

Ramadoni Syahputra

Ramadoni Syahputra

KIMIA TEKNIK DAN ILMU LINGKUNGAN

# KIMIA TEKNIK DAN ILMU LINGKUNGAN

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah buku ajar berjudul "Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan". Dengan penulisan buku ajar ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami konsep dasar ilmu kimia dan ilmu lingkungan yang diaplikasikan di bidang keteknikan khususnya Teknik Elektro. Buku ajar ini dapat digunakan sebagai acuan utama oleh mahasiswa dan dosen khususnya Program Studi Teknik Elektro dalam proses pembelajaran matakuliah Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan. Matakuliah Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan merupakan salah satu matakuliah dasar yang biasanya diberikan di semester-semester awal sebagai fundamental dalam memahami konsep atom, arus listrik, hingga contoh-contoh aplikasinya dalam pengembangan sumber energi listrik berasal dari energi terbarukan. Buku ajar ini dapat juga digunakan sebagai acuan tambahan untuk mata-mata kuliah yang berhubungan dengan aplikasi pembangkit tenaga listrik dan energi terbarukan seperti mata kuliah Sistem Tenaga Listrik, Rekayasa dan Pengkondisian Energi Terbarukan, Teknologi Pembangkit Tenaga listrik, dan lain-lain.

Pada bagian awal buku ini diuraikan tentang pendahuluan kimia teknik dan hubungan kimia teknik matakuliah lainnya. Pada bagian selanjutnya diuraikan tentang water treatment, elektrokimia dan korosi, electroplating, aplikasi teknologi kimia dalam rekayasa baterai, bahan bakar kimia, fuel cell, dan bahan isolasi. Pada bagian akhir buku ini dilengkapi dengan aplikasi energi terbarukan untuk pelestarian lingkungan.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada. Akhirnya, semoga buku ajar ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran khususnya pada Program Studi Teknik Elektro.



Minggiran MJ II/1378, RT 63/17  
Suryodiningratan, Mantrijeron, Yogyakarta  
Telp. 0274-388895, 0877 3460 8747  
bukulitera3@gmail.com

ISBN 978-623-6034-00-2



# **KIMIA TEKNIK DAN ILMU LINGKUNGAN**

### Sanksi Pelanggaran Pasal 113

#### Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

# **KIMIA TEKNIK DAN ILMU LINGKUNGAN**

Ramadoni Syahputra



## **KIMIA TEKNIK DAN ILMU LINGKUNGAN**

© Penulis

Hak cipta pada penulis dan dilindungi oleh Undang-Undang  
(*All Rights Reserved*).

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin  
tertulis dari penerbit.

Cetakan 2020  
114 halaman, 15 x 23 cm  
ISBN: 978-623-6034-00-2

### **Penulis**

Ramadoni Syahputra

### **Desain Cover & Tata Letak**

Yazid Fauzan A.T

### **Penerbit:**

Buku Litera  
Minggiran MJ II/ 1378 RT. 63/17, Kel. Suryodiningratan, Mantrijeron,  
Yogyakarta  
Telp : 0274 388895, 0877 3460 8747.  
E-mail: bukulitera3@gmail.com

# PRAKATA

*Bismillaahirrahmaanirrahiim*

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah buku ajar berjudul “Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan”. Dengan penulisan buku ajar ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami konsep dasar ilmu kimia dan ilmu lingkungan yang diaplikasikan di bidang keteknikan khususnya Teknik Elektro. Buku ajar ini dapat digunakan sebagai acuan utama oleh mahasiswa dan dosen khususnya Program Studi Teknik Elektro dalam proses pembelajaran matakuliah Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan. Matakuliah Kimia Teknik dan Ilmu Lingkungan merupakan salah satu matakuliah dasar yang biasanya diberikan di semester-semester awal sebagai fundamental dalam memahami konsep atom, arus listrik, hingga contoh-contoh aplikasinya dalam pengembangan sumber energi listrik berasal dari energi terbarukan. Buku ajar ini dapat juga digunakan sebagai acuan tambahan untuk mata-mata kuliah yang berhubungan dengan aplikasi pembangkit tenaga listrik dan energi terbarukan seperti mata kuliah Sistem Tenaga Listrik, Rekayasa dan Pengkondisian Energi Terbarukan, Teknologi Pembangkit Tenaga listrik, dan lain-lain.

Pada bagian awal buku ini diuraikan tentang pendahuluan kimia teknik dan hubungan kimia teknik matakuliah lainnya. Pada bagian selanjutnya diuraikan tentang *water treatment*, elektrokimia dan korosi, *electroplating*, aplikasi teknologi kimia dalam rekayasa baterai, bahan bakar kimia, fuel cell, dan bahan isolasi. Pada bagian akhir buku ini dilengkapi dengan aplikasi energi terbarukan untuk pelestarian lingkungan.

Penyelesaian buku ajar ini tidak lepas dari banyak pihak yang telah membantu. Oleh karena itu bersama ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Ir. H. Gunawan Budiyanto, M.P., IPM, sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
2. Dr. Ir. Sukamta, ST., MT., IPM, Sebagai Wakil Rektor Bidang Akademik UMY,

3. Dr. Ir. Gatot Supangkat, M.P., sebagai Kepala LP3M UMY,
4. Dr. Dyah Mutiarin, M.Si., sebagai Kepala Divisi Penelitian LP3M UMY,
5. Jazaul Ikhsan, ST., MT., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik UMY,
6. Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY, yang telah banyak membantu dan memberikan masukan kepada penulis dan dalam mengemban tugas-tugas yang diamanahkan kepada penulis,
7. Almarhumah Ibunda dan Almarhum Ayahanda, semoga Allah SWT mengampuni dosa-dosamu, senantiasa melimpahkan kasih sayang-Nya sebagaimana kasih sayangmu, juga pahit getir perjuanganmu dalam mendidik dan membesarkan putramu ini.
8. Isteriku tercinta Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian buku ajar ini,
9. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga semuanya tercatat sebagai amal shalih yang mendapatkan balasan di dunia dan akhirat kelak, amin ya robbal 'alamin.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada. Akhirnya, semoga buku ajar ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran khususnya pada Program Studi Teknik Elektro.

Yogyakarta, Oktober 2020

Penulis,

Dr. Ramadoni Syahputra

# DAFTAR ISI

PRAKATA .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
1. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Umum .....	1
1.2 Peranan Ilmu Kimia dalam Iptek .....	3
1.3 Hubungan Ilmu Kimia dengan Bidang Ilmu Lain .....	4
2. WATER TREATMENT.....	7
2.1 Pendahuluan.....	7
2.2 Sumber-Sumber Air .....	7
2.3 Jenis-Jenis Impuritas dalam Air.....	10
2.4 Penjernihan Air.....	16
3. ELEKTROKIMIA DAN KOROSI .....	23
3.1 Teori Nernst.....	23
3.2 Potensial Elektroda Standar .....	24
3.3 Korosi.....	26
4. ELECTROPLATING.....	34
4.1 Pendahuluan.....	34
4.2 Aplikasi Electroplating.....	35
4.3 Proses Electroplating.....	37
4.4 Limbah Electroplating .....	37
5. APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BATERAI.....	40
5.1 Pendahuluan.....	40
5.2 Prinsip Dasar Naterai.....	44

5.3	Klasifikasi Baterai .....	47
6.	APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BAHAN BAKAR KIMIA.....	52
6.1	Hidrogen.....	52
6.2	Sel Bahan Bakar .....	56
7.	APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM PEMANFAATAN HIDROGEN.....	62
7.1	Pendahuluan.....	62
7.2	Berbagai Teknologi Sistem Hidrogen .....	64
7.3	Hidrogen Sebagai Penyimpan Energi Surya .....	65
7.4	Penetrasi Pasar Hidrogen .....	66
7.5	Proyek-Proyek Hidrogen.....	67
8.	PEMANFAATAN TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BAHAN ISOLASI .....	73
8.1	Pendahuluan.....	73
8.2	Jenis Bahan Isolasi .....	74
8.3	Kegagalan Isolasi.....	83
9.	APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA ENERGI BARU DAN TERBARUKAN UNTUK PELESTARIAN LINGKUNGAN .....	86
9.1	Pendahuluan .....	86
9.2	Prinsip Kerja Sistem .....	88
9.3	Prototipe Peralatan Produksi Biogas.....	92
	DAFTAR PUSTAKA.....	99

# DAFTAR ISI

Tabel 2.1	
Sifat-sifat penting beberapa jenis air yang digunakan di industri .....	8
Tabel 2.2	
Faktor konversi beberapa impuritas .....	18
Tabel 3.1	
Potensial elektroda standar dalam larutan encer (pada 25°C).....	25
Tabel 4.1	
Teknologi pengolahan limbah .....	38
Tabel 8.1	
Sifat Dielektrik Isolator Keramik.....	79

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 5.1	
Baterai alkalin 9 V yang merupakan contoh perkembangan teknologi baterai saat ini.....	41
Gambar 5.2	
Baterai kecil untuk keperluan peralatan elektronik.....	42
Gambar 5.3	
Konfigurasi baterai ukuran kecil yang digunakan pada laptop.....	42
Gambar 5.4	
Baterai ukuran sedang untuk keperluan percobaan di laboratorium.....	43
Gambar 5.5	
Baterai ukuran besar untuk keperluan sumber daya listrik.....	43
Gambar 5.6	
Penampang suatu model baterai hidrogen.....	48
Gambar 5.7	
Baterai uji elektrokimia produksi R & D.....	50
Gambar 6.1	
Siklus hidrogen .....	52
Gambar 6.2	
Skema prinsip pembuatan gas hidrogen dengan proses oksidasi parsial.....	54
Gambar 6.3	
Skema prinsip pembuatan hidrogen dengan elektrolisis .....	55
Gambar 6.4	
Diagram blok pembuatan energi listrik dengan sel bahan bakar .....	57
Gambar 6.5	
Skema prinsip kerja sel bahan bakar.....	58
Gambar 6.6	
Lengkung tegangan-arus sel bahan bakar.....	60

Gambar 7.1	
Struktur suplai energi.....	62
Gambar 7.2	
Jalur hidrogen .....	63
Gambar 7.3	
Siklus hidrogen surya.....	66
Gambar 7.4	
Stasiun-stasiun pengisian bahan bakar hidrogen .....	69
Gambar 7.5	
Jaringan stasiun pengisian hidrogen dengan electrolyser sebagai “controllable load” .....	70
Gambar 8.1	
Transformator tenaga berisolasi gas SF pada gardu induk pasangan dalam.....	76
Gambar 8.2	
Struktur LDPE, XLPE, LLDPE, dan HDPE .....	80
Gambar 8.3	
Polarisasi elektrik.....	81
Gambar 8.4	
Variasi <i>breakdown strength</i> dan mekanisme breakdown terhadap waktu tekan.....	81
Gambar 8.1	
Gas Insulated Switchgear.....	82
Gambar 9.1	
Penggunaan gas metana untuk berbagai aplikasi.....	87
Gambar 9.2	
Proses produksi biogas .....	88
Gambar 9.3	
Prototype peralatan produksi biogas .....	93
Gambar 9.4	
Cara kerja produksi biogas.....	93
Gambar 9.5	
Proses produksi biogas. ....	96



# 1. PENDAHULUAN

## 1.1 UMUM

Ilmu kimia sangat berkaitan dengan bidang ilmu-ilmu teknik khususnya teknik elektro. Telah kita ketahui bersama bahwa gejala aliran elektron yang merupakan inti dari ilmu teknik elektro pada dasarnya merupakan gejala yang dapat diuraikan melalui ilmu kimia dengan struktur atomnya.

Secara sederhana dapat dikatakan bahwa ilmu kimia adalah ilmu rekayasa materi, yaitu mengubah suatu materi menjadi materi yang lain. Guna dapat melakukan rekayasa tersebut para ahli perlu mengetahui susunan, struktur, serta sifat-sifat materi. Oleh sebab itu secara lebih lengkap ilmu kimia dapat didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari tentang susunan, struktur, sifat, dan perubahan materi, serta energi yang menyertai perubahan tersebut.

Guna menjelaskan definisi di atas, berikut ini dijelaskan beberapa persoalan sehari-hari yang merupakan proses kimia. Jika kita meninjau maksud dari susunan materi, dapat kita ambil contoh dua buah senyawa yaitu air dan alkohol. Secara umum dapat kita ketahui bahwa alkohol mempunyai sifat dapat terbakar, sedang api dapat memadamkan api. Dalam ilmu kimia, senyawa adalah perpaduan dari dua atau lebih jenis unsur dengan komposisi tertentu. Unsur adalah zat yang paling dasar dan penyusun segala macam senyawa. Air adalah senyawa dengan dua jenis unsur yaitu hidrogen (H) dan oksigen (O) dengan rumus kimia  $H_2O$ . Sedang alkohol adalah senyawa dengan tiga jenis unsur yaitu karbon, hidrogen, dan oksigen dengan rumus kimia  $C_2H_5OH$ . Rumus kimia menyatakan susunan atau hakikat zat. Setiap zat mempunyai susunan tertentu yang berbeda dari zat yang lainnya. Para ahli kimia menentukan susunan setiap zat melalui percobaan, dari zat yang sederhana seperti air hingga zat yang sangat kompleks misalnya protein dan DNA. Pengetahuan tentang susunan zat membantu pemahaman tentang sifatnya. Alkohol dapat terbakar karena mengandung karbon (C) dan hidrogen (H) yang dapat bergabung atau bereaksi dengan oksigen (O) dari udara, sedang air adalah senyawa hidrogen dengan oksigen, tidak dapat mengikat oksigen lebih banyak lagi.

Struktur materi dapat dijelaskan dengan terlebih dahulu mengetahui bahwa materi terdiri dari butiran kecil (partikel) yang disebut atom. Atom sejenis atau berlainan dapat bergabung membentuk molekul. Atom dan molekul bersifat netral. Atom atau kumpulan atom yang bermuatan listrik disebut ion. Jadi yang dimaksud dengan struktur materi adalah gambaran tentang bagaimana atom-atom saling terikat. Selain susunan, struktur juga menentukan sifat materi. Intan dan grafit (arang) keduanya adalah karbon (C), tetapi keduanya sangat berbeda. Perbedaannya terletak pada struktur atomnya. Struktur atom dapat ditentukan melalui percobaan. Dewasa ini telah dikembangkan berbagai alat canggih untuk penetapan struktur zat, termasuk berbagai jenis spektrometer dan difraktometer sinar X.

Ilmu kimia juga mempelajari sifat materi. Para ahli telah mengidentifikasi dan mencatat sifat dari jutaan jenis zat. Setiap zat mempunyai sifat khas (spesifik) yang membedakannya dari zat lain. Selain itu antara berbagai zat juga erdapat kemiripan sifat. Berdasarkan kemiripan sifatnya, zat kimia dapat diklasifikasikan dan hal ini sangat memudahkan orang mempelajari ilmu kimia. Pengetahuan yang diperoleh dari pengamatan tentang sifat zat disebut pengetahuan deskriptif. Ilmu kimia tidak hanya mempelajari sifat zat tetapi berusaha mencari prinsip yang mengatur sifat-sifat materi tersebut serta merumuskan teori untuk menerangkan mengapa hal itu terjadi. Misalnya salah satu sifat kimia alkohol adalah dapat terbakar. Seperti disebutkan di atas bahwa sifat terbakar alkohol karena zat tersebut dapat bereaksi dengan oksigen. Bagian dari ilmu kimia yang mencoba memberi penjelasan tentang sifat materi disebut kimia teoritis. Penjelasan ini berfokus pada sifat partikel dasar penyusun materi.

Bagian paling menarik dari ilmu kimia adalah tentang perubahan materi. Para ahli menggunakan perubahan kimia untuk membuat bahan baru dari bahan alam yang relatif murah. Hal ini sangat nyata dalam bidang Farmasi dan penciptaan barang baru seperti obat-obatan, plastik, nilon, dan lain-lain. Perubahan materi sering disertai perubahan energi dalam jumlah yang cukup besar, misalnya reaksi pembakaran. Energi yang dibebaskan pada reaksi pembakaran dapat digunakan untuk memasak, menggerakkan kendaraan, industri, dan sebagainya.

## 1.2 PERANAN ILMU KIMIA DALAM IPTEK

Secara sederhana dapat dikatakan bahwa manfaat ilmu kimia adalah diperolehnya pemahaman yang lebih baik terhadap alam sekitar dan proses yang berlangsung di dalamnya. Sebagai contoh adalah sifat alkohol yang dapat terbakar dan sifat air yang dapat memadamkan api seperti yang dijelaskan secara singkat pada bagian sebelumnya. Manfaat lebih lanjut dari ilmu kimia adalah bahwa dengan ilmu kimia kita dapat mengubah bahan alam menjadi produk yang lebih berguna untuk kebutuhan hidup umat manusia. Dalam zaman modern ini manusia sudah terbiasa dengan kemudahan yang merupakan kontribusi besar ilmu kimia misalnya adanya sabun, pasta gigi, cat, bumbu masak, dan berbagai jenis makanan olahan. Ilmu kimia juga punya andil besar dalam berbagai jenis produk teknologi seperti pesawat televisi, mesin pendingin, dan pesawat terbang. Material yang digunakan dalam berbagai produk tersebut memerlukan komposisi dan sifat khusus yang dihasilkan oleh para ahli kimia.

Selain manfaat yang diperoleh dari ilmu kimia, tidak dapat dipungkiri bahwa kerugian yang ditimbulkannya juga banyak. Sebagai contoh adalah DDT, plastik, CFC, dan berbagai jenis sintetik lainnya. DDT adalah insektisida yang digunakan untuk emmerantas nyamuk malaria, sehingga dapat menyelamatkan jutaan umat manusia. Akan tetapi senyawa itu ternyata persisten (stabil, sukar sekali diuraikan oleh mikroorganisme) sehingga limbahnya mencemari tanah dan air. DDT dapat masuk ke rantai makanan sehingga membahayakan kehidupan berbagai jenis fauna dan juga manusia. Hal seperti ini kurang diantisipasi sebelumnya. Plastik dan CFC ternyata disamping manfaat yang didapatkan dari juga dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Kini para ahli terus melakukan penelitian untuk menanggulangi berbagai kasus pencemaran. Di masa mendatang produk sintetik harus dipejari lebih seksama sehingga meminimalkan masalah lingkungan.

Manfaat lain dari ilmu kimia adalah bahwa dengan belajar ilmu kimia maka dapat terjadi perbaikan dalam pembentukan sikap. Dalam ilmu kimia seringkali dihadapkan pada masalah dan dituntut untuk memecahkannya secara sistematis. Seringkali masalah dalam ilmu kimia tergolong rumit dan kompleks sehingga timbul kesan bahwa ilmu kimia adalah ilmu yang sulit. Sebenarnya kesulitan tersebut

akan menjadi keuntungan bagi kita jika disikapi dengan benar. Kita dapat menjadi terbiasa menghadapi masalah dan memecahkannya secara logis dan terencana. Kebiasaan itu akan membantu kita dalam menghadapi persoalan hidup sehari-hari. Selain itu, dengan ilmu kimia akan menunjukkan kepada kita bahwa betapa teraturnya alam ini, baik alam makro maupun mikro. Dengan demikian akan menambah keimanan dan kecintaan kita kepada ALLAH SWT Sang Pencipta Alam Semesta.

