416, April 2, 1996.
- Phillip Miller and Ronald D. Becker, Fast Battery Charger, U.S. Patent 5,363,031, November 8, 1994.
- Pierre M. Combaluzier, Remote Smart Battery, 5,973,475, October 26, 1999.
- Powersim Inc., PSIM Simulation for Power Electronics and Motor Control, Advertising Flyer, 2004.
- R. L. Proctor, Accurate and User Friendly State-of-Charge Instrumentation for Electric Vehicles, IEEE Northcon94 Conference, Seattle WA, November 4-6, 1994, pp. 379-384.
- Randall L. Hess, Patriek R. Cooper, Annando Interiano, and Joseph F. Freiman, Battery Charge Monitor and Fuel Gauge, U.S. Patent 5,315,228, May 24, 1994.
- Randall Wang, Auto-controller for Battery Charger Using Thermo control and Current Balance Technology, U.S. Patent 6,404,169, June 11, 2002.

- Richard A. Blanchard, High-Side Switch with Depletion-Mode Device, V.S. Patent 6,538,279, March 25, 2003.
- Richard H. Welch, Jr., Improving the Power Efficiency of Electric Motors-Part 2: Steady State Power Efficiency, *peIM*, April 1998, pp. 22-28.
- Robert A. Dunstan, Smart Battery Charger System, V.S. Patent 5,572,110, November 5, 1996.
- Robert A. Dunstan, Smart Battery Power Availability Feature Based on Battery-Specific Characteristics, V.S. Patent 5,541,489, July 30, 1996.
- Robert A. Mammano, Charging the New Batteries-s-IC Controllers Track New Technologies, IEEE 0-7803-2459-5195, 1995, pp. 171-176.
- Robert A. Pease, What's All This Wattmeter Stuff, Anyhow?, *Electronic Design*, May 13, 2002.
- Robert S. Feldstein, Alkaline Battery Charger and Method of Operating Same, V.S. Patent 5,523,667, June 4, 1996.
- Stanford R. Ovshinsky and Rosa Young, High Power Nickel-Metal Hydride Batteries and High Power Alloys/Electrodes for Use Therein, U.S. Patent 6,413,670, July 2, 2002.
- Stephen S. Eaves, Large, Low Cost, Rapidly Configurable Lithium-Ion Battery Modules Constructed from Small Commercial Cells, Proceedings of the 41st Power Sources Conference, June 14-17, 2004, pp. 328-330.
- T. Inoue et al., LEO Life Testing Results of 100 Ah Lithium Ion Cells, Proceedings of AIAA, pp. 2003-6018, Second International Energy Conversion Engineering Conference, August 2004, Providence, RI.
- Thomas Dawson, Elimination of Battery Cell Bypass Electronics on FLTSATCOM, Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ANS, 1984, pp. 72-77.
- Thomas J. Martin, Data Acquisition System, U.S. Patent 6,105,016, August 15, 2000.
- Thomas T. Sack, J. Croydon Tice, and Ran Reynolds, Segmented Battery Charger for High Energy 28 V Lithium Ion Battery, *IEEE AES Magazine*, September 2001, pp. 15-18.
- Tony Jeffery and Jason Hinde, The Development of High Energy Density Lithium Ion Cells, Proceedings of the 41st Power Sources Conference, 14-17 June, 2004, pp. 438-441.
- tZero Earns Highest Grade at 2003 Michelin Challenge Bibendum (cover story), *Electric Auto Association Current Events*, Vol. 35, Nos. 11 and 12, Nov-Dec 2003.
- V. L. Teofilo, L. V. Merritt, and R. P. Hollandsworth, Advanced Lithium Ion Battery Charger, *IEEE AES Systems Magazine*, November 1997, pp. 30-35.

- W. C. Morchin, Battery-Powered Electric Bicycles, IEEE Technical Applications Conference, Northcon 94, Seattle Washington, October 12-14, 1994, Conference Record, pp. 269-274.
- W. C. Morchin, Energy Management in Hybrid Electric Vehicles, 17th Digital Avionics Systems Conference, October 31-November 6, 1998, Bellevue Washington.
- W. C. Morchin, Trip Modeling for Electric-Powered Bicycles, IEEE Technical Applications Conference, Northcon 95, Seattle Washington, November 4-6, 1996, Conference Record, pp. 373-377.
- W. Stephen Woodward, Simple Digital AC Wattmeter, Supplement to Electronic Design, October 22, 1998.
- Wayne D. Kurle, Stephen B. Johnson, Rockland W. Nordness, Stephen I. Firman, Douglas M. Gustarson, Peter Y. Choi, Smart Battery with Maintenance and Testing Functions, Communications, and Display, V.S. Patent 6,198,253, March 6, 2001.
- Willard R. Scott and Douglas W. Rusta, Sealed-Cell Nickel-Cadmium Battery Applications Manual, NASA Scientific and Technical Information Branch, Publication 1052, 1979.
- William H. Lewis and Douglas W. Rusta, New Developments in Personal Lighting Systems for Miners, Information Circular 8938, V.S. Department of Interior, Bureau of Mines.
- William Morehin, Trip Modeling for Electric-Powered Bicycles, IEEE Technical Applications Conference, Northcon96, Seattle Washington, November 4-6, 1996, pp. 373-377.
- Yury, Mikhail L. Podrazhansky, and Richard C. Cope, Battery Charger with Enhanced Charging and Charge Measurement Processes, V.S. Patent 6,232,750, May 15, 2001.
- Yusuke Niiori, Hiroyuki Katsukawa, Hitoshi Yoshida, Makoto Takeuchi, and Michio Okamura, Electric Double Layer Capacitor and Method for Producing the Same, D.S. Patent 6,487,066, November 26, 2002.
- Yutaka Takada, Hiroshi Miyazawa, Akihito Hetake, Kaniaki Tanaka, Hiroshi Nakazato, and Katsami Shikai, Sensor, Drive Force Auxiliary Device, V.S. Patent 6,163,148, December 19, 2000.

Dr. Joseph Teguh Santoso, M.Kom.

# SEPEDA LISTRIK

Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan

## BIODATA PENULIS



Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom, M.Kom adalah Rektor dari Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) Semarang yang memiliki banyak pengalaman praktis dalam bidang *e-commerce* sejak Tahun 2002. Beliau mempunyai 3 (tiga) toko *Official Online Store* di China untuk merek Sepeda Raleigh, dengan omzet tahunan pada Tahun 2019 mencapai lebih dari Rp. 35 Milyar rupiah dan terus meningkat. Dr. Joseph T.S memiliki lisensi tunggal sepeda merek “Raleigh” untuk penjualan *Online* di seluruh China. Di samping itu beliau juga memiliki pabrik sepeda dan sepeda listrik merek “Fengjiu”, yaitu Pabrik Sepeda Listrik yang masih tergolong kecil di China. Pengalaman beliau malang melintang di dunia *online store* di China seperti Alibaba, Tmall, Taobao, JD, Aliexpress sangat membantu mahasiswa untuk memiliki pengalaman teknis dan praktis untuk membuka toko *online* bersama beliau.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

**PENERBIT :**  
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK  
Jl. Majapahit No. 605 Semarang  
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144  
Email : penerbit\_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-623-5734-82-8 (PDF)



Dr. Joseph Teguh Santoso, M.Kom.

# SEPEDA LISTRIK

## Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

**PENERBIT :**

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK  
Jl. Majapahit No. 605 Semarang  
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144  
Email : [penerbit\\_ypat@stekom.ac.id](mailto:penerbit_ypat@stekom.ac.id)