### **1.3 HUBUNGAN ILMU KIMIA DENGAN BIDANG ILMU LAIN**

Ilmu kimia disebut juga ilmu sentral (*central science*) karena peranannya yang sangat penting di antara ilmu pengetahuan lainnya. Tidak ada bidang ilmu pengetahuan alam yang tidak bergantung pada ilmu kimia. Perkembangan dalam bidang kedokteran, teknik, farmasi, geologi, pertanian, dan sebagainya semuanya akan jalan di tempat tanpa kemajuan yang dicapai dalam ilmu kimia. Juga hampir tidak ada industri yang tidak bergantung pada bahan kimia. Begitu juga dalam dunia pendidikan, ilmu kimia berperan sentral.

Penemuan material semikonduktor, superkonduktor, LCD, dan lain-lain merupakan kemajuan yang sangat berarti dalam bidang teknik elektro. Penemuan pupuk, pestisida, dan bahan pengawet telah membawa kemajuan yang sangat berarti dalam bidang pertanian. Perkembangan kimia organik telah menghasilkan kemajuan dalam bidang farmasi, misalnya dalam hal sintesis obat baru. Kemajuan dalam cara penentuan struktur molekul telah memacu kemajuan dalam bidang biologi dan kedokteran. Kemajuan yang dicapai dalam bidang analisis kimia membawa kemajuan dalam berbagai bidang seperti kedokteran, geokimia, ilmu lingkungan, dan industri. Industri kimia merupakan penerapan dari konsep kimia fisika.

Ilmu kimia juga dapat membantu menyelesaikan masalah sosial seperti masalah ekonomi, hukum, seni, dan lingkungan. Berkat kemajuan dalam kimia analisis, komposisi suatu produk dapat ditentukan. Dengan demikian pemalsuan suatu produk dapat dibuktikan. Di bidang hukum, ilmu kimia dapat digunakan misalnya untuk identifikasi barang bukti kejahatan. Sehelai rambut yang tertinggal di tempat kejadian perkara dapat digunakan sebagai petunjuk terlibat atau tidaknya seseorang dalam suatu aksi kejahatan.

Begitu juga dalam bidang seni, ilmu kimia dapat digunakan untuk menentukan asli tidaknya suatu karya seni.

Penyelesaian masalah lingkungan, industri, dan kesehatan umumnya memerlukan ilmu kimia. Jika kita melakukan penelitian untuk memahami penipisan lapisan ozon, atau menentukan struktur kristal suatu bahan, atau material suatu superkonduktor, atau metabolisme dan pernapasan, atau pengaruh obat terhadap tubuh, maka diperlukan ilmu kimia.

Dalam kehidupan sehari-hari sangat banyak kita jumpai bahan kimia. Jadi bukan hanya orang yang bekerja di laboratorium kimia saja yang berhadapan dengan bahan kimia, tetapi semuanya termasuk anak-anak dan ibu rumah tangga. Oleh sebab itu pengetahuan kimia sangat diperlukan bagi setiap orang. Terutama bagi para pengambil kebijakan, jangan sampai keputusan atau kebijakan yang diambil malah menyebabkan masalah terhadap lingkungan.

Bahan kimia itu sendiri sebenarnya tidak perlu ditakuti tetapi harus ditangani secara cermat dan tepat. Perlu disadari bahwa tidak ada suatu zat kimia yang seratus persen aman. Bahkan garam dapur, sesuatu yang selalu ada dalam makanan kita sehari-hari, jika kita makan secara berlebihan dapat menimbulkan masalah misalnya kesehatan tubuh. Kafein, zat aktif yang terdapat pada kopi, the, atau coklat, dalam jumlah kecil dapat merangsang sistem syaraf, tetapi jika dikonsumsi dalam dosis tinggi dapat menimbulkan masalah pada kesehatan dan bahkan dapat berakibat fatal. Bahan kimia yang relatif berbahaya sehingga memerlukan penanganan khusus digolongkan sebagai bahan berbahaya dan beracun (B3). Beberapa contoh B3 yang sering terdapat di rumah tangga adalah pemutih, pembersih lantai, pestisida seperti obat anti nyamuk dan racun tikus, beberapa bahan kosmetik seperti semir rambut, dan alkohol. Bahan-bahan seperti itu harus disimpan baik-baik dan dihindarkan dari jangkauan anak-anak.

Begitu juga dengan penanganan sampah atau limbah. Disebabkan semakin banyaknya kita menggunakan produk industri, makin banyak limbah yang tidak aman untuk lingkungan. Misalnya limbah plastik, ban bekas, deterjen, pupuk, pestisida, dan berbagai limbah industri. Pembakaran limbah plastik atau ban bekas dapat menimbulkan berbagai jenis racun yang akan mencemari udara.

Ilmu kimia telah dikenal sejak sekitar tahun 3500 sebelum masehi. Pada waktu itu peradaban Mesir kuno sudah mempraktekkan reaksi kimia misalnya bagaimana cara membuat anggur, pengawetan mayat, dan pengolahan logam seperti tembaga dan timah. Kemudian sekitar abad ke empat sebelum masehi para filsuf Yunani seperti Democritus dan Aristoteles mencoba memahami hakekat materi.

Pada abad pertengahan yaitu dari tahun 500 – 1600 M, ilmu kimia lebih diarahkan pada segi praktis dari pada memikirkan hakekat materi. Pada masa itu ilmuwan Muslim di tanah Arab dan Persia telah dapat membuat berbagai jenis zat seperti alkohol, arsen, zink, asam iodida, asam sulfat, dan asam nitrat. Para ahli kimia abad pertengahan berupaya untuk mengubah beberapa logam seperti besi, tembaga, dan zink menjadi emas. Selain itu mereka juga berusaha menemukan obat mujarab yang dapat menyembuhkan berbagai penyakit. Nama ilmu kimia lahir pada masa ini. Nama itu berasal dari bahasa Arab "al-kimiya", yang berarti perubahan materi. Nama itu diberikan oleh seorang ilmuwan Arab terkenal yaitu Jabir ibn Hayyan (700 – 778).

Kimia modern dapat dikatakan lahir pada abad ke 18, ketika ahli kimia berkebangsaan Perancis Antoine Laurent Lavoiser (1743 – 1794) melakukan serangkaian percobaan yang akhirnya menemukan hukum kekekalan massa. Selanjutnya muncul ilmuwan-ilmuwan kimia lainnya seperti John Dalton, Neils Bohr, hingga Albert Einstein yang memperkaya khasanah keilmuan khususnya dalam bidang kimia.

### **Latihan:**

1. Jelaskan pengertian ilmu kimia.
2. Jelaskan peranan ilmu kimia dalam kehidupan umat manusia sehari-hari.
3. Jelaskan keterkaitan ilmu kimia dengan bidang ilmu lainnya.

## 2. WATER TREATMENT

### 2.1 PENDAHULUAN

Air adalah salah satu bahan pokok (komoditas) yang paling melimpah di alam tetapi juga salah satu yang paling sering disalahgunakan. Sebagaimana diketahui bahwa bumi merupakan planet biru dan sekitar 4/5 dari permukaannya ditutupi air. Sekitar 97% dari air di bumi berada di lautan. Air laut kandungan garamnya sangat tinggi, sehingga kurang baik jika digunakan untuk air minum maupun pertanian atau proses industri. Saat ini diperkirakan hanya sekitar 0,3% dari sumber-sumber air di bumi yang dimanfaatkan oleh manusia untuk kebutuhan hidup, pertanian, dan proses industri. Lalu dikembangkan teknologi untuk memanfaatkan air dari lautan dan gunung es (*icebergs*).

### 2.2 SUMBER-SUMBER AIR

Air sangat dibutuhkan untuk keperluan pertanian, industri, dan kebutuhan hidup manusia. Untuk keperluan industri, air alami dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Air permukaan
  - a. air yang mengalir, contoh *stream* dan air sungai (*Moorland surface drainage*)
  - b. air diam, contoh danau, waduk, dan kolam (*Lowland surface drainage*)
2. Air bawah tanah
  - a. air sumur
  - b. air di pertambangan
3. Air hujan
4. Air muara/kuala (*estuarine*) dan air laut

Untuk keperluan industri, tidak mungkin menggunakan air hujan dan air laut secara langsung. Air hujan sifatnya musiman dan butuh biaya tinggi untuk mengumpulkannya. Air laut maupun muara kandungan garamnya tinggi. Tiga sumber air yang banyak digunakan di industri adalah:

1. Moorland surface drainage
2. Lowland surface drainage
3. Air sumur

Tabel 2.1 Sifat-sifat penting beberapa jenis air yang digunakan di industri

No.	Tipe Air	Unsur pokok dan konsentrasinya (ppm)	pH	Silika (ppm)	Larutan zat padat (ppm)	Tingkat kekerasan CaCO <sub>3</sub> (ppm)		
						alkaline	non-alkaline	Total
1	Moorland surface drainage	Na <sup>+</sup> ___ 8 Ca <sup>2+</sup> ___ 7 Mg <sup>2+</sup> ___ 6 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ 15 Cl <sup>-</sup> ___ 10 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ___ 31 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ sedikit	6.7	8	77	12	30	42
2	Lowland surface drainage	Na <sup>+</sup> ___ 25 Ca <sup>2+</sup> ___ 63 Mg <sup>2+</sup> ___ 18 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ 160 Cl <sup>-</sup> ___ 43 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ___ 80 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ 15	7.5	10	333	130	100	230
3	Air sumur	Na <sup>+</sup> ___ 74 Ca <sup>2+</sup> ___ 48 Mg <sup>2+</sup> ___ 20 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ 350 Cl <sup>-</sup> ___ 48 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ___ 10 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ___ sedikit	7.0	15	388	203	0	203

### 2.2.1 Moorland Surface Drainage

Air yang berasal dari sumber ini biasanya mempunyai komposisi yang relatif konstan. Air dari sumber ini umumnya bersih dan berwarna kecoklatan. Tingkat keasaman air ini relatif rendah yang disebabkan kehadiran larutan karbon dioksida dan asam organik ringan, yang dapat mengakibatkan korosi. Akan tetapi kandungan logam (*hardness*) dari air jenis ini rendah, yang dapat mengakibatkan

pembentukan kerak pada boiler kecuali kalau dilakukan perawatan (*treatment*) sebelum digunakan. Jenis air moorland surface drainage mengandung bakteri besi yang harus dihilangkan menggunakan klorinasi untuk mencegah endapan dalam saluran pipa. Jenis air ini mempunyai kecenderungan sifat berupa larutan timah dan tembaga. Kenyataan ini harus dipertimbangkan jika air ini digunakan untuk keperluan air minum.

### **2.2.2 Lowland Surface Drainage**

Air yang berasal dari sumber ini mempunyai komposisi yang beragam dari satu tempat ke tempat yang lain. Umumnya air ini tidak berwarna tetapi sedikit mengandung lumpur, yang tidak mudah untuk ditanggulangi kecuali dengan bantuan pengental/pembeku (*coagulant*). Tingkat kandungan logamnya biasanya tinggi dan dapat menyebabkan pembentukan kerak yang serius dalam boiler, ekonomizer, dan cooler, kecuali dilakukan perawatan sebelum menggunakan air tersebut. Bilamana air dipanaskan dalam boiler, maka  $\text{CO}_2$  yang dihasilkan dari ion bikarbonat terbang bersama-sama dengan uap dan larut dalam kondensate, membentuk asam karbonat yang bersifat korosif. Air sungai dan kanal dapat terkontaminasi oleh impuritas dan limbah industri, sehingga perlu untuk dirawat (*treatment*) terlebih dahulu sebelum dilunakkan (*softening*).

### **2.2.3 Air Sumur**

Air jenis ini komposisinya relatif konstan, kecuali kalau terkontaminasi oleh lingkungan sekitarnya. Ketika baru diambil, air sumur biasanya tidak berwarna dan bersih. Jenis air ini dapat berkembang menjadi berwarna coklat menyembul ke udara karena kehadiran sejumlah kecil besi ferro, yang dikonversi ke dalam oksida ferro hidrasi. Jejak manganese seperti  $\text{H}_2\text{S}$  juga dapat muncul.

Pada air sumur yang sangat dalam, konsentrasi bikarbonat lebih dari ekuivalen kombinasi konsentrasi ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  sehingga  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  perlu dipertimbangkan keberadaannya. Kandungan logam air jenis ini sepenuhnya kandungan logam alkalin (*alkaline hardness*). Kandungan sulfat pada air jenis ini seringkali rendah.

### 2.3 JENIS-JENIS IMPURITAS DALAM AIR

Impuritas yang terdapat dalam air alami dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Impuritas berupa larutan, yang terdiri dari
  - a. garam inorganik, contohnya:  
kation:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , dan kadang-kadang jejak  $\text{Zn}^{2+}$  dan  $\text{Cu}^{2+}$ .  
anion:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , dan kadang-kadang  $\text{F}^-$  dan  $\text{NO}_2^-$ .
  - b. gas, contohnya  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , oksida  $\text{N}_2$  dan kadang-kadang  $\text{NH}_3$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ .
2. Impuritas berupa suspended, yang berupa inorganik contohnya lempung dan pasir, dan organik contohnya tetesan minyak, zat tumbuhan dan hewan.
3. Impuritas berupa koloid, terbagi atas lempung dan silika, hidroksida aluminium, hidroksida ferro, produk limbah organik, asam humic, pewarna, asam amino protein kompleks, yang umumnya diklasifikasikan sebagai amonia albunoid.
4. Impuritas berupa bakterial, yaitu bakteri, dan mikro organisme lainnya dan juga hewan dan tumbuhan.

Berbagai jenis koostran yang terdapat dalam air alami sangat mempengaruhi sifat-sifat dari air tersebut. Guna keperluan industri, karakteristik dan pengaruh impuritas terhadap kualitas air mencakup beberapa faktor diantaranya:

1. Warna
2. Rasa dan bau
3. Kekeruhan dan endapan
4. Mikroorganisme
5. Zat mineral terlarut yaitu: kandungan logam, alkalinitas, total zat padat, dan korosi.
6. Gas terlarut
7. Kandungan silikon, dan
8. Oksidabilitas.

Kandungan logam (*hardness*) pada awalnya didefinisikan sebagai kapasitas konsumsi sabun (*soap*) dari suatu sampel air. Sabun umumnya terdiri dari garam sodium asam lemak rantai-panjang seperti asam oleic, asam palmetic, dan asam stearic. Kapasitas konsumsi sabun dari air utamanya disebabkan oleh kehadiran ion calcium dan magnesium. Dalam praktek, kandungan logam (*hardness*) dari suatu sampel air biasanya diambil sebagai suatu ukuran dari muatan  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ .

Ketika air dipanaskan, ion bicarbonat terdekomposisi untuk membentuk ion-ion karbonat dan karbon dioksida menjadi bebas. Ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  siap bergabung dengan ion karbonat untuk membentuk endapan  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{MgCO}_3$ . Kandungan logam (*hardness*) sehingga terbentuknya endapan, dikenal dengan istilah “kandungan logam temporer”, dan kini istilah tersebut digunakan untuk seluruh kandungan logam yang berkenaan dengan kandungan bikarbonat dalam air.

Perbedaan antara kandungan logam temporer dan kandungan logam total disebut sebagai kandungan logam permanen (*permanent hardness*). Hal ini disebabkan kandungan logam tersebut tidak hilang karena proses pemanasan (*boiling*) air. Kandungan logam permanen terdiri dari larutan chlorides, sulfates, dan nitrates dari kalsium dan magnesium. Kandungan logam alkaline adalah kandungan logam yang disebabkan oleh bicarbonates, carbonates, dan hydroxydes dari logam penghasil kekerasan. Kandungan logam ini sering juga disebut “kandungan logam karbonat”. Kandungan logam non-alkaline diperoleh dengan mengurangkan kandungan logam total terhadap kandungan logam alkaline. Kandungan logam ini sering disebut sebagai “kandungan logam non-karbonat”.

Satuan-satuan kandungan logam yang biasa digunakan dalam analisis diantaranya:

- Parts per million (ppm)

Satu ppm adalah satu unit bobot solusi per juta unit bobot solusi.

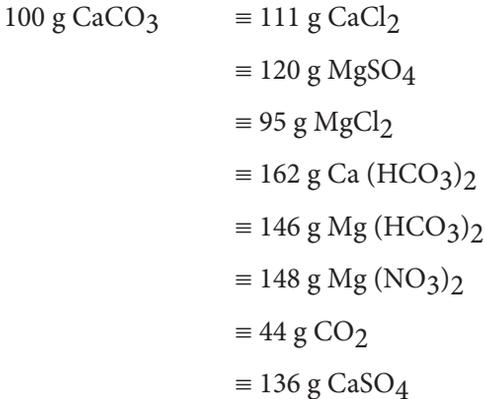
$$1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/liter}$$

Biasanya menyatakan kekerasan ekivalen  $\text{CaCO}_3$ . Seluruh kandungan logam penyebab ketidakmurnian, pertama-tama dikonversikan sesuai dengan bobot ekivalen  $\text{CaCO}_3$  dan total jumlah yang sama dinyatakan dalam ppm.

$$Ekivalen CaCO_3 = \frac{\text{bobot zat} \times 50}{\text{bobot ekivalen zat kimia}} \quad \dots\dots(2.1)$$

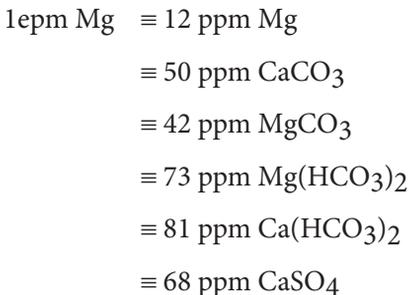
(karena bobot ekivalen kimia  $CaCO_3 = 50$ )

Sebagai contoh, 136 bagian dari bobot  $CaSO_4$  akan bereaksi dengan jumlah sabun yang sama sebanyak 100 bagian dari bobot  $CaCO_3$  (yaitu 2 ekivalen  $CaCO_3$ ). Oleh sebab itu, guna mengkonversi bobot  $CaSO_4$  sebagai ekivalen dari  $CaCO_3$ , maka bobot  $CaSO_4$  harus dikalikan dengan faktor 100/136 atau 50/68. Dengan cara yang sama, maka untuk senyawa yang lain diberikan kesepadannya sebagai berikut:



- Equivalentents per million (epm)

Satu epm adalah satu unit bobot ekivalen kimia dari solusi per juta unit bobot solusi. 1 epm = 1 miligram ekivalen per liter, dan dalam titrimetry, 1 epm secara konvensional diambil sebagai sama dengan 1 ml dari 1 N solusi per liter. Jadi,



- ≡ 47,5 ppm  $\text{MgCl}_2$
- ≡ 55,5 ppm  $\text{CaCl}_2$
- ≡ 60 ppm  $\text{MgSO}_4$ , dan seterusnya

Perlu dicatat bahwa untuk sembarang material larutan, konsentrasi epm sama dengan 50 ppm  $\text{CaCO}_3$ ,

- 1 ppm = 1 mg/l = 0,1° French = 0,07° Clark
- = 0,07 grains per imperial gallon
- = 0,0583 grains per US gallon
- = 0,02 epm  $\text{CaCO}_3$
- 1° Clark = 14,3 ppm = 1,43° French
- = 1 grain per imperial gallon
- = 0,833 grain per US gallon

Air yang mempunyai kandungan logam (*hardness*) kurang dari 150 ppm umumnya diklasifikasikan “baik”, air yang mempunyai kandungan logam (*hardness*) antara 150 hingga 350 ppm umumnya diklasifikasikan “sedang”, dan air yang mempunyai kandungan logam (*hardness*) lebih dari 350 ppm umumnya diklasifikasikan “buruk”.

Dalam mempersiapkan air untuk penggunaan di industri, maka langkah yang sangat penting adalah penjernihan (*softening*), yaitu menghilangkan *hardness*. Jika air dengan kandungan logam yang buruk digunakan dalam pabrik tekstil, pencucian, dan industri lainnya yang melakukan operasi pencucian menggunakan sabun, maka akan dibutuhkan sabun yang sangat banyak dalam operasinya. Beberapa industri seperti kertas, rayon, es, masakan, dan lain-lain membutuhkan air jernih.

**Contoh 2.1** Hitung kandungan logam (*hardness*) temporer dan permanen dari suatu sampel air yang mempunyai analisis berikut:

$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	—	73 mg/l
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	—	162 mg/l
$\text{CaSO}_4$	—	136 mg/l

MgCl <sub>2</sub>	—	95 mg/l
CaCl <sub>2</sub>	—	111 mg/l
NaCl	—	100 mg/l

Jawab:

Garam		Ekivalen CaCO <sub>3</sub>
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	$73 \times \frac{100}{146} = 50 \text{ mg/l}$
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	$162 \times \frac{100}{162} = 100 \text{ mg/l}$
CaSO <sub>4</sub>	—	$136 \times \frac{100}{136} = 100 \text{ mg/l}$
MgCl <sub>2</sub>	—	$95 \times \frac{100}{95} = 100 \text{ mg/l}$
CaCl <sub>2</sub>	—	$111 \times \frac{100}{111} = 100 \text{ mg/l}$
NaCl	—	Tidak memberikan kontribusi terhadap hardness dan karenanya diabaikan.

$$\begin{aligned}
 \text{Hardness temporer} &\equiv [\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2] + [\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2] \\
 &= 50 \text{ mg/l} + 100 \text{ mg/l} \\
 &= 150 \text{ mg/l atau } 150 \text{ ppm} \\
 &= 150 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
 &= 10,5^\circ \text{ Clark}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Hardness permanen} &\equiv [\text{CaSO}_4] + [\text{MgCl}_2] + [\text{CaCl}_2] \\
 &= 100 \text{ mg/l} + 100 \text{ mg/l} + 100 \text{ mg/l} \\
 &= 300 \text{ mg/l} \\
 &= 300 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
 &= 21^\circ \text{ Clark}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Hardness total} &= 150 + 300 = 450 \text{ ppm} \\
 &= 450 \times 0,07^\circ \text{ Clark}
 \end{aligned}$$

$$= 31,5^\circ \text{ Clark}$$

Metode alternatif dalam perhitungan hardness:

Bobot ekuivalen dari garam-garam yang diberikan dalam soal:

$$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 \quad \text{---} \quad \frac{146}{2} = 73$$

$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \quad \text{---} \quad \frac{162}{2} = 81$$

$$\text{CaSO}_4 \quad \text{---} \quad \frac{136}{2} = 68$$

$$\text{MgCl}_2 \quad \text{---} \quad \frac{95}{2} = 47,5$$

$$\text{CaCl}_2 \quad \text{---} \quad \frac{111}{2} = 55,5$$

$$\text{CaCO}_3 \quad \text{---} \quad \frac{100}{2} = 50$$

$$\text{Ekivalen per juta, epm} = \frac{\text{bobot dalam ppm atau mg/l}}{\text{bobot ekuivalen}}$$

Sekarang,

$$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 \quad \text{---} \quad \frac{73}{73} = 1 \text{ epm}$$

$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \quad \text{---} \quad \frac{162}{81} = 2 \text{ epm}$$

$$\text{CaSO}_4 \quad \text{---} \quad \frac{136}{68} = 2 \text{ epm}$$

$$\text{MgCl}_2 \quad \text{---} \quad \frac{95}{47,5} = 2 \text{ epm}$$

$$\text{CaCl}_2 \quad \text{---} \quad \frac{111}{55,5} = 2 \text{ epm}$$

NaCl \quad \text{---} \quad \text{Tidak memberikan kontribusi terhadap hardness dan karenanya diabaikan.}

$$\begin{aligned}
\text{Hardness temporer} &\equiv 50 \times \{[\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2] + [\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]\} \\
&= 50 \times \{1 + 2\} \\
&= 150 \text{ ppm sebagai } \text{CaCO}_3 \\
&= 150 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
&= 10,5^\circ \text{ Clark}
\end{aligned}$$

(karena 1 epm dari masing-masing garam 50 ppm  $\text{CaCO}_3$ )

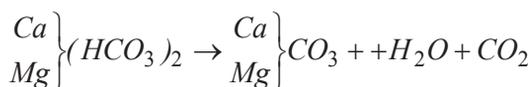
$$\begin{aligned}
\text{Hardness permanen} &\equiv 50 \times \{[\text{CaSO}_4] + [\text{MgCl}_2] + [\text{CaCl}_2]\} \\
&= 50 \times \{2 + 2 + 2\} \\
&= 300 \text{ ppm sebagai } \text{CaCO}_3 \\
&= 300 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
&= 21^\circ \text{ Clark}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Hardness total} &= \text{hardness temporer} + \text{hardness permanen} \\
&= 150 + 300 = 450 \text{ ppm} \\
&= 450 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
&= 31,5^\circ \text{ Clark}
\end{aligned}$$

## 2.4 PENJERNIHAN AIR

Konsentrasi impuritas terlarut sebagian besar menentukan tingkat kandungan logam (*hardness*) air. Proses menghilangkan *hardness* yang menyebabkan garam dari air disebut penjernihan air (*softening of water*). Penjernihan air sangat penting dilakukan terutama untuk industri yang bergerak dalam bidang tekstil, londri, kertas, rayon, dan lain-lain. Air yang digunakan untuk pembangkitan uap harus benar-benar jernih untuk meminimalkan persoalan yang dapat ditimbulkan misalnya pembentukan kerak dalam boiler, yang menyebabkan turunnya efisiensi boiler dan menyebabkan penyempitan pada pipa boiler.

Metode-metode berikut ini umumnya digunakan untuk menjernihkan air. *Hardness temporer* dapat dihilangkan dengan memanaskan air. Gas-gas terlarut seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  hilang secara simultan.



### 2.4.1 Proses Kapur-Soda

Proses ini merupakan metode yang paling penting dalam penjernihan air secara kimia. Prinsip dasar dalam proses ini adalah secara kimiawi mengubah hardness larutan yang menyebabkan impuritas ke dalam endapan tak larut yang dapat dihilangkan dengan menggunakan pengendapan dan penapisan (*filtration*).

Reaksi proses kapur soda dalam penjernihan air dapat diringkaskan sebagai berikut:

- a. kapur menghilangkan hardness temporer



- b. kapur menghilangkan hardness magnesium permanen



- c. kapur menghilangkan larutan garam besi dan aluminium



- d. kapur menghilangkan asam mineral bebas



- e. kapur menghilangkan larutan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$



- f. soda menghilangkan seluruh hardness permanen kalsium dapat larut



Jenis-jenis penjernih kapur-soda cara dingin adalah:

1. Jenis intermiten
2. Jenis konvensional
3. Jenis katalis atau spiraktor
4. Jenis lapisan endapan

Untuk jenis intermiten merupakan proses setumpuk (*batch process*), sedang jenis konvensional, katalis, dan lapisan endapan merupakan proses kontinyu.

Guna menyelesaikan secara numerik jumlah kapur dan soda yang dibutuhkan untuk menjernihkan air, maka dapat dilakukan langkah-langkah berikut:

1. Satuan impuritas dinyatakan dalam ppm (atau mg/l), grain per galon (atau derajat Clark), dan lain-lain.
2. Material yang tidak memberikan kontribusi terhadap hardness (misalnya KCl, NaCl, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, dan lain-lain) harus diabaikan dalam perhitungan kebutuhan kapur dan soda. Kenyataan ini harus secara tegas dinyatakan.
3. Seluruh material yang menyebabkan hardness harus dikonversi ke dalam ekivalen CaCO<sub>3</sub>, sesuai dengan persamaan (2.1).

Sebagai contoh, 136 bagian dari bobot CaSO<sub>4</sub> akan berisi sejumlah Ca sebanyak 100 bagian dari bobot CaCO<sub>3</sub>. Oleh karenanya dalam rangka mengkonversi bobot CaSO<sub>4</sub> sebagai ekivalennya dengan CaCO<sub>3</sub>, bobot CaSO<sub>4</sub> harus dikalikan dengan dengan faktor 100/136 atau 50/68.

Faktor konversi beberapa impuritas dalam air diberikan dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Faktor konversi beberapa impuritas

Garam	Faktor pengali untuk mengkonversi ke dalam ekivalen CaCO <sub>3</sub>
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	100/162
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	100/146
CaSO <sub>4</sub>	100/136
CaCl <sub>2</sub>	100/111

MgSO <sub>4</sub>	100/120
MgCl <sub>2</sub>	100/95
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	100/148
Ca <sup>2+</sup>	100/40
Mg <sup>2+</sup>	100/24
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	100/(61 x 2)
HCl	100/(36,5 x 2)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100/98
Co <sub>2</sub>	100/44
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	100/(342/3)
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	100/278
CaCO <sub>3</sub>	100/100
MgCO <sub>3</sub>	100/84
NaAlO <sub>2</sub>	100/(82 x 2)

4. Hitung kapur dan soda yang diperlukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Kapur (lime) yang diperlukan} = \frac{74}{100} \times \left( \begin{array}{l} \text{Kandungan kalsium temporer} \\ + (2 \times \text{kandungan magnesium temporer}) \\ + \text{Kandungan Magnesium permanen} \\ + \text{CO}_2 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCO}_3^- \\ + (\text{garam Fe}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{dll}) - \text{NaAlO}_2 \end{array} \right) \dots\dots(2.2)$$

$$\text{Soda yang diperlukan} = \frac{106}{100} \times \left( \begin{array}{l} \text{Kandungan kalsium permanen} \\ + \text{kandungan magnesium permanen} \\ + (\text{garam Fe}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{dll}) \\ \text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HCO}_3^- - \text{NaAlO}_2 \end{array} \right) \dots\dots(2.3)$$

5. Jika kapur dan dan soda yang digunakan adalah tidak murni (*impure*), dan jika diberikan % kemurniannya (*purity*), maka kebutuhan aktual bahan kimia tersebut harus disesuaikan. Untuk kebutuhan kapur, jika diberikan kemurnian 90%, maka nilai yang didapatkan dalam persamaan (2.2) harus dikalikan dengan 100/90 untuk mendapatkan kebutuhan kapur yang sebenarnya. Untuk kebutuhan soda, jika diberikan kemurnian 95%, maka nilai yang didapatkan dalam persamaan (2.3) harus dikalikan dengan 100/90 untuk mendapatkan kebutuhan soda yang sebenarnya.

**Contoh 2.2** Hitunglah jumlah kapur (kemurnian 84%) dan soda (kemurnian 92%) yang dibutuhkan untuk mengolah 20.000 liter air, yang mempunyai kandungan senyawa-senyawa sebagai berikut:

Ca (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	40.5 ppm
Mg (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	36.5 ppm
MgSO <sub>4</sub>	—	30.0 ppm
CaSO <sub>4</sub>	—	34.0 ppm
CaCl <sub>2</sub>	—	27.75 ppm
NaCl	—	10.0 ppm

Hitung juga kandungan logam (*hardness*) temporer dan permanen dan sampel air tsb.

Jawab:

Garam		Ekivalen CaCO <sub>3</sub>
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	$36,5 \times \frac{100}{146} = 25 \text{ mg / l}$
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	$40,5 \times \frac{100}{162} = 25 \text{ mg / l}$
MgSO <sub>4</sub>	—	$30 \times \frac{100}{120} = 25 \text{ mg / l}$
CaSO <sub>4</sub>	—	$34 \times \frac{100}{136} = 25 \text{ mg / l}$
CaCl <sub>2</sub>	—	$27,75 \times \frac{100}{111} = 25 \text{ mg / l}$
NaCl	—	Tidak memberikan kontribusi terhadap <i>hardness</i> dan karenanya diabaikan.

$$\begin{aligned}
 \text{Hardness temporer} &\equiv [\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2] + [\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2] \\
 &= 25 \text{ mg/l} + 25 \text{ mg/l} \\
 &= 50 \text{ mg/l atau } 50 \text{ ppm} \\
 &= 50 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
 &= 3,5^\circ \text{ Clark}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Hardness permanen} &\equiv [\text{MgSO}_4] + [\text{CaSO}_4] + [\text{CaCl}_2] \\
&= 25 \text{ mg/l} + 25 \text{ mg/l} + 25 \text{ mg/l} \\
&= 75 \text{ mg/l} \\
&= 75 \times 0,07^\circ \text{ Clark} \\
&= 5,25^\circ \text{ Clark}
\end{aligned}$$

Kapur diperlukan untuk  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , dan  $\text{MgSO}_4$ . Soda diperlukan untuk  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$  dan  $\text{CaSO}_4$  yang dihasilkan dari reaksi kapur dengan  $\text{MgSO}_4$ .

Dengan demikian, kapur dengan kemurnian 84% yang dibutuhkan untuk mengolah 20.000 liter air ialah:

$$\begin{aligned}
&= \frac{74}{100} [25 + (2 \times 25) + 25] \times \frac{100}{84} \times \frac{20000}{1000} \\
&= \mathbf{1761,905 \text{ g}} \\
&= \mathbf{1,7619 \text{ kg}}
\end{aligned}$$

Soda dengan kemurnian 92% yang dibutuhkan untuk menjernihkan 20.000 liter air ialah:

$$\begin{aligned}
&= \frac{106}{100} [25 + 25 + 25] \times \frac{100}{92} \times \frac{20000}{1000} \\
&= \mathbf{1728,26 \text{ g}} \\
&= \mathbf{1,72826 \text{ kg}}
\end{aligned}$$

**Latihan:**

1. Jelaskan pengertian istilah-istilah berikut ini:

- a. *water treatment*.
- b. *hardness*
- c. *hardness* temporer
- d. *hardness* permanen
- e. alkalinitas

2. Suatu sampel air mempunyai hasil laporan analisis sebagai berikut:

MgCO <sub>3</sub>	—	84 mg/l
CaCO <sub>3</sub>	—	40 mg/l
CaCl <sub>2</sub>	—	55.5 mg/l
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	37 mg/l
KCl	—	20 mg/l

Hitunglah jumlah kapur (kemurnian 86%) dan soda (kemurnian 83%) yang dibutuhkan untuk mengolah 80.000 liter air, dengan terlebih dahulu menentukan *hardness* temporer dan permanennya.

## 3. ELEKTROKIMIA DAN KOROSI

### 3.1 TEORI NERNST

Menurut teori Nernst, bahwa tidak ada logam yang benar-benar tidak dapat larut, dan seluruh logam mempunyai kecenderungan dapat larut. Jika sebatang tembaga dicelupkan dalam air, beberapa atom tembaga akan melepaskan elektron valensinya ion-ion tembaga yang bermuatan positif yaitu  $\text{Cu}^{++}$  keluar menuju solusi (larutan). Kejadian ini menjadikan elektroda logam kelebihan muatan negatif sehingga terjadi perbedaan potensial antara logam dan solusi. Ion bermuatan positif  $\text{Cu}^{++}$  menarik batang logam bermuatan negatif yang dikarenakan atraksi elektrostatik. Proses ini berlangsung terus hingga dicapai equilibrium bilamana jumlah ion  $\text{Cu}^{++}$  kembali ke elektroda tembaga dan kembalinya dua elektron pembentukan atom Cu sama dengan jumlah atom tembaga yang pergi menuju solusi seperti  $\text{Cu}^{++}$ .



Pada tahap ini proses berhenti, kecuali jika keadaan equilibrium tersebut terganggu.

Jika elektroda tembaga diletakkan dalam solusi garam tembaga terkonsentrasi, maka  $\text{Cu}^{++}$  akan lebih cenderung menumpuk pada elektroda sebagai atom tembaga dari pada untuk atom elektroda tembaga yang pergi menuju solusi sebagai ion. Pada konsentrasi khusus  $\text{Cu}^{++}$  dalam solusi, perbedaan potensial antara logam dan solusi adalah nol.

Seng (*zinc*) menunjukkan jauh lebih cenderung untuk pergi menuju solusi dalam air sebagai  $\text{Zn}^{++}$  dari pada tembaga, dan untuk konsider equilibrium yang telah dicapai, konsentrasi  $\text{Zn}^{++}$  dalam solusi yang diperlukan jauh lebih besar. Dalam kasus sodium, kecenderungan untuk menuju solusi seperti  $\text{Na}^+$  masih lebih tinggi. Kecenderungan sebuah logam ini untuk pergi menuju solusi (larutan) sebagaimana ion yang masuk dalam air tergabung dalam persamaan potensial elektrodanya.

Hubungan antara potensial elektroda dan konsentrasi (atau lebih tepatnya "aktivitas") ion logam diberikan oleh persamaan Nernst sebagai berikut:

$$E = \frac{0,0591}{n} \log \frac{C}{K} \quad \dots\dots(3.1)$$

dengan, C = konsentrasi (atau lebih tepatnya "aktivitas") ion logam dalam gram ion per liter,

n = muatan atau valensi ion, dan

K = konstanta equilibrium.

Jika C = K, maka potensialnya adalah nol. Nernst mengusulkan bahwa nilai K untuk masing-masing ion memberikan estimasi kuantitatif dari kecenderungan logam untuk membentuk larutan elektrolit dan oleh karenanya disebut konstanta tensi larutan elektrolit.

### 3.2 POTENSIAL ELEKTRODA STANDAR

Untuk menentukan beda potensial antara sebuah elektroda dengan larutan, maka diperlukan elektroda lain dan sebuah larutan yang perbedaannya potensialnya diketahui secara akurat. Dua bagian sel dapat dikombinasikan untuk membentuk sel volta, emf -nya dapat langsung diukur. Karena emf dari sel merupakan penjumlahan aritmetik atau perbedaan potensial dua elektroda, maka nilai potensial yang belum diketahui dapat dicari. Elektroda referensi primer adalah elektroda hidrogen normal atau standar. Elektroda ini dapat dibuat dari gelembung gas hidrogen pada tekanan 1 atmosfer pada plat platinum, yang dicelupkan dalam larutan asam hidroklorik yang berisi ion hidrogen pada kesatuan aktivitas. Dengan konvensi, potensial elektrode hidrogen standar adalah diambil pada tegangan nol pada seluruh temperatur. Dengan menghubungkan elektrode hidrogen standar dengan sebuah elektroda logam yang bersentuhan dengan larutan ion-ion kesatuan aktivitasnya, potensial elektroda standar dari berbagai logam dapat ditentukan. Nilai-nilai tersebut disusun dalam tabel 1. Bilamana logam tersusun menurut potensial elektroda standarnya, maka disebut dengan deret elektrokimia (*electrochemical series*) dari logam.

Jadi, jika  $C = 1$ , maka persamaan Nernst menjadi:

$$E_0 = \frac{0,0591}{n} \log \frac{1}{K} \dots\dots(3.2)$$

dengan,  $E_0$  = potensial elektroda standar.

Potensial elektroda standar logam disebut juga dengan potensial oksidasi standar, karena konversi atom netrak ke ion positif disebut oksidasi.

Tabel 3.1 Potensial elektroda standar dalam larutan encer (pada 25°C)

Sistem elektroda ion-logam	Reaksi elektroda (larutan asam)	Potensial elektroda standar ( $E_0$ ) dalam volt
Li/Li <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = Li	- 3,045
K/K <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = K	- 2,925
Ca/Ca <sup>++</sup>	Ca <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Ca	- 2,866
Na/Na <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = Na	- 2,714
Mg/Mg <sup>++</sup>	Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Mg	- 2,363
Al/Al <sup>+++</sup>	Al <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> = Al	- 1,662
Mn/Mn <sup>++</sup>	Mn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Mn	- 1,180
Zn/Zn <sup>++</sup>	Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Zn	- 0,763
Cr/Cr <sup>+++</sup>	Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> = Cr	- 0,744
Fe/Fe <sup>++</sup>	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Fe	- 0,441
Cd/Cd <sup>++</sup>	Cd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Cd	- 0,441
Co/Co <sup>++</sup>	Co <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Co	- 0,277
Ni/Ni <sup>++</sup>	Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Ni	- 0,250
Sn/Sn <sup>++</sup>	Sn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Sn	- 0,136
Pb/Pb <sup>++</sup>	Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Pb	- 0,126
H <sub>2</sub> /2H <sup>+</sup>	2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> = H <sub>2</sub>	0,000
Cu/Cu <sup>++</sup>	Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Cu	0,337
Cu/Cu <sup>+</sup>	Cu <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = Cu	0,522
Hg/Hg <sup>+</sup> atau Hg <sub>2</sub> /2H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = Hg	0,799
Ag/Ag <sup>+</sup>	Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> = Ag	0,800
Hg/Hg <sup>++</sup>	Hg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Ag	0,854
Pd/Pd <sup>++</sup>	Pd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Pd	0,987
Pt/Pt <sup>++</sup>	Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> = Pt	1,2
Au/Au <sup>+++</sup>	Au <sup>2+</sup> + 3e <sup>-</sup> = Au	1,42

Tabel 3.1 menunjukkan estimasi kuantitatif derel elektrokimia. Nilai potensial yang lebih negatif maka semakin besar kecenderungan logam menjadi larutan dalam keadaan ionik. Jadi, potasium mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk menjadi larutan,

dengan  $E_0 = -2,92$ , dimana emas setidaknya kecenderungan menjadi larutan dengan  $E_0 = +1,42$ .

Selanjutnya, sebuah logam secara normal akan menggantikan logam-logam lain di bawahnya dari deret dari larutan garamnya dan mengendapkannya dalam bentuk metalik. Jadi, Mg, Al, Zn, atau Fe, akan menggantikan Cu dari larutan garamnya. Hal yang sama akan terjadi pada Pb akan menggantikan Cu, Hg, atau Ag, sementara Cu akan menggantikan Ag.

### 3.3 KOROSI

Korosi dapat didefinisikan sebagai perusakan secara bertahap atau kehancuran atau memburuknya suatu logam yang disebabkan oleh reaksi kimia atau *electrochemical* dengan lingkungannya. Korosi merupakan faktor penting khususnya dalam suatu pabrik proses kimia.

Seluruh logam dan campuran logam (*alloy*) rentan terhadap korosi. Tidak ada material tunggal yang dapat digunakan untuk seluruh aplikasi. Sebagai contoh adalah emas. Emas mempunyai resistansi (ketahanan) yang sangat baik terhadap korosi pada kondisi atmosfer, tetapi emas dapat rusak ketika terkena mercury pada temperatur ambang. Pada sisi lain, besi mudah berkarat pada kondisi atmosfer, tetapi tidak rusak pada temperatur ambang karena mercury. Jadi, beberapa logam dan campuran logam dapat berperilaku baik terhadap lingkungannya.

#### 3.3.1 Dampak Korosi

Dampak ekonomi dan sosial dari korosi meliputi

1. Aktifitas pabrik dapat terhenti karena kegagalan (*failure*).
2. Perlengkapan yang terkena korosi harus diganti.
3. Harus dilakukan pencegahan (*preventive maintenance*), misalnya dengan pengecatan.
4. Harus mendesain peralatan yang tahan korosi.
5. Susut efisiensi (*loss of efficiency*).
6. Kontaminasi atau susut produksi, karena tercemar korosi.
7. Keselamatan/keamanan, misalnya dari produk yang mengandung racun.
8. Kesehatan, dari polusi akibat suatu produk atau peralatan yang terkena korosi.

### 3.3.2 Penyebab Korosi

Umumnya lebih mudah untuk memahami mengapa korosi terjadi dari pada bagaimana korosi terjadi. Sebagian besar logam secara alamiah (dalam bijih dan mineral) mempunyai sifat sebagai senyawa seperti oksida, sulfida, sulfat, dan lain-lain. karena senyawa-senyawa tersebut merepresentasikan keadaan stabilnya secara termodinamika. Logam-logam tersebut tersuling dari bijihnya setelah mengeluarkan banyak energi. Karenanya, jika sifat logam yang pada dasarnya berubah (contohnya dengan pencampuran), logam akan cenderung mempunyai sifat untuk kembali pada sifat keadaan stabil secara termodinamika. Akan tetapi, logam-logam yang mempunyai sifat dapat mempertahankan pada keadaan dasarnya (contohnya emas), secara alamiah mempunyai resistansi/ketahanan yang baik terhadap korosi.

### 3.3.3 Klasifikasi Korosi

Proses korosi biasanya diklasifikasikan berdasarkan pada beberapa faktor sebagai berikut:

1. Sifat koroden (penyebab korosi).  
Korosi dapat diklasifikasikan sebagai “kering” atau “basah”. Korosi kering biasanya menyangkut reaksi gas-gas pada temperatur tinggi. Korosi basah terjadi dengan adanya air atau cairan konduksi.
2. Mekanisme korosi.  
Dalam hal ini menyangkut serangan kimia langsung atau serangan elektrokimia tidak langsung.
3. Rupa logam terkorosi.  
Korosi dapat berupa seragam dan logam menjadi korosi pada pesat yang sama di seluruh permukaannya, atau sifatnya lokal dan hanya sebagian kecil daerah yang terkena korosi.

Akan tetapi beberapa bentuk korosi berbeda sering dibedakan sebagai berikut:

1. Korosi galvanis (*Galvanic corrosion*)
2. Korosi erosi (*Erosion corrosion*)
3. Korosi retak (*Crevice corrosion*)
4. Korosi lubang (*Pitting corrosion*)
5. Pengelupasan kulit (*exfoliation*)

6. Peluluhan selektif (*Selective leaching*)
7. Korosi antar butiran kecil (*Intergranular corrosion*)
8. Korosi retak akibat tekanan (*Stress corrosion cracking*)
9. Korosi aliran air (*Water-line corrosion*)
10. Korosi mikrobiologi (*Micro-biological corrosion*), dan lain-lain.

### 3.3.4 Teori Korosi

#### 3.3.4.1 Teori Asam

Teori ini mengusulkan bahwa kehadiran asam (misalnya asam karbonat) sangat penting dalam korosi. Teori ini dapat diaplikasikan terutama untuk pengarat besi dalam atmosfer. Menurut teori ini, pengarat besi disebabkan oleh aksi oksigen, karbon dioksida, dan uap lembab secara kontinyu mengkonversikan logam menjadi larutan besi bikarbonat yang selanjutnya teroksidasi menuju besi karbonat dasar dan akhirnya menjadi oksida besi terhidrasi.



Teori ini didukung oleh kenyataan bahwa:

1. Analisis karat umumnya menunjukkan kehadiran besi karbonat bersama-sama dengan oksida besi terhidrasi, dan
2. Perlambatan karat dengan kehadiran tambahan kapur atau NaOH ke dalam air dimana besi dicelupkan.

#### 3.3.4.2 Teori Serangan Kimia Langsung

Teori ini menjelaskan apa yang disebut dengan korosi kimia atau korosi kering. Serangan kimia langsung oleh gas-gas kering pada sebuah logam pada temperatur atmosfer kurang lazim. Akan tetapi bilamana terjadi korosi karena serangan kimia langsung, lapisan tipis padat (*film*) hasil korosi biasanya terbentuk pada permukaan logam yang melindungi logam dari korosi lebih lanjut. Akan tetapi, jika larutan atau cairan hasil korosi terbentuk, lalu logam terbuka untuk mendapatkan serangan berikutnya. Sebagai contoh, kloron dan iodin menyerang perak menghasilkan lapisan tipis pelindung halide perak.

Salah satu yang paling umum dimana logam terserang secara langsung yaitu oleh interaksi dengan oksigen. Logam-logam alkali dan

alkaline (misalnya Na, Ca, Mg, dan lain-lain) menderita oksidasi secara luas pada temperatur rendah dimana pada temperatur tinggi dalam prakteknya seluruh logam teroksidasi kecuali Ag, Au, dan Pt. Logam bumi alkali dan alkaline pada oksidasi menghasilkan endapan oksida yang lebih kecil dari logam-logam pembentuknya. Hasilnya dalam bentuk lapisan keropos melalui dimana oksigen dapat menyebar untuk membawanya pada serangan logam selanjutnya. Pada sisi lain, logam berat dan Al membentuk lapisan oksida yang volumenya lebih besar dari logam dimana mereka dihasilkan. Lapisan tipis oksida kontinyu non-keropos ini mencegah hamburluran oksigen dan oleh karenanya pesat serangan selanjutnya menurun seiring peningkatan ketebalan lapisan tipis oksida. Akan tetapi, bilamana lapisan tipis bertambah tebal maka akan mempunyai kecenderungan terbentuknya retakan dan kerak menjadi lebih besar dan khususnya pada temperatur tinggi, serangan sesekali pada logam dapat lebih terbuka.

Aluminium dan Chromium membentuk lapisan oksida protektif yang baik, oleh karenanya logam-logam tersebut biasanya digunakan untuk campuran bagi logam yang rentan terkena serangan kimia langsung. Hal ini disebabkan aluminium dan Chromium memberikan peningkatan resistansi terhadap oksidasi.

#### 3.3.4.3 Teori Elektrokimia

Teori ini menjelaskan tentang korosi tida langsung atau korosi basah. Teori elektrokimia berdasarkan pada teori Nernst yang menyatakan bahwa seluruh logam mempunyai kecenderungan untuk dapat larut. Jika sebuah elektroda Zn dimasukkan ke dalam larutan seng sulfat, ion seng positif pada elektroda logam dalam vibrasi kontinyu dan adakalanya sebuah ion menerima energi yang cukup untuk lepas dari logam dan menuju larutan di sekelilingnya. Kemudian elektroda memperoleh muatan negatif, jadi tiap  $Zn^{++}$  melepaskan dari logam ke larutan sehingga elektroda kehilangan dua elektron. Ion seng dalam larutan lamenarik elektroda seng bermuatan negatif dan beberapa ion dapat ditempatkan kembali pada elektroda padat. Jadi, kondisi equilibrium antara ion positif dalam larutan dan logam dapat dicapai dengan cepat. Untuk kasus tembaga, kecenderungan  $Cu^{++}$  menuju larutan lebih rendah dan kecenderungannya untuk penempatan kembali ion-ion pada elektroda tembaga lebih besar. Kecenderungan logam untuk menuju larutan bilaman dicelupkan dalam larutan

garamnya merupakan ukuran potensial elektrodanya. Potensial elektroda standar berbagai logam ditentukan menurut perbandingan dengan potensial elektroda standar hidrogen yang diambil nol.

Jika sebuah logam memiliki potensial elektroda yang lebih tinggi disentuh dengan logam lain yang mempunyai potensial elektroda yang lebih rendah, sebuah "sel galvani" diset dan logam yang mempunyai potensial elektroda yang lebih tinggi menjadi bersifat anoda dan menuju larutan untuk mencapai sebuah tingkat ukuran. Jika cairan di sekelilingnya cukup bersifat asam, gas  $H_2$  akan berkembang pada logam katoda bilamana logam anoda larut. Jika keasaman cairan sekelilingnya jatuh di bawah nilai tertentu, pesat larutan logam anoda menurun dan dikendalikan oleh pesat dimana oksigen dapat menyebar ke katoda dan mendepolarisasi sel korosi.

Tingkat korosi galvani tergantung pada perbedaan potensial dua elektroda dan areanya masing-masing. Semakin tinggi perbedaan potensial katoda dan anoda, maka semakin besar kemungkinan menjadi korosi. Juga, semakin kecil area anoda dibanding katoda, semakin besar kemungkinan terjadi korosi.

### 3.3.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi

Pesat dan tingkat korosi umumnya tergantung pada sifat logam dan sifat lingkungannya. Kadua faktor tersebut sangat mnarik untuk didiskusikan.

#### 3.3.5.1 Sifat Logam

Sifat-sifat logam yang dapat mempengaruhi pesat dan tingkat korosi suatu logam diantaranya meliputi beberapa faktor diantaranya:

1. Potensial oksidasi,
2. Tegangan lebih (*overvoltage*),
3. Area anoda dan katoda relatif,
4. Kemurnian logam,
5. Keadaan fisik logam,
6. Sifat oksida lapisan tipis (*film*), dan
7. Daya larut (*solubility*) produk korosi.

#### 3.3.5.2 Sifat Lingkungan

Sifat-sifat lingkungan yang dapat mempengaruhi pesat dan tingkat korosi suatu logam diantaranya meliputi beberapa faktor diantaranya:

1. Temperatur,
2. Kehadiran uap,
3. Pengaruh pH,
4. Sifat anion dan kation,
5. Konduktansi medium,
6. Konsentrasi oksigen dan formasi sel konsentrasi oksigen,
7. Kecepatan aliran proses,
8. Prosedur *start up* dan *shut down*, dan
9. Pencegah korosi.

### 3.3.6 Proteksi Terhadap Korosi atau Pengendalian Korosi

#### 3.3.6.1 Pemilihan Rancangan dan Material

Pemilihan rancangan dan material logam dalam rangka melakukan proteksi terhadap korosi diantaranya meliputi beberapa hal berikut ini:

1. Pemilihan jenis material yang baik merupakan faktor utama dalam pengendalian korosi. Pemilihan logam bukan hanya tergantung pada harga dan strukturnya tetapi juga sifat-sifat kimia dan lingkungannya.
2. Logam mulia (*noble logam*) merupakan logam paling tahan terhadap korosi tetapi logam tersebut tidak umum digunakan disamping harganya yang mahal. Pemilihan selanjutnya adalah menggunakan logam yang semurni mungkin. Ketidakmurnian logam dapat mempercepat korosi.
3. Resistansi dan kekuatan korosi dari beberapa logam dapat ditingkatkan dengan dengan cara pencampuran (*alloying*). Beberapa campuran tahan-korosi telah dikembangkan untuk tujuan dan lingkungan spesifik, sebagai contoh:
  - a. Baja tak-karat (*stainless-steel*) bermuatan chromium menghasilkan oksida film koheren yang baik sekali yang dapat memproteksi baja dari serangan kimia penyebab korosi.
  - b. Campuran “Nimonic” bertekanan tinggi (campuran Ni-Cr-Mo) digunakan dalam turbin gas sangat tahan terhadap gas panas.

- c. Campuran cupro-nikel (70% Cu + 30% Ni) yang mengandung 0,2% Fe kini digunakan secara luas untuk mengkondensasi pipa.
4. Perlakuan panas seperti penguatan (*annealing*) sangat membantu untuk mengurangi tekanan eksternal dan mengurangi korosi.
5. Jika logam aktif digunakan maka harus diisolasi dari logam katodik.
6. Jika dua logam bersinggungan, sebaiknya dipilih bahwa potensial elektrodanya yang sedekat mungkin.
7. Uap lembab (*moisture*) harus dikeluarkan untuk aplikasi praktis. Jika terdapat uap atau larutan elektrolit, maka dapat digunakan pencegah (*inhibitor*) yang sesuai.
8. Setiap logam menunjukkan korosi minimum pada pH spesifik. Akan tetapi korosi dapat dikendalikan dengan pengaturan keasaman atau alkalinitas lingkungan yang sesuai. Bilamana kendali pH tidak dapat dilakukan, korosi dapat dikurangi dengan menggunakan lapisan pelambat dan logam inactive.
9. Bilamana terjadi sentuhan logam yang berlainan tidak dapat dihindari, maka harus disisipkan isolator yang sesuai diantaranya untuk mengurangi aliran arus.

#### 3.3.6.2 Proteksi Katoda dan Anoda

Dalam situasi dimana tidak mungkin atau tidak praktis untuk mengubah sifat medium korosi, maka pengendalian korosi dapat dicapai dengan melakukan proteksi katoda atau proteksi anoda.

Bilamana arus listrik mengalir antara daerah anodik dan katodik pada permukaan logam yang sudah berkarat, maka semakin besar arus listrik yang mengalir akan memperbesar dan mempercepat korosi pada anoda. Pesat korosi dapat dikendalikan dengan mengganggu aliran arus pada logam menggunakan rangkaian eksternal. Jika arus berlawanan diterapkan untuk menghapuskan korosi, maka disebut proteksi katodik. Jika potensial logam diatur sehingga korosi dapat ditekan karena logam dibuat pasif, maka disebut proteksi anodik.

**Latihan:**

1. Jelaskan teori Nernst tentang korosi.
2. Jelaskan guna potensial elektroda standar bagi suatu logam dan kaitannya dengan sifat korosinya.
3. Jelaskan penyebab dan dampak yang ditimbulkan oleh korosi.
4. Jelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi korosi.
5. Jelaskan metode proteksi terhadap korosi.

## **4. ELECTROPLATING**

### **4.1 PENDAHULUAN**

Electroplating adalah elektrodeposisi pada logam, campuran logam, dan non-logam. Electroplating dilakukan untuk dekorasi, proteksi permukaan dan peningkatan unjuk kerja material dari segi teknik. Berdasarkan dokumentasi yang ada, electroplating pertama kali dilakukan pada tahun 1840 dan mengalami stagnasi hingga tahun 1910. Dengan berkembangnya pengetahuan bidang kimia fisika tentang larutan, maka ditemukan suatu metode yang spektakuler yang sangat membantu dalam pembuatan material untuk mesin-mesin listrik dan peralatan ukur. Dengan peningkatan ketersediaan bahan kimia murni, “seni” electroplating ditransformasikan ke dalam proses sains dan teknologi sejak tahun 1930.

Tujuan utama electroplating adalah untuk mengubah sifat permukaan logam atau non-logam dalam rangka mencapai penampilan atau rupa yang lebih baik, peningkatan ketahanan terhadap korosi atau serangan kimia, dan lain-lain. Electroplating logam-logam lazimnya meliputi proses-proses dimana material berbasis besi atau non-besi dielectroplat dengan nikel, chromium, tembaga, seng, timah, cadmium, aluminium, kuningan, perunggu, atau kombinasinya. Dalam electroplating logam berbasis besi atau non-besi menggunakan logam mulia diantaranya menggunakan emas, perak, platinum, palladium, indium, iridium, ruthenium, osmium, atau kombinasinya.

Dalam electroplating, maka keasaman alkalin atau media netral ion-ion logam dari logam diturunkan. Ion-ion logam dalam solusi biasanya diisi oleh disolusi logam dari anoda atau potongan kecil yang diisi dalam kawat lembam atau jaring logam. Pengisian oleh garam logam juga dalam prakteknya seperti kasus plating chromium. Dalam kasus seperti itu, material lembam harus digunakan sebagai anoda. Beberapa tipe larutan electroplating telah digunakan secara komersial meskipun beberapa darinya diadopsi secara luas. Sebagai contoh, larutan sianida sangat populer untuk Cu, Cd, Zn, Ag, Au, dan kuningan. Akan tetapi larutan alkalin nonsianida berisi piropospat saat ini digemari untuk Cu dan Zn. Zn, Cu, Sn, dan Ni disepuh dengan larutan asam sulfat khususnya untuk pmlatan bentuk yang relatif

sederhana. Metoda yang umum digunakan adalah dalam bejana, pada rak dan secara kontinyu dari sebuah kumparan atau koil.

## **4.2 APLIKASI *ELECTROPLATING***

### **4.2.1 *Plating* untuk Tujuan Dekorasi**

Chromium, nikel, perak, emas, tembaga, kuningan, dan rhodium merupakan logam-logam yang umum digunakan dalam plating untuk tujuan dekorasi. Seng, cadmium, timah, platinum, dan palladium juga digunakan untuk dekorasi khusus. Logam-logam dasar dan campuran yang sebagian besar digunakan untuk electroplating adalah baja, kuningan, tembaga, nikel, perak, campuran logam putih timah, seng, atau berbasis timah, dan campuran aluminium. Jenis electroplating yang digunakan ditentukan oleh permukaan yang diinginkan, penggunaan akhir barang, dan sifat logam yang akan disepuh. Pemplatan chrom paling umum digunakan untuk tujuan dekorasi karena tahan lama dan daya tahannya yang baik terhadap serangan kimia, abrasi atau lecet, dan bercak atau noda.

Electroplating secara luas digunakan dalam pembuatan pesawat terbang, otomobil, refrigerator, alat-alat listrik rumah tangga seperti besi, fan, plat panas, dan pemanggang, perangkat keras gedung/bangunan seperti tombol pintu, kunci dan perangkatnya, dan engsel, radio, kamera, mesin tik, arloji, payung, dan lain-lain.

### **4.2.2 *Plating* untuk Tujuan Proteksi**

Plating yang bersifat dekoratif dapat sekaligus memberikan perlindungan atau proteksi. Akan tetapi bilamana plating dilakukan hanya untuk proteksi, maka permukaan tidak menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan. Baja merupakan material yang paling umum digunakan dalam material konstruksi, yang secara luas menggunakan material dasar yang harus diproteksi dari korosi dan serangan kimia. Plat-plat protektif yang lazim digunakan untuk baja adalah Zn, Cd, dan Sn. Pada material-material tersebut plat protektif dilekatkan, dipintal, atau dibalut dalam pembuatannya di pabrik. Plating besi yang banyak digunakan di industri lebih baik menggunakan plating cadmium. Timah tidak memberikan proteksi galvanis terhadap Zn dan Cd. Akan tetapi, untuk keperluan kontainer makanan dan tempat pemeliharaan makanan, plating menggunakan timah bukan hanya berfungsi memproteksi tetapi juga mencegah kontaminasi

pada makanan. Dalam aplikasi dimana pengaruh proteksi dan juga dekorasi pada baja diperlukan, digunakan plat-plat tembaga, nikel, dan kromium. Tembaga dan kuningan umumnya diplat dengan Ni dan Cr. Bilamana logam diplat untuk proteksi terhadap lingkungannya, sebaiknya mempertimbangkan pengaruh galvanis gandengan logam untuk menghindarkan pengaruh yang tidak diinginkan.

#### **4.2.3 Plating untuk Pengaruh Permukaan Khusus dan Rekayasa**

Electroplating menempati kedudukan yang penting dalam rekayasa (*engineering*). Bagian komposit dapat dirancang dimana logam dasar adalah sebuah campuran yang memiliki sifat-sifat mekanik dan fabrikasi yang dibutuhkan meskipun mempunyai ketahanan yang buruk pada permukaannya pada kondisi operasional. Stabilitas permukaan yang diperlukan dapat diperoleh dengan melapisi permukaan logam. Jadi, campuran khusus yang mempunyai sifat permukaan yang baik tetapi sukar dioperasikan dalam bentuk besar-besaran dapat dikombinasikan dengan campuran yang relatif mudah dioperasikan. Dalam aplikasi rekayasa, pengolahan dan pembersihan permukaan logam dasar dan pemilihan plat yang tepat merupakan hal paling pokok dalam menghasilkan suatu produk dapat memuaskan.

*Electroplate* diterapkan untuk penggunaan sementara dalam pengolahan logam. Banyak bagian baja merupakan plat-plat tembaga terlebih dahulu untuk mencegah karburisasi pada lokasi yang tidak diinginkan. Plat timah dan campuran timah-tembaga digunakan untuk mencegah nitridasi baja pada daerah permukaan dimana tidak diperlukan pengasaran. Perbaikan unjuk kerja dan umur pemakaian besi tuang atau cetakan glas baja diperoleh dengan menerapkan plat kromium kontraksi rendah. Plat kromium pada permukaan cetakan yang penting untuk plastik memperbaiki usia cetakan dan juga penampilan hasil cetakan.

#### **4.2.4 Electroforming**

Industri radio, radar, pesawat terbang, otomobil, glas, karet, baja dan percetakan menggunakan beberapa produk yang dibuatnya baik sebagian maupun keseluruhannya melalui electroforming. Metode ini membantu dalam membuat komoditas dimana metode lain masih belum efektif.

## **4.2.5 Plating pada Material Non-Logam**

Material non logam seperti resin sintetik, kain, kertas, kayu, porselin, kulit, dan lain-lain biasanya diplat untuk tujuan dekorasi, pengawetan atau mempersiapkan material yang berbobot ringan dengan karakteristik permukaan logam, konduktansi permukaan, dan kekuatan. Material non logam juga diplat dalam kaitannya dengan electroforming dan electroplating.

## **4.3 PROSES ELECTROPLATING**

Electroplating meliputi bukan hanya formulasi sebuah larutan. Sebelum logam atau non logam dapat dielectroplate, permukaannya harus bersih secara fisik, kimia, dan mekanik. Pembersihan secara fisik berarti bebas dari minyak, lemak, dan kotoran permukaan dengan cara penyemiran, pengkilapan, dan pembersihan atmosfer. Pembersihan secara kimia berarti membebaskan dari oksida atau campuran pembentuk permukaan pada logam dasar. Pembersihan secara mekanik berarti membebaskan material dari kulit permukaan yang dirusak oleh logam akibat operasi mekanik seperti pecahan, goresan, dan lain-lain.

Electroplating meliputi deretan operasi yang masing-masing sangat penting dalam penentuan kualitas hasil akhir. Berikut ini diberikan langkah-langkah minimum dalam electroplating secara berurut:

1. Menghilangkan kerak atau noda,
2. Persiapan mekanis pada permukaan,
3. Pembersihan secara fisik,
4. Pencucian,
5. Pencelupan asam untuk pembersihan secara kimia,
6. Pencucian,
7. Electroplating,
8. Pencucian, dan
9. Pengeringan.

## **4.4 LIMBAH ELECTROPLATING**

### **4.4.1 Karakteristik Limbah Electroplating**

Seluruh material dalam proses pencucian electroplating memberikan kontribusi limbah pada air. Pencucian electroplating

dapat berisi Cu, Ni, Au, Ag, Zn, Cd, Cr, Pt, Sn, Pd, Fe, Pb, K, Na, dan amonia. Komponen-komponen anion kerap muncul diantaranya karbonat, borat, fluoborat, sianida, tartrate fluorida, pospat, klorida, sulfida, sulfat, nitrat, dan sulfamat. Selanjutnya, beberapa larutan plating mengandung berbagai logam lain. Seluruh material tersebut mempunyai kontribusi pada limbah cair dari unit-unit electroplating. Kontaminan non logam seperti minyak, lemak, toxic, campuran organik, dan lain-lain dapat juga muncul. Sebelum menyelesaikan rancangan baik proses electroplating maupun pengolahan limbahnya, maka harus dilakukan survey terhadap kontaminan atau pencemar baik logam maupun non logam.

#### 4.4.2 Teknologi Pengolahan Limbah

Beberapa aplikasi spesifik teknologi pengolahan limbah yang digunakan untuk menangani limbah electroplating diberikan dalam tabel 4.1.

Tabel 4.1 Teknologi pengolahan limbah

No.	Masalah pengolahan limbah	Teknologi Pengolahan
1	Menghilangkan dan/ atau memulihkan garam terlarut	Presipitasi hidroksida, presipitasi sulfat, penukaran ion.  Filtrasi membran, insoluble starch xanthates, penyerapan tanah, penyerapan karbon, pemulihan elektrolit, presipitasi pH tinggi.
2	Menghilangkan garam terlarut untuk penggunaan ulang air	Pembalikan osmosis
3	Pemulihan proses pencucian	Electrodialysis
4	Menghilangkan organik	Dekomposisi aerobik, penyerapan karbon, penyerapan resin.
5	Menghancurkan sianida dan sianat	Oksidasi elektrokimia, oksidasi klorin, oksidasi menggunakan ozon, oksidasi menggunakan ozon dengan radiasi ultra violet, oksidasi menggunakan H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .
6	Menghentikan penghilangan zat padat	Flotasi, sentrifugasi, ultra filtrasi, sedimentasi, filtrasi tanah diatomaceous.
7	<i>Sludge dewatering</i>	Sentrifugasi, filtrasi tekanan, filtrasi tanah diatomaceous.  Pengeringan endapan dasar, filtrasi vakum.
8	Pengurangan kromium	Reduksi elektrokimia
9	Konsentrasi dan pemulihan proses kimia	Evaporasi
10	Penghilangan minyak	Sentrifugasi, penggabungan, flotasi, skimming, ultra filtrasi.

#### 4.4.3 Pencegahan Keamanan

Sebagian besar operasi pembersihan, pengawetan, dan penyepuhan (*plating*) dapat memberikan peningkatan gas-gas toxic, vapour, asap, semprotan, dan lain-lain yang dihilangkan menggunakan ventilasi yang sesuai. Penghilangan semprotan dan gas khususnya sangat penting untuk larutan asam sianida dan asam kromik. Tindakan pencegahan khusus harus diambil dalam menangani larutan asam sianida, fluobirat, dan kromik untuk menjamin bahwa zat-zat tersebut tidak menyentuh kulit maupun mulut atau menimbulkan bau yang menyengat. Larutan sianida sebaiknya jangan dibiarkan bertemu dengan asam yang dapat menimbulkan reaksi sehingga membentuk gas sianida hidrogen. Limbah sianida dapat dihancurkan dengan klorinasi atau dengan oksidasi elektrilit.

#### **Latihan:**

1. Jelaskan pengertian electroplating.
2. Jelaskan maksud dilakukannya electroplating.
3. Jelaskan material-material yang digunakan dalam electroplating untuk tujuan dekorasi.
4. Jelaskan material-material yang digunakan dalam electroplating untuk tujuan proteksi.
5. Jelaskan penanganan limbah akibat electroplating, dan mengapa harus dilakukan pengolahan limbah electroplating.

## 5. APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BATERAI

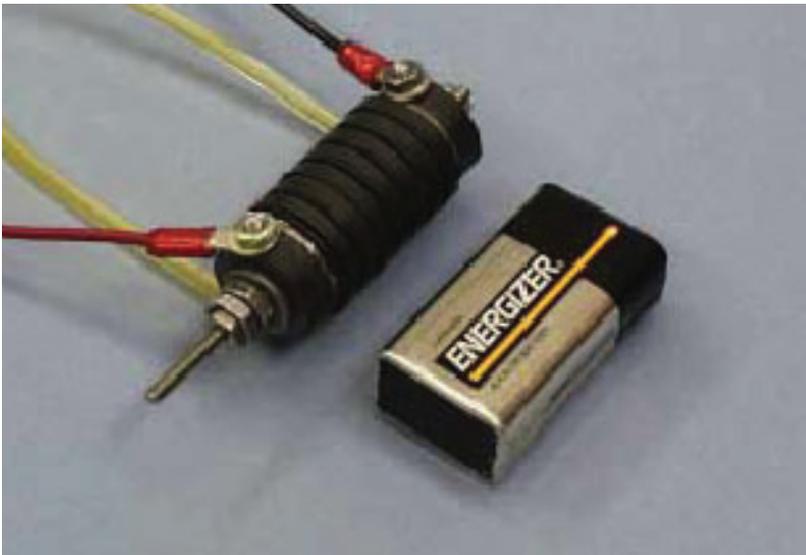
### 5.1 PENDAHULUAN

Baterai sering juga disebut sebagai sel (*cell*). Baterai sudah dikenal sejak akhir abad ke 18, dan hingga kini peranannya sangat penting bagi umat manusia. Pada tahun 1786 Galvani menemukan adanya pengaruh logam tak sama yang dilekatkan pada katak. Galvani telah memberikan kontribusi dalam sejarah penemuan baterai dengan pembuatan sel galvani-nya. Sekitar tahun 1800, Alessandro Volta berobservasi bahwa susunan logam tak sama yang terbalik-balik dengan lapisan kertas antar logam dua lapis dapat menjadikannya sumber listrik. Dia kemudian percaya bahwa kenyataan sederhana hubungan logam tak sama secara bertumpuk merupakan sumber daya yang tiada henti (terus menerus). Nama Volta kemudian dikaitkan dengan sifat intensif yang menguraikan kemampuan baterai untuk bekerja (yaitu tegangan baterai). Selanjutnya kumpulan sel-sel kadang-kadang mengacu pada tumpukan Voltaic. Sejak tahun 1830 Michael Faraday melakukan penelitian secara intensif dan menemukan bahwa reaksi kimia pada setiap elektroda merupakan sumber listrik yang dihasilkan oleh baterai.

Pada abad ke 19 baterai sering dilakukan penelitian-penelitian tentang baterai di laboratorium fisika dan kimia. Baterai yang digunakan dalam periode ini adalah voltaic pile. Baterai tersebut terdiri dari susunan plat seng dan tembaga yang diikat untuk membentuk tegangan yang tinggi dengan arus rendah. Dalam abad ke 19 perkembangan atau penemuan tipe-tipe baterai cenderung mulai mengalami kemajuan. Hal ini ditandai dengan penemuan baterai asam timah (lead acid battery) pada tahun 1859 oleh Plante dan sel seng-mangan dioksida oleh Leclanche pada tahun 1866. Baterai kering atau yang lazim disebut "sel kering (*dry cell*)" ditemukan pada awal abad ke 20 oleh Gassner. Dalam sel ini, elektrolit tidak bergerak. Karena lebih mudah ditutup seperti halnya sel, maka terbuka jalan untuk pengembangan sumber daya yang mudah dibawa-bawa (*portable*) yang pada akhirnya seperti baterai yang digunakan pada saat ini. Pada saat yang hampir bersamaan, sel nikel-cadmium dan nikel-besi juga ditemukan dan dikembangkan sebagai sel penyimpan pada periode yang sama.

Sistem nikel cadmium dikembangkan lebih lanjut di Jerman dalam tahun 1950-an. Hal ini menuntun jalan perkembangan sistem baterai kecil yang dapat diisi ulang untuk aplikasi konsumen. Selanjutnya dalam tahun 1950-an tersebut terjadi perubahan dari sel seng-mangan dioksida menuju sistem elektrolit alkalin. Sel Ruben, juga dikembangkan untuk rangkaian elektrolit yang digunakan untuk keperluan militer pada perang dunia kedua.

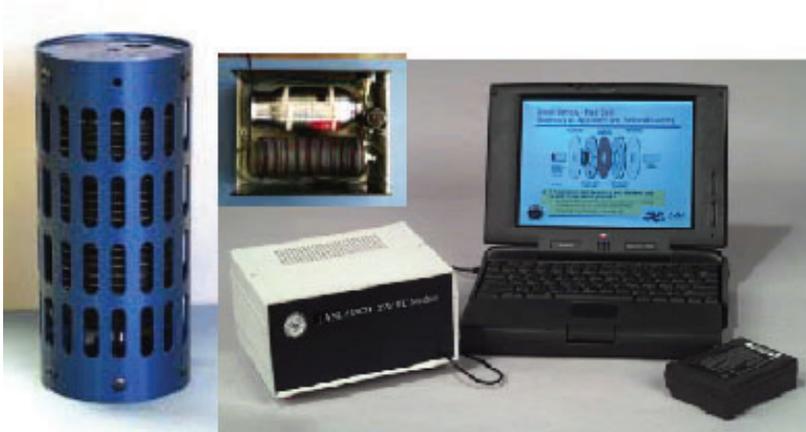
Banyak sistem baterai baru digemari dalam akhir abad ke 20. Beberapa baterai mutakhir kini berbasis lithium, yang digunakan sebagai material anoda. Baterai yang dapat diisi ulang berbasis logam hidrid sebagai elektroda negatif. Baterai isi ulang khusus terbaru berbasis pada karbon yang dijalin lithium, sebagai elektroda negatif sehingga sistemnya kelihatan sangat menjanjikan untuk pengembangan lebih lanjut.



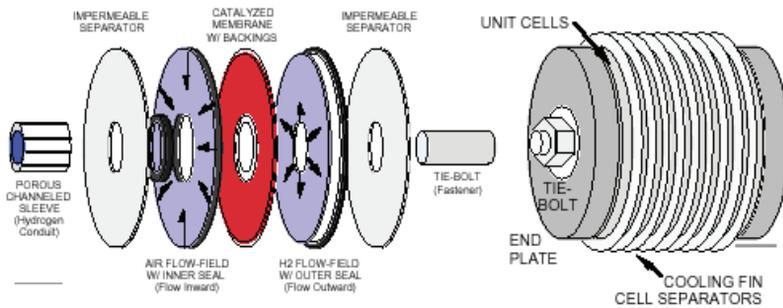
Gambar 5.1 Baterai alkalin 9 V yang merupakan contoh perkembangan teknologi baterai saat ini.

Baterai dapat dianggap sebagai gudang energi listrik. Ukuran baterai sangat bervariasi mulai dari seukuran koin yang sangat kecil hingga sebesar rumah. Baterai seukuran koin kecil digunakan untuk aplikasi elektronik yang hanya membutuhkan kapasitas yang sangat kecil untuk menempatkan baterai. Baterai berukuran kotak berisi

literan biasanya digunakan untuk keperluan starting sepeda motor, pencahayaan (lampu), dan pengapian. Baterai berukuran besar biasanya digunakan untuk penyimpanan energi listrik di perusahaan listrik.



Gambar 5.2 Baterai kecil untuk keperluan peralatan elektronik.



Gambar 5.3 Konfigurasi baterai ukuran kecil yang digunakan pada laptop.

Dasar teknologi baterai adalah bahwa energi kimia diberikan dari reaksi kimia dalam baterai dikonversi menjadi energi listrik. Karena terjadinya konversi langsung dari energi kimia menjadi energi listrik dalam baterai, maka seluruh energi sistem kimia dapat bebas dikonversikan. Konversi energi listrik menjadi cahaya atau suara relatif efisien dan mudah dikendalikan, dengan demikian memungkinkan perkembangan beberapa aplikasi baterai untuk pencahayaan (lampu) atau kreasi dan reproduksi suara.

Sebagaimana halnya piranti konversi energi yang lain, dalam baterai juga terdapat rugi-rugi (*losses*), dan oleh karenanya hingga saat ini terus dilakukan usaha untuk meminimalkan rugi-rugi tersebut.



Gambar 5.4 Baterai ukuran sedang untuk keperluan percobaan di laboratorium.



Gambar 5.5 Baterai ukuran besar untuk keperluan sumber daya listrik

## 5.2 PRINSIP DASAR BATERAI

Pada dasar investigasi elektrolisis larutan encer, Faraday (1833) membuktikan hubungan antara besaran listrik yang lewat dan banyaknya muatan kimia yang terjadi. Investigasinya kemudian diringkas dalam dua hukum berikut ini.

Hukum Pertama:

Banyaknya material tersimpan atau terlarut sebagai hasil penerimaan arus listrik adalah sebanding dengan besaran listrik yang dilewatkan. Jika  $W$  gram material kimia tersimpan atau terlarut oleh pelewatan  $I$  ampere arus pada  $t$  detik, maka:

$$W \propto I \times t \text{ ampere detik atau coulomb}$$
$$W = e \times I \times t \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

dengan,  $e$  = ekivalen elektrokimia (ECE)

Jika  $I$  dan  $t$  masing-masing sama dengan satu, maka

$$W = e.$$

Jadi, ekivalen elektrokimia (ECE) didefinisikan sebagai bobot material tersimpan bilamana satu coulomb listrik ( $3,0 \times 10^9$  esu; 1 ampere detik) dilewatkan.

Hukum Kedua:

Bilamana besaran listrik yang sama dilewatkan melalui elektrolit yang berbeda, banyaknya material berbeda yang tersimpan atau terlarut sebanding dengan bobot ekivalen kimianya masing-masing.

Jika  $W_1$  dan  $W_2$  adalah banyaknya dua material yang tersimpan atau terlarut melalui pelewatan  $q$  coulomb listrik, maka perbandingan bobot ekivalennya adalah sebagai berikut:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

Karena satu coulomb listrik dibutuhkan untuk menyimpan atau melarutkan satu ECE untuk 1 gram ekivalen berbagai material, besaran listrik yang diperlukan adalah  $E/e$  coulomb:

$$\frac{E_1}{e_1} = \frac{E_2}{e_2} = F \quad \dots\dots(5.3)$$

dengan F adalah faraday. Kenyataan penting ini dapat divisualisasikan dengan mengkombinasikan hukum pertama dan kedua sebagai berikut:

$$W = \frac{I \times t \times E}{F} \quad \dots\dots(5.4)$$

Jika  $I \times t = F$ , maka  $W = E$ .

Jadi, bilamana satu faraday listrik dilewatkan, bobot tersimpan atau terlarut adalah gram ekivalen bobot. Nilai F telah ditemukan yaitu sebesar 96.500 coulomb.

$$F = 96.500 \times C$$

$$= 26,8 \text{ A-hr (ampere jam)}$$

Jadi,

$$W = M \times I \times t / nF \quad \dots\dots(5.5)$$

dengan M adalah bobot molekul material, n adalah jumlah elektron yang tercakup dalam reaksi elektroda.

Sebuah relasi penting yang diberikan oleh hukum Faraday (persamaan 5.5) dan termodinamika menunjukkan bahwa energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) untuk reaksi sel ditemukan berhubungan langsung dengan daya elektromotif (emf) atau tegangan (E) dari sistem.

$$\Delta G = -n FE = \Delta H - T \Delta S \quad \dots\dots(5.6)$$

dengan, n = jumlah elektron yang tercakup dalam reaksi sel sebagaimana ditulis untuk menghitung energi bebas Gibbs,

$\Delta H$  = perubahan entalpi untuk reaksi.

$\Delta S$  = perubahan entropi untuk reaksi.

T = temperatur absolut dalam derajat kelvin.

Emf standar emf didefinisikan oleh persamaan (5.6) digunakan jika energi bebas standar pada 25°C dan aktivitas unit untuk seluruh pereaksi. Besaran ini secara umum tersusun untuk reaksi elektroda, dan potensial standar kombinasi pasangannya dapat dihitung.

Perkembangan selanjutnya hubungan termodinamika dapat diberikan oleh persamaan berikut:

$$\Delta S = nF (dE/dT)_p \quad \dots\dots(5.7)$$

dan,

$$\Delta H = nF [E - T (dE/dT)_p] \quad \dots\dots(5.8)$$

memungkinkan untuk menentukan entalpi reaksi  $\Delta H$  dan entropi reaksi  $\Delta S$  dari emf dan ketergantungan temperaturnya.

Sebagai perbandingan berbagai tipe dan pasangan baterai, maka efisiensi baterai merupakan parameter yang sangat penting. Efisiensi termodinamika (E) dianggap sebagai efisiensi paling fundamental yang diberikan oleh persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} E &= \Delta G^\circ / \Delta H^\circ \\ &= 1 - T \Delta S^\circ / \Delta H^\circ \quad \dots\dots(5.9) \end{aligned}$$

Efisiensi termodinamika (E) dianggap sebagai efisiensi tertinggi yang dapat diperoleh dari gandengan elektrokimia dan dapat ditentukan dari tabulasi termodinamik entalpi dan energi bebas. Banyak gandengan elektrokimia digunakan dalam baterai komersial yang mempunyai efisiensi termodinamika 90% atau lebih, dimana efisiensi mesin berdasarkan siklus Carnot yang sebagian besar kurang dari 40%. Akan tetapi sel elektrokimia dalam kenyataannya menggunakan performansi yang kurang dari efisiensi termodinamika yang disebabkan oleh rugi-rugi yang tidak dapat dikembalikan (*irreversible losses*) yang mencakup reaksi elektroda seperti polarisasi. Efisiensi elektrokimia secara keseluruhan diberikan dalam persamaan berikut ini:

$$Eff_{(electrokimia)} = \int_{t=0}^{t=t} E' Idt / \Delta G \quad \dots\dots(5.10)$$

dengan, E' adalah tegangan terminal hubung tertutup ketika arus I mengalir pada waktu t. Tergantung pada jenis peluahan yang terjadi, maka E dan I merupakan fungsi waktu.

Sebuah baterai biasanya dirancang dengan satu elektroda yang mempunyai kapasitas yang lebih kecil dibanding yang lain guna mendapatkan sifat-sifat khusus, seperti proteksi muatan lebih, yang menjamin keamanan dalam operasi. Oleh karenanya maka sangat penting untuk mengetahui efisiensi coulombik dari material aktif sebagai berikut:

$$Eff_{(coulombik)} = \int_{t=0}^{t=t} Idt / Q \quad \dots\dots(5.11)$$

dengan, q adalah besaran coulomb (I x t) yang dihitung dari hukum Faraday (persamaan (5.5)). Efisiensi ini tergantung pada arus, rancangan elektroda, tegangan cut off, dan sifat-sifat lainnya.

### 5.3 KLASIFIKASI BATERAI

Baterai dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori yaitu baterai primer, baterai sekunder, dan baterai cadangan. Ketiga jenis baterai tersebut selanjutnya diuraikan secara singkat pada bagian berikut ini.

#### 5.3.1 Baterai Primer

Baterai primer merupakan baterai yang dirancang untuk peluahan (*discharging*) hanya sekali dan kemudian dibuang.

Baterai-baterai yang termasuk dalam kategori baterai primer (sel primer) diantaranya:

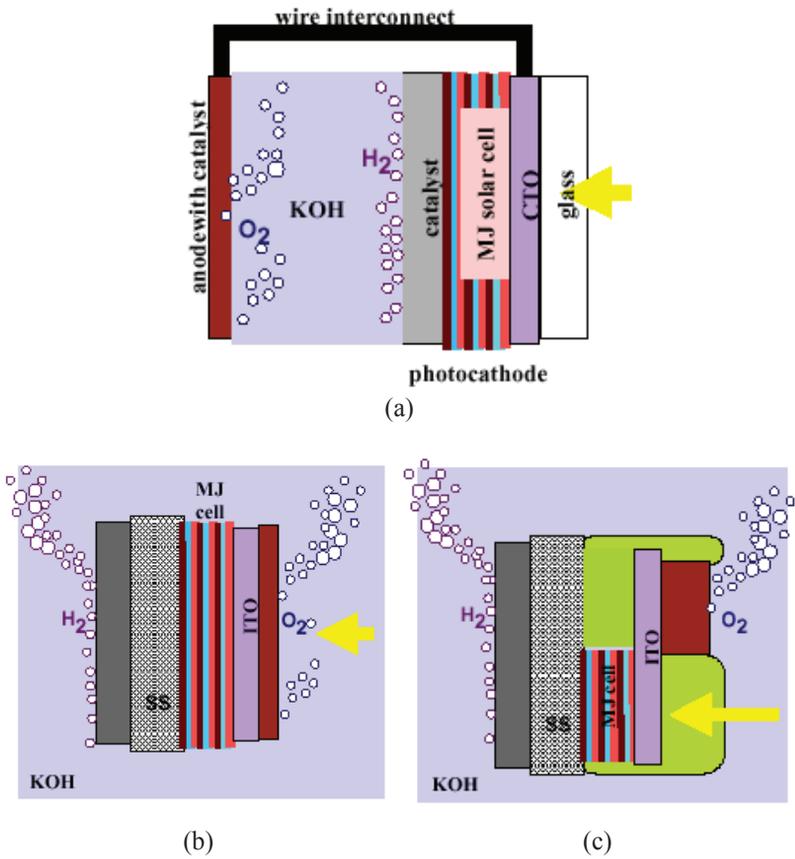
1. Sel Volta sederhana,
2. Sel Daniel,
3. Sel Grove Bunsen,
4. Sel Bichromate,
5. Sel Clark standar,
6. Sel Weston – Cadmium,
7. Sel Carbon – Seng, dan
8. Sel Ruben – Mallory.

#### 5.3.2 Baterai Sekunder

Baterai sekunder merupakan baterai yang dapat dimuati ulang (*rechargeable*) dan dapat digunakan layaknya baterai primer, kemudian diisi dan digunakan lagi. Siklusnya terus berulang hingga daya muatnya hilang atau hilang secara tiba-tiba karena hubung singkat internal.

Dalam baterai sekunder, reaksi sel dapat dibuat dalam berbagai arah menurut penuplaian arus. baterai yang dapat dikategorikan ke dalam baterai sekunder diantaranya:

1. Akumulator asam – timah (*lead-acid accumulator*),
2. Baterai penyimpan alkalin dapat diisi ulang (*rechargeable alkaline storage batteries*),
3. Baterai hidrogen nikel,
4. Sel hidrid logam-nikel,
5. Baterai seng-dioksida mangan,
6. Baterai alkalin seng-perak,
7. Baterai ion-lithium dapat diisi ulang,
8. Baterai lithium dapat diisi ulang, dan
9. Baterai temperatur tinggi.



Gambar 5.6 Penampang suatu model baterai hidrogen.

### 5.3.3 Baterai Cadangan

Baterai cadangan merupakan baterai yang mana material aktif dijaga terpisah menurut susunan tertentu. Bilamana benar-benar digunakan, piranti aktivasi membuatnya siap digunakan. Baterai seperti itu dirancang untuk penyimpanan lama sebelum digunakan.

Dewasa ini sangat diperlukan sel-sel dengan karakteristik khusus untuk penggunaan sekering proksimitas, artileri, pertambangan, balon udara, rudal terpendu, radar, bazoka, perlengkapan penerangan di malam hari, propulsi torpedo kapal laut, walkie-talkie, dan piranti elektronik khusus. Baterai-baterai tersebut harus tahan terhadap vibrasi, hentakan, variasi temperatur dan juga harus mempunyai kemampuan pada tegangan tinggi, umur yang relatif panjang, siap selalu saat diinginkan, dan harus tersedia dalam berbagai ukuran dan bentuk. Sesuai dengan kebutuhan-kebutuhan tersebut, R & D telah melakukan suatu terobosan. Baterai cadangan merupakan hasil dari usaha seperti yang dilakukan oleh R & D. Baterai-baterai tersebut umumnya diklasifikasikan menurut mekanisme aktivasi yang dilakukannya, diantaranya:

- a. oleh tujuan mekanis,
- b. oleh aktivasi air menggunakan air laut atau air kran,
- c. oleh aktivasi elektrolit hanya menggunakan pelarut atau elektrolit lengkap,
- d. oleh aktivasi gas, menggunakan gas sebagai katoda aktif, dan
- e. oleh aktivasi termal, menggunakan elektrolit garam padat yang diaktivasi oleh peleburan pada aplikasi panas.



Gambar 5.7 Baterai uji elektrokimia produksi R & D.

Aktivasi biasanya dikerjakan dengan penambahan komponen lepas hanya sebelum digunakan, yang harus dilakukan dengan cara yang sederhana seperti menuangkan air ke dalam sel terbuka.

Baterai-baterai yang termasuk dalam kategori baterai cadangan diantaranya diberikan sebagai berikut:

1. Sel asam perklorik dan sel asam flouborik,
2. Sel klorida perak,
3. Baterai Gordon – Magnesium,
4. Sel alkalin peroksida – seng perak,
5. Sel elektrolit terpadu,
6. Sel Gyuris, dan
7. Sel lithium.

**Latihan:**

1. Jelaskan pengertian baterai, dan jelaskan prinsip kerjanya secara umum.
2. Jelaskan klasifikasi baterai, dan berikan contohnya masing-masing.

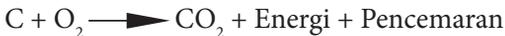
3. Efisiensi baterai sangat terkait dengan sifat termodinamikanya, jelaskan maksudnya.
4. Jelaskan pengertian baterai cadangan, dan sebutkan contoh-contoh aplikasinya dalam berbagai bidang.
5. Berikan analisis Anda tentang penggunaan baterai cadangan pada berbagai aplikasi seperti jawaban Anda pada no. 4.
6. Carilah dari berbagai sumber seperti jurnal penelitian, majalah ilmiah, atau internet tentang contoh-contoh baterai yang digunakan berbagai aplikasi, kemudian jelaskan reaksi yang terdapat pada baterai-baterai tersebut.

## 6. APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BAHAN BAKAR KIMIA

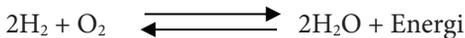
### 6.1 HIDROGEN

#### 6.1.1 Pendahuluan

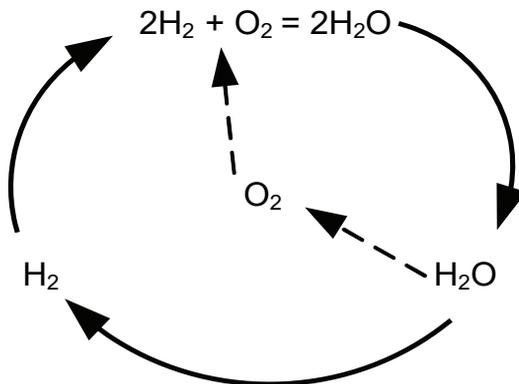
Sebagaimana diketahui bahwa pembakaran pada dasarnya merupakan proses oksidasi. Pada proses pembakaran terdapat pula energi yang dibebaskan berupa panas. Pada pembakaran hidrokarbon, maka unsur zat arang (Carbon, C) bersenyawa dengan unsur zat asam (Oksigen, O) membentuk karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dengan membebaskan energi:



Pada prinsipnya hal serupa dapat terjadi jika unsur zat air hidrogen (H) bersenyawa dengan unsur zat asam (O), sehingga akan terbentuk apa yang kita kenal sebagai air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dengan membebaskan energi:



Dapat diperhatikan bahwa reaksi di atas adalah reaksi yang timbal balik. Rumus-rumus reaksi di atas pada dasarnya merupakan suatu perputaran (suatu siklus) yaitu: air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dipisah menjadi  $\text{H}_2$  dan O untuk kemudian membentuk air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) kembali. Gambar 6.1 memperlihatkan secara grafis siklus hidrogen tersebut.



Gambar 6.1 Siklus hidrogen

Bilamana pada pembakaran misalnya batu bara terbentuk  $\text{CO}_2$  dan produk lain yang mengganggu kelestarian alam, pada oksidasi zat air hanya terjadi air yang rumus kimianya  $\text{H}_2\text{O}$  dan yang bukan merupakan suatu polutan atau pengotor lingkungan. Bahkan  $\text{H}_2\text{O}$  merupakan bagian alamiah dari lingkungan. Pembakaran 1 kg minyak bumi akan menghasilkan energi sebanyak kira-kira 10.000 kCal. Pembakaran 1 kg bahan bakar terbaik, yaitu metan akan menghasilkan panas sebanyak kira-kira 12.000 kCal. Dan bilamana hidrogen dibakar, maka 1 kg hidrogen akan melepaskan energi sebanyak 28.600 kCal. Dapat dilihat bahwa ini jauh lebih banyak dari bahan bakar favorit lainnya. Mengingat unsur hidrogen dalam bentuk air banyak terdapat di alam, dan bahwa pada proses pembakaran kembali dihasilkan air, kiranya sumberdaya energi ini seolah-olah tidak terbatas persediaanya.

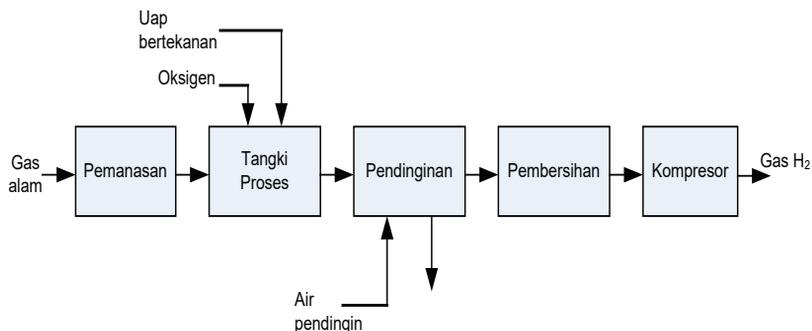
Hidrogen secara potensial cukup ideal sebagai bahan bakar karena hidrogen mudah disimpan dan mudah pula dikonversi menjadi energi listrik dan sebaliknya. Selain itu faktor yang cukup penting juga adalah bahwa hidrogen mudah diangkut. Diperkirakan bahwa pusat pembangkit listrik yang letaknya jauh dari pusat pemakaian misalnya di tengah padang pasir seperti pusat listrik tenaga surya, atau di tengah laut seperti pusat listrik tenaga laut atau di tengah pegunungan seperti pusat listrik tenaga air, akan mentransmisikan hidrogen melalui pipa dan bukan energi listrik melalui saluran transmisi. Pada pusat pembangkit tenaga listrik, konversi listrik menjadi hidrogen dapat dilakukan melalui elektrolisis. Dengan demikian maka pusat-pusat pembangkit listrik yang letaknya jauh sekali dari pusat beban akan dapat bekerja dengan efisiensi yang cukup tinggi.

Sudah sejak tahun 1933, Rudolf Erren, seorang ilmuwan Jerman, telah menyarankan pembuatan hidrogen dari tenaga listrik di luar waktu beban puncak. Akan tetapi kemajuan yang besar dalam pengembangannya baru tercapai setelah tahun 1960-an. Perusahaan-perusahaan dan lembaga-lembaga besar terutama di Amerika Serikat seperti Institute of Gas Technology di Chicago, General Electric dan General Atomic, turut aktif berusaha untuk mengembangkan teknologi hidrogen ini. Perlu dicatat bahwa harga hidrogen pada saat ini masih tinggi sekali sehingga hanya dapat dipakai untuk keperluan-keperluan yang terbatas.

## 6.1.2 Produksi Hidrogen

Salah satu metode pembuatan hidrogen adalah ekstraksi dari gas alam, dengan suatu proses yang dinamakan oksidasi parsial. Dalam proses ini, gas alam, setelah dipanaskan lalu dimasukkan dalam suatu tangki besar. Dalam tangki ini juga dimasukkan uap bertekanan tinggi dan oksigen. Suhu dalam tangki sangat tinggi, dengan mengatur tekanan dan aliran gas alam, uap dan oksigen maka terjadilah reaksi. Hasilnya adalah terjadinya gas hidrogen. Hidrogen tersebut didinginkan, kemudian dibersihkan dari berbagai bahan kimia seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , dan  $\text{H}_2\text{S}$ , dan setelah dikompres, didapat gas  $\text{H}_2$  yang diperlukan, yang mempunyai kemurnian yang tinggi, dan siap untuk dipakai. Proses tersebut dapat dilihat pada gambar 6.2.

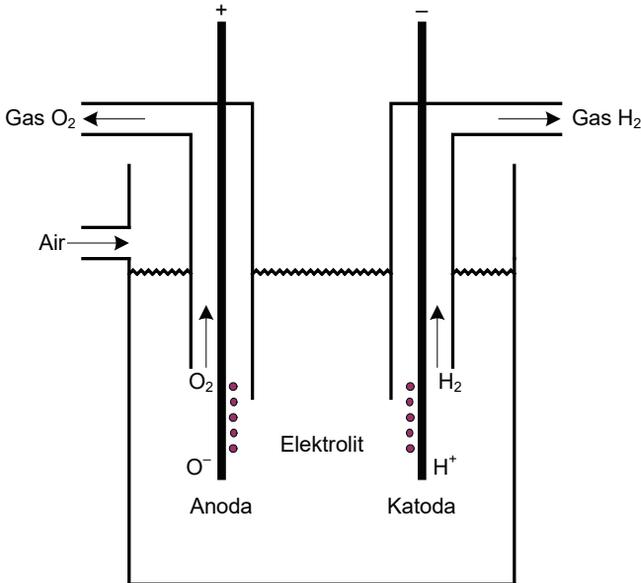
Persoalan yang timbul pada proses ini adalah bahwa sebagai bahan baku diperlukan gas alam yang merupakan suatu bentuk bahan bakar yang sudah mulia. Selain itu cadangan gas alam di bumi ini juga terbatas. Dengan demikian maka proses ini kurang tepat untuk dipertimbangkan penggunaannya pada proses produksi hidrogen secara besar-besaran di kemudian hari.



Gambar 6.2 Skema prinsip pembuatan gas hidrogen dengan proses oksidasi parsial.

Suatu cara yang tampaknya memberikan harapan baik untuk produksi hidrogen di kemudian hari adalah elektrolisis, yang memerlukan energi listrik. Sedang dalam pemikiran adalah memakai energi listrik di luar beban puncak, dan pada lokasi pusat listrik yang jauh. Juga diperkirakan bahwa pusat-pusat pembangkit listrik tenaga nuklir merupakan calon-calon yang kuat bagi proses elektrolisis dalam pembuatan hidrogen.

Gambar 6.3 memperlihatkan skema prinsip elektrolisis. Sebuah tangki diisi dengan air yang dicampur dengan suatu asam, sehingga air tersebut dapat bertindak sebagai konduktor untuk menghantarkan aliran listrik.



Gambar 6.3 Skema prinsip pembuatan hidrogen dengan elektrolisis.

Campuran air dan asam itu dinamakan elektrolit. Dalam elektrolit dipasang dua elektroda, yaitu suatu elektroda positif atau anoda, dan satu elektroda negatif atau katoda. Anoda dihubungkan dengan sisi positif listrik arus searah, dan katoda pada sisi negatif. Jika arus searah mengalir, maka terjadilah elektrolisis, sehingga atom hidrogen dari air kehilangan elektronnya sedangkan atom oksigen mendapat tambahan elektron. Dengan demikian atom oksigen menjadi sebuah ion bermuatan negatif ( $O^-$ ) dan atom hidrogen menjadi sebuah ion yang bermuatan positif ( $H^+$ ).

Karena bermuatan positif, ion-ion  $H^+$  akan tertarik pada katoda yang bermuatan negatif. Ion-ion  $H^+$  ini akan berkumpul pada katoda. Pada saat menyentuh katoda, ion  $H^+$  akan menerima sebuah elektron dan kembali menjadi sebuah atom H biasa, tanpa mempunyai muatan. Atom hidrogen ini bergabung menjadi gas  $H_2$  dalam bentuk gelembung dan melalui katoda akan mengembang ke atas untuk dikumpulkan

melalui sebuah pipa, dan kemudian dikompres. Hal serupa terjadi juga dengan ion O, yang berkumpul ke anoda, untuk kemudian menjelma menjadi gas O<sub>2</sub>. Pada proses ini dengan sendirinya elektrolit harus senantiasa ditambah air, karena H<sub>2</sub>O terus-menerus terurai. Dengan demikian maka air bertindak sebagai bahan baku, dan sebagai hasil elektrolisis diperoleh gas H<sub>2</sub> dan gas O<sub>2</sub>. Dapat dicatat bahwa gas O<sub>2</sub> juga mempunyai harga yang baik dan dapat dijual.

Suatu metode untuk meningkatkan efisiensi elektrolisis adalah bilamana proses itu dilakukan pada suhu tinggi. Dengan mempergunakan suhu tinggi, antara 800 hingga 1000°C, maka kecepatan reaksi elektrokimia pada elektrolisis menjadi lebih besar. Di samping itu kerugian tegangan dapat diperkecil dan dapat digunakan kepadatan arus yang lebih besar. Elektrolisis suhu tinggi ini baru mencapai taraf operasional sekitar tahun 1990-an.

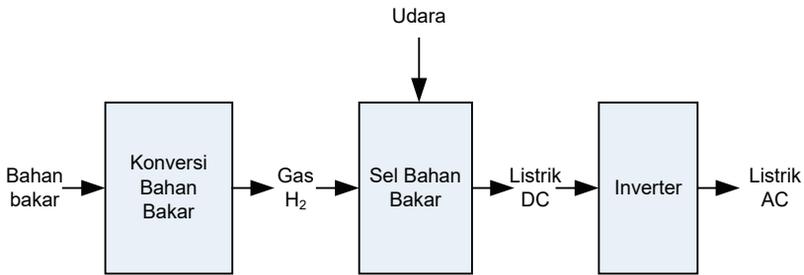
## 6.2 SEL BAHAN BAKAR

Pada dasarnya sebuah sel bahan bakar (fuel cell) adalah sebuah baterai ukuran besar. Prinsip kerja sel ini berlandaskan reaksi kimia, bahwa pada penggabungan hidrogen dan oksigen, terjadi air dan energi. Dalam hal ini energi listrik. Atau,



Pada dasarnya sel bahan bakar terdiri dari tiga bagian, seperti yang terlihat secara skematis pada gambar 6.4 yaitu:

1. Peubah bahan bakar, yang menghasilkan suatu gas yang mengandung bahan hidrogen (H<sub>2</sub>),
2. Sel bahan bakar, yang mnghasilkan energi listrik arus searah, dan
3. Inverter, yang mengubah energi listrik arus searah menjadi arus bolak-balik.

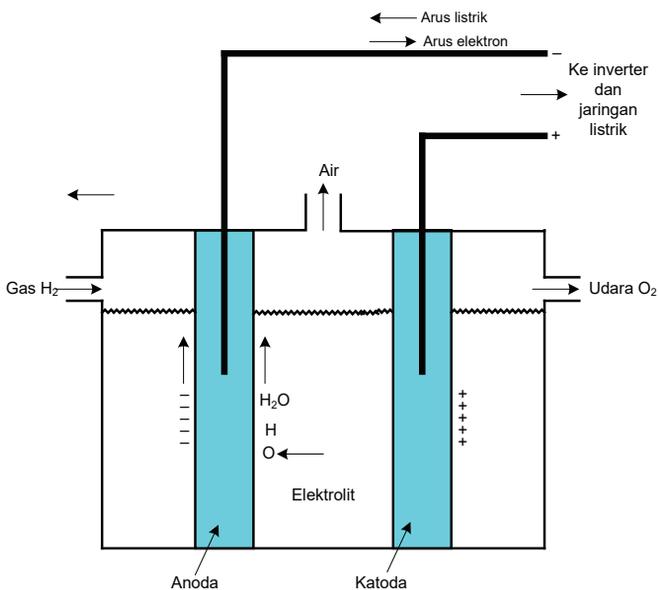


Gambar 6.4 Diagram blok pembuatan energi listrik dengan sel bahan bakar.

Sel bahan bakar itu sendiri pada prinsipnya bekerja sebagai kebalikan dari proses elektrolisis. Gambar 6.5 memperlihatkan prinsip kerja sebuah sel bahan bakar. Sel tersebut terdiri dari sebuah tangki. Dalam tangki itu ada dua dinding berupa elektroda. Satu dinding bekerja sebagai elektroda bahan bakar, dan sebuah dinding lainnya berfungsi sebagai elektroda udara. Di tengah kedua dinding itu terdapat elektrolit, yaitu air yang dicampur asam. Bahan bakar berupa hidrogen  $H_2$  memasuki sel bahan bakar, dan ditampung dalam ruangan sebelah kiri dinding bahan bakar. Sedangkan oksigen  $O_2$  dalam bentuk udara memasuki sel bahan bakar dari sebelah kanan dan ditampung dalam ruangan sebelah kanan elektroda udara. Kedua elektroda dihubungkan pada jaringan listrik melalui inverter. Diatur bahwa elektroda bahan bakar disambung pada sisi negatif, sedangkan elektroda udara pada sisi positif jaringan. Perlu dikemukakan bahwa elektroda udara adalah katoda, sedangkan elektroda bahan bakar adalah anoda.

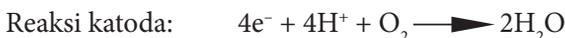
Bilamana oksigen memasuki sel bahan bakar, terdapat reaksi dan atom oksigen itu menerima dua elektron dari elektroda. Kemudian oksigen ini memasuki elektrolit dan mencapai tempat yang berdekatan dengan elektroda bahan bakar. Pada saat ini terjadi dua hal. Pertama oksigen tersebut bergabung dengan hidrogen dan menjadi air ( $H_2O$ ). Pada saat itu juga oksigen tersebut melepaskan muatan negatifnya berupa dua elektron pada elektroda bahan bakar. Bilamana elektron udara pada tiap atom oksigen melepaskan dua elektron, elektron bahan bakar menerima dua elektron. Dengan demikian elektron ini berpindah dari elektroda udara ke elektroda bahan bakar, dan terjadi arus elektron yang merupakan energi listrik arus searah. Listrik arus searah ini dibawa ke sebuah inverter untuk diubah menjadi arus bolak-balik dan dihubungkan pada jaringan. Suatu kekhususan pada

sel bahan bakar adalah bahwa tidak terdapat bagian-bagian mekanis yang bergerak. Dengan demikian pada perubahan energi ini terdapat potensial untuk mempunyai efisiensi yang tinggi. Keuntungan lainnya adalah bahwa polusi terhadap lingkungan sangat rendah. Selain itu bahwa ukuran sebuah sel bahan bakar dibanding dengan pusat-pusat listrik lainnya relatif sangat kecil.

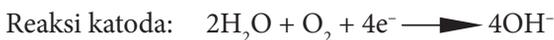
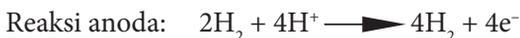


Gambar 6.5 Skema prinsip kerja sel bahan bakar.

Pada contoh di atas dipergunakan elektrolit asam, dimana ion pengantar merupakan H<sup>+</sup>. Dalam hal ini reaksi-reaksi elektroda adalah:



Bilamana dipergunakan elektrolit alkalin, misalnya hidroksida potasium, ion penghantar merupakan OH<sup>-</sup> dan reaksi-reaksi elektroda adalah:

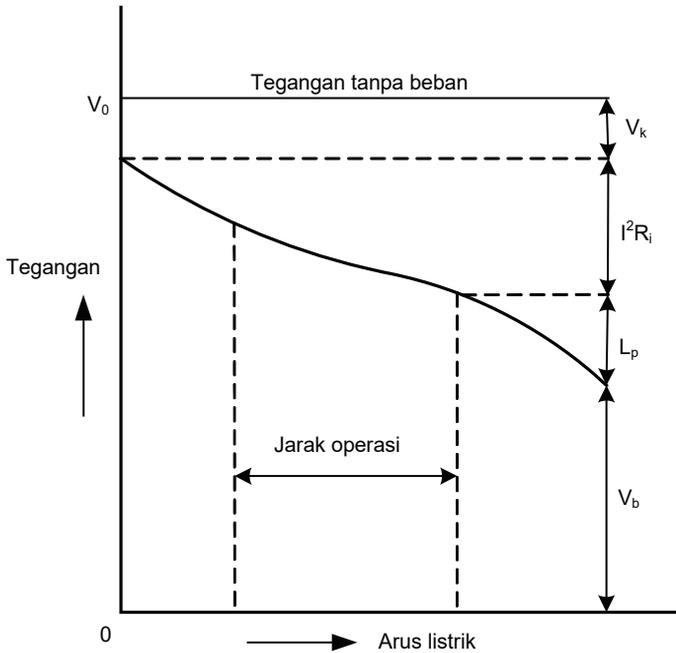


Beberapa jenis sel bahan bakar menggunakan elektrolit berupa bahan padat yang pada dasarnya merupakan suatu membran penukar

ion. Membran demikian harus fleksibel, memiliki kekuatan mekanikal yang besar, stabil secara kimiawi, serta tahan terhadap berbagai jenis gas yang agresif. Sekalipun membran itu tembus ion, ia memiliki tahanan listrik yang tinggi, walaupun tebalnya hanya kira-kira 3 mm. Sel bahan bakar jenis ini pernah dipergunakan sebagai sumber energi listrik pada beberapa satelit ruang angkasa Gemini.

Gambar 6.6 memperlihatkan karakteristik kerja sebuah sel bahan bakar berupa lengkung arus-tegangan. Dalam grafik tersebut,  $V_0$  merupakan tegangan sel bahan bakar bilamana tidak ada beban. Pada saat diberi beban, tegangan akan jatuh karena terjadi polarisasi kimiawi, sehingga tegangan tanpa beban yang sebenarnya adalah di bawah nilai  $V_0$ . Bilamana ditingkatkan, terjadi jatuh tegangan disebabkan kerugian tahanan intern. Pada beban yang agak tinggi terjadi tambahan tegangan jatuh karena terjadi proses polarisasi konsentrasi pada elektrolit. Sebagaimana dapat dilihat pada gambar 6.6, karakteristik kerja ini banyak persamaannya dengan sebuah lengkung tegangan arus sebuah baterai.

Sebagaimana telah dikemukakan sebelumnya bahwa sel bahan bakar telah dipergunakan pada Gemini. Aplikasi lainnya dari sel bahan bakar di ruang angkasa adalah pada satelit Apollo, dan juga pada Skylab, serta pada pesawat ulang-alik Columbia. Hal ini disebabkan sebuah sel bahan bakar sangat ringan sebagai sumber energi listrik. Oleh sebab itu penelitian juga dilakukan untuk memanfaatkannya pada sebuah pesawat terbang, yang mempergunakan hidrogen sebagai bahan bakar. Negara Rusia kini telah memiliki sebuah kapal terbang yang demikian sebagai proyek percobaan. Teknologi sel bahan bakar ini masih berada pada taraf pengembangan, yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan besar di negara-negara maju secara intensif. Diperkirakan bahwa pada akhir tahun 1990 an telah tercapai kematangan teknis dan pada abad ke 21 ini telah diperoleh taraf komersial yang penuh.



Keterangan:  $V_k$  = jatuh tegangan karena polarisasi kimia  
 $I^2 R_i$  = kerugian tahanan intern  
 $L_p$  = kerugian polarisasi  
 $V_b$  = jatuh tegangan pada beban luar

Gambar 6.6 Lengkung tegangan-arus sel bahan bakar.

Dapat disimpulkan bahwa kombinasi bahan bakar hidrogen dan sel bahan bakar merupakan harapan yang besar untuk penyediaan energi listrik di waktu yang akan datang. Sangat menarik untuk dicatat bahwa sebuah sel bahan bakar percobaan dibangun pada tahun 1981 di New York dengan daya terpasang sebesar 4,8 MW. Biaya proyek percobaan ini dipikul bersama oleh US Department of Energy, Electric Power Research Institute, dan sejumlah perusahaan listrik termasuk Consolidated Edison Company of New York. Proyek ini sengaja dipasang di tengah kota untuk mendemonstrasikan bahwa sebuah sel bahan bakar mengakibatkan polusi yang sangat kecil. Juga Tokyo Electric Power Company di Jepang mengoperasikan sebuah sel bahan bakar yang lebih besar yaitu 11 MW, buatan Toshiba. Sedangkan di Southern California Edison Company merencanakan membangun sel bahan bakar sebesar 130 MW.

Dapat pula dicatat bahwa pengembangannya sedang dilakukan oleh the Swedish National Development Company di Akersburgen, sebuah perusahaan di Swedia, untuk membuat sel bahan bakar yang diperuntukkan penggunaan kendaraan. Juga dapat diketahui bahwa riset dan pengembangan serupa dilakukan oleh Energy Research Corporation serta beberapa lembaga lain di Amerika Serikat. Pengembangan ini telah mencapai taraf kematangan teknis yang cukup tinggi, akan tetapi masih belum mencapai kematangan ekonomis.

Juga menarik untuk dikemukakan bahwa suatu lembaga penelitian di Jerman yaitu Solar Wasserstoff Bayern, telah dibuat suatu hibrida atau gabungan antara pembangkit listrik dengan bahan bakar hidrogen serta sel surya fotovoltaic. Penelitian serupa dilakukan juga oleh Siemens, yang merupakan suatu perusahaan besar dalam bidang ketenagaan di Jerman.

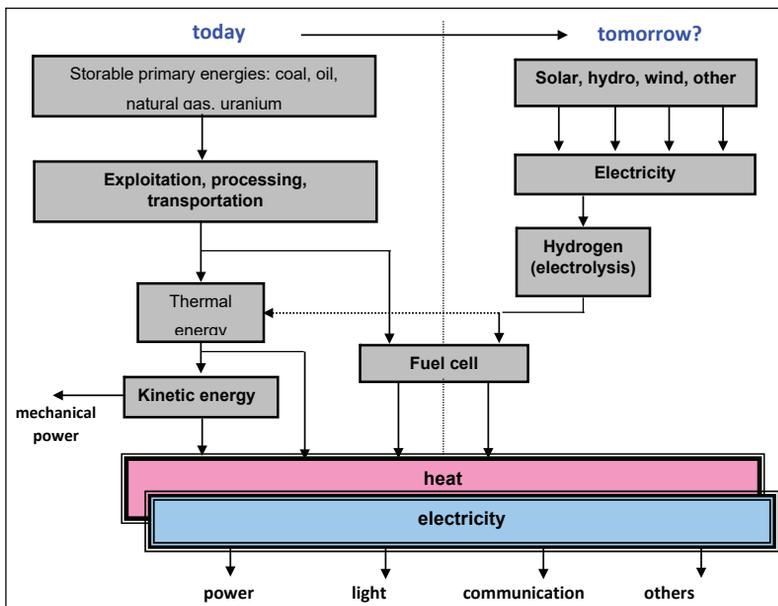
**Latihan:**

1. Jelaskan bahan-bahan bakar kimia yang dapat digunakan untuk keperluan pembangkitan energi listrik.
2. Jelaskan pengertian fuel cell.
3. Jelaskan prinsip kerja fuel cell.
4. Jelaskan prinsip kerja penerapan hidrogen sebagai sumber energi listrik.
5. Berikan komentar Anda tentang prospek fuel cell dan hidrogen untuk penerapan di masa mendatang.

# 7. APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM PEMANFAATAN HIDROGEN

## 7.1 PENDAHULUAN

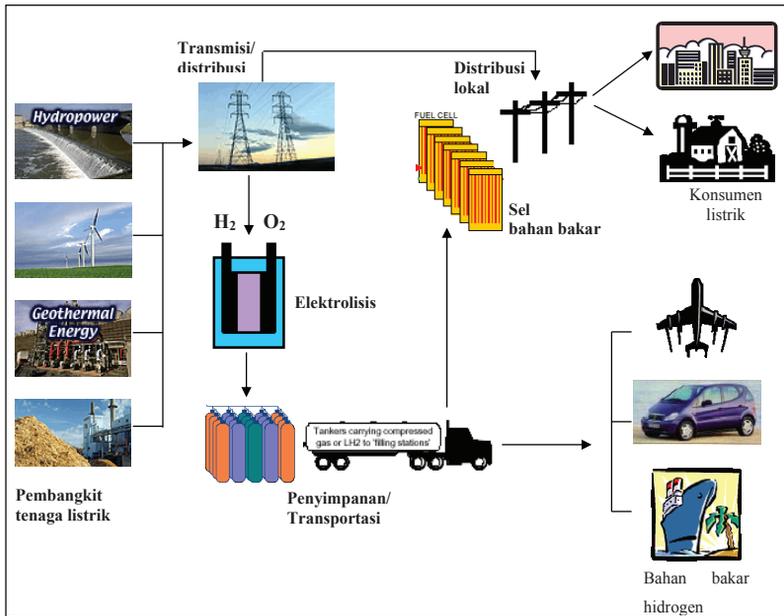
Hidrogen adalah unsur paling sederhana yang tersusun dari satu proton dan satu elektron. Hidrogen mencakup lebih dari 90% komposisi alam semesta. Lebih dari 30% massa matahari adalah atom-atom hidrogen. Hidrogen adalah unsur paling melimpah ketiga pada permukaan bumi, dan kebanyakan terdapat dalam air. Pada kondisi normal, hidrogen tidak berwarna, tidak bau, tidak memiliki rasa, dan merupakan gas yang tidak beracun yang tersusun dari molekul-molekul diatomik ( $H_2$ ). Sifat-sifat ini mendorong para ahli untuk memanfaatkan hidrogen dalam penyediaan energi.



Gambar 7.1 Struktur suplai energi

Sebuah sistem energi didominasi oleh daya listrik yang harus seluwes sistem bahan bakar fosil seperti sekarang ini (gambar 7.1). Kebutuhan akan sistem penyimpanan dan transportasi harus disesuaikan dengan kebutuhan konsumen. Hidrogen merupakan

pembawa energi yang cocok dalam sistem ini. Hidrogen dapat digunakan dalam hampir semua jalur sistem energi kita (gambar 2), yakni untuk aplikasi diam dan aplikasi bergerak.



Gambar 7.2. Jalur hidrogen.

Produksi hidrogen melalui elektrolisis memberikan beberapa keuntungan untuk pembangkitan daya: pengelektrolisis sebagai sebuah beban dalam jaringan listrik dapat dimanfaatkan sebagai pengendali frekuensi atau manajemen beban, oleh karenanya menghemat kapasitas cadangan, dan pembangkit daya dapat dioperasikan pada rating daya dengan efisiensi terbaik dan dengan keuntungan terbesar. Sebagai contoh hidrogen dapat dimanfaatkan di dalam sel bahan bakar untuk memproduksi daya dengan efisiensi yang tinggi. Di dalam jaringan-jaringan pulau atau area-area dengan grid yang lemah dan atau permintaan daya yang semakin banyak, sebuah sistem hidrogen dengan pengelektrolisis, penyimpan dan sel bahan bakar atau mesin bakar dapat digunakan untuk mencatu daya kepada konsumen dengan sebuah catu daya yang andal. Hidrogen dapat diproduksi pada pencatu melalui elektrolisis selama periode beban rendah dan diubah kembali menjadi daya, dalam periode beban puncak. Lebih-lebih dalam penggunaan energi terbarukan seperti angin atau daya matahari,

adanya kesenjangan sementara antara produksi dan permintaan energi dapat dikompensasi.

Selanjutnya penggunaan hidrogen tidak terbatas pada pembangkit listrik saja. Hidrogen sebagai pembawa energi yang luwes dapat juga digunakan sebagai bahan bakar mobil, bus, truk, kapal laut, dan pesawat terbang. Dengan demikian emisi lokal maupun global yang disebabkan oleh lalu-lintas dapat dikurangi. Perusahaan daya dapat melakukan bisnis sebagai pencatu bahan bakar dengan membuat hidrogen melalui elektrolisis. Pengembangan hidrogen sebagai sebuah bahan bakar akan didukung oleh pengembangan sel bahan bakar untuk aplikasi bergerak yang diperkirakan akan berjalan dengan cepat dalam waktu dekat. Hidrogen sebagai bahan bakar optimum untuk kendaraan yang digerakkan oleh sel bahan bakar, memberikan efisiensi tertinggi dan teknologi yang mudah karena tidak memerlukan pengubah bahan bakar.

## 7.2 BERBAGAI TEKNOLOGI SISTEM HIDROGEN

Untuk realisasi sebuah infrastruktur hidrogen, diperlukan kelompok teknologi yang berbeda-beda seperti berikut (daftar teknologi ini tidak mencakup semua teknologi):

- Produksi hidrogen
  1. elektrolisis
  2. pembentukan bahan bakar fosil
  3. biomassa
- Sistem-sistem penyimpan
  1. tabung-tabung tekanan tinggi
  2. LH<sub>2</sub> (*liquid hydrogen*)
  3. metal-hybrid
  4. yang akan datang : nano-graphite?
- Transportasi
  1. pipa
  2. bergerak dengan truk, kereta api, tangki
- Teknologi-teknologi aplikasi
  1. sel-sel bahan bakar
  2. mesin-mesin bakar
  3. turbin

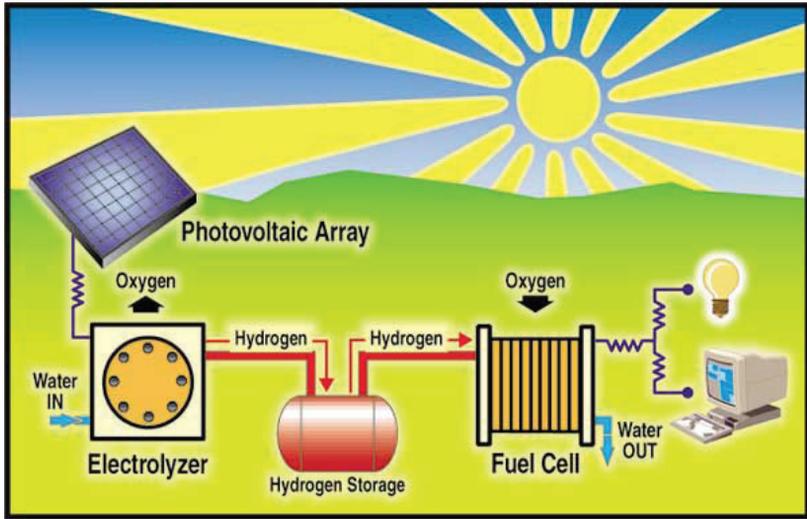
Teknologi-teknologi yang diperlukan untuk keperluan-keperluan komersial dan industri seperti penyesuaian bentuk, penyimpanan dan transportasi, sudah dikenal dengan baik dan merupakan *state of the art*. Teknologi-teknologi yang berhubungan dengan pemanfaatan hidrogen sebagai sebuah pembawa energi memerlukan pengembangan lebih lanjut, misalnya untuk produksi pengelektrolisis berdaya-guna tinggi dengan berbagai kapasitas atau pabrik pengubah biomassa ke hidrogen. Sistem penyimpan harus dikembangkan dengan kerapatan energi tinggi dan pengisian bahan bakar kembali yang mudah. Untuk pemanfaatan hidrogen, teknologi-teknologi yang sekarang ini seperti mesin-mesin bakar atau turbin-turbin harus didisain kembali untuk hidrogen. Teknologi sel bahan bakar mendatang memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk memenuhi target biaya dan persyaratan-persyaratan keandalan. Meskipun demikian sel-sel bahan bakar tampaknya akan menjadi teknologi untuk hidrogen yang menjanjikan karena efisiensinya yang tinggi dan rendahnya perawatan.

### 7.3 HIDROGEN SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI SURYA

Penggunaan energi surya untuk kebutuhan listrik sehari-hari mempunyai keuntungan nyata, dimana kita menghindari sumber-sumber energi yang tidak terbarukan dan menurunkan dampak lingkungan melalui pengotoran emisi, tumpahan minyak, dan hasil samping berupa racun. Sumber-sumber energi terbarukan membuat negara-negara besar seperti Amerika tidak tergantung kepada negara-negara penghasil minyak yang tidak stabil kondisi politik dan sosialnya yang saat ini menyediakan 50% minyak dunia. Sebagai tambahan, hidrogen surya secara ekonomi dapat melindungi negara bukan penghasil minyak dari pengaruh negatif perubahan dramatis dalam suplai dan harga energi. Salah satu kelemahan dari energi surya adalah bahwa matahari tidak selalu bersinar. Kita membutuhkan sebuah cara untuk menyimpan energi surya untuk sewaktu-waktu bila matahari tidak bersinar. Hidrogen memberikan cara yang aman, efisien, dan bersih untuk menyimpan energi surya.

Siklus hidrogen surya (gambar 7.3): energi listrik dari panel-panel photovoltaic dapat digunakan untuk menjalankan electrolyzer, sebuah piranti yang membelah air ( $H_2O$ ) ke dalam unsur-unsur dasarnya yakni hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ). Oksigen dibebaskan ke udara dan

hidrogen dipompa ke dalam tangki penyimpan, dimana dapat disimpan pada suatu tempat atau diangkut ke daerah yang sinar matahari nya sedikit. Pada malam hari ketika energi surya tidak tersedia, hidrogen digabungkan kembali dengan oksigen dari udara dalam sebuah sel bahan bakar (*fuel cell*), sebuah pembangkit daya elektrokimia yang secara langsung mengubah energi kimia dalam hidrogen ke energi listrik. Hasil sampingan dari proses ini hanyalah air bersih.



Gambar 7.3 Siklus hidrogen surya.

Dengan cara yang sama, energi listrik dari sel bahan bakar dapat digunakan untuk jaringan daya yakni untuk alat-alat rumah tangga dan lampu penerangan, dan juga untuk menjalankan mobil. Hidrogen surya memperkenalkan kita untuk menggunakan daya dari matahari selama 24 jam sehari, selain itu juga bersih, efisien, dan sumber energi yang dihasilkan di tempat sendiri.

#### 7.4 PENETRASI PASAR HIDROGEN

Penggantian langsung bahan bakar fosil saat ini dengan konversi energi langsung melalui energi sekunder dalam bentuk hidrogen merupakan sebuah ilusi. Menghadapi perubahan jangka panjang, yang menjadi sasaran sekarang ini adalah untuk memulai mencari jalur-jalur guna menemukan teknik membuat hidrogen yang sesuai dengan kondisi saat ini. Hal ini berarti:

- ❑ Pengembangan dilakukan dalam kondisi pasar bebas dengan batasan-batasannya, tetapi juga menggunakan pengembangan kekuatan kompetisi yang ketat.
- ❑ Karena hidrogen adalah energi sekunder (dibutuhkan energi untuk memproduksi hidrogen), semua proyek hidrogen membutuhkan pendanaan dalam masa sekarang ini. Program-program harus disusun sedemikian rupa untuk menciptakan situasi pasar buatan untuk digunakan dalam kompetisi.
- ❑ Konstanta waktu perubahan dikendalikan oleh kemampuan keuangan negara-negara maju atau lebih baik dikatakan oleh kemauan masyarakat mereka dalam mengalokasikan dana demi keuntungan generasi mendatang.
- ❑ Sejauh proses perubahan tidak ditentukan oleh kekurangan energi atau tekanan metalistik yang kuat, adanya visi tentang kerugian lingkungan mendatang yang akan membuat aksi yang cukup memadai. Dalam situasi seperti ini "rekayasa politik" untuk melibatkan semua pelaku yang relevan hampir sama pentingnya dengan penemuan solusi teknis.

Akan tetapi pengintegrasian komponen sistem energi baru ke dalam sistem yang berlaku saat ini membutuhkan waktu. Apalagi prosedur transisinya masih belum diketahui. Kekuatan pendorong untuk mempertahankan pengembangan, relatif cukup lemah, tetapi masih tetap aktif di Eropa dan di Jerman dan mengalami peningkatan level yang lambat selama bertahun-tahun. Sebuah perusahaan daya di kota Hamburg, Jerman, yakni HEW (*Hamburgische Electricitats Werke, AG*), terlibat dalam proses ini dengan melaksanakan beberapa proyek hidrogen untuk mendukung pengembangan lebih lanjut energi hidrogen.

## 7.5 PROYEK-PROYEK HIDROGEN

Untuk menunjukkan kemampuan hidrogen sebagai pembawa energi yang fleksibel dan dapat disimpan, HEW telah terlibat di dalam proyek-proyek hidrogen selama hampir 10 tahun. Aktivitas pertamanya adalah berpartisipasi di dalam studi bersama dengan sekitar 30 perusahaan di Eropa dan Kanada dalam proyek EQHHP (European Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project) dalam usaha mengapalkan hidrogen cair yang diproduksi di Kanada dengan sebuah fasilitas

daya air 100 MW, ke kota Hamburg. HEW dan HGW (Hamburger Gaswerke GmbH) mengembangkan konsep pemanfaatan hidrogen dalam pembangkit daya sel bahan bakar 10 MW untuk catu panas dan listrik daerah perkotaan. Studi yang lain dikerjakan bersama-sama dengan CONSULECTRA, sub konsultannya HEW, meliputi:

- Konversi energi angin Jerman Utara ke hidrogen yang digunakan untuk bahan bakar kapal feri, mobil atau bis.
- Perkiraan penetrasi pasar yang mungkin dari hidrogen yang diproduksi melalui kombinasi kelebihan listrik dari grid dan yang terbarukan.
- Proyek-proyek bis hidrogen untuk alat transportasi perkotaan.

### **7.5.1 Pembangkit Sel Bahan Bakar untuk Kogenerasi Panas dan Listrik**

Dalam bentuk sebuah kerjasama, dua perusahaan besar di Hamburg, HEW dan HGW, mengoperasikan dua buah sel bahan bakar phosporic-acid (PAFC) di daerah perkotaan yang mengelilingi Hamburg. Sebuah sel bahan bakar dalam proyek ini diberi bahan bakar gas dan alam dan yang lainnya hidrogen. Output setiap sel bahan bakarnya adalah energi listrik dengan daya 200 kW disambungkan ke grid HEW 10 kV dan daya termal yang digunakan 220 kW dalam kombinasi dengan sistem pompa panas yang telah ada, untuk pemanasan daerah dengan suhu rendah ke 680 bangunan perusahaan yang berdekatan. Dalam kondisi iklim yang ada di kota Hamburg, kapasitas catu kedua buah sel bahan bakar kira-kira untuk pemanas bagi 40 buah apartemen dan listrik untuk 200 buah apartemen. Sel bahan bakar gas alam standar dari CLC ONSI (PC25 A) dioperasikan dalam bulan Juni 1995.

### **7.5.2 Armada Van Hidrogen**

Enam buah perusahaan yang ada di Hamburg, termasuk HEW, telah menyetujui kerjasama untuk mengoperasikan sebuah van berbahan bakar hidrogen dalam armada kendaraannya. Kendaraan-kendaraan armada cocok untuk demonstrasi bahan bakar hidrogen karena daerah operasinya yang terbatas dan dikenal baik.



Gambar 7.4 Stasiun-stasiun pengisian bahan bakar hidrogen.

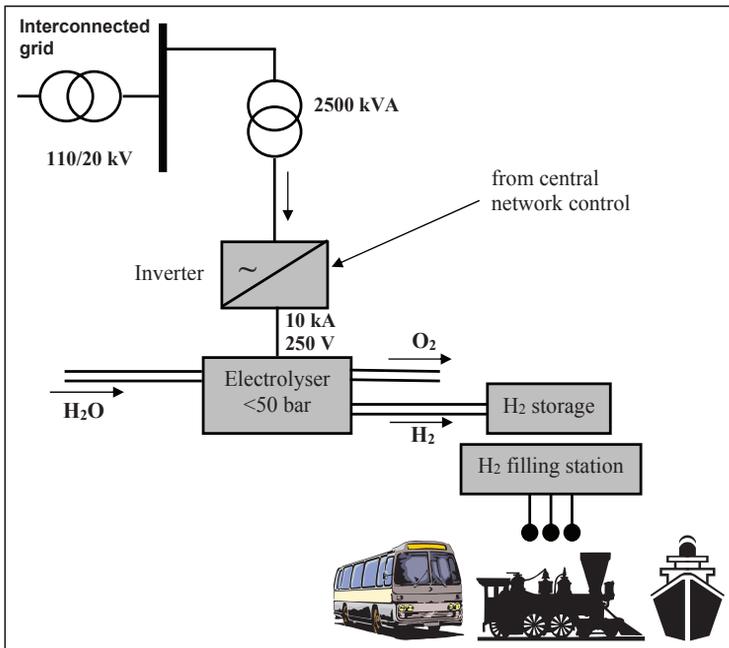
Sampai saat ini infrastruktur yang kurang dalam mencatu hidrogen telah teratasi dengan membangun sebuah stasiun bahan bakar hidrogen pada suatu lokasi yang cocok dan terbuka bagi perusahaan yang berpartisipasi baik sekarang maupun yang akan datang. Yang menjadi sasaran proyek ini adalah: mengurangi emisi, penerimaan publik pada hidrogen sebagai bahan bakar yang digunakan sehari-hari, merealisasikan sebagian infrastruktur untuk bahan bakar hidrogen, menunjukkan rantai hubungan energi dari produksi hidrogen oleh pembangkit daya hidro yang dapat diperbaharui di Iceland, transportasi ke dan pemanfaatan di Hamburg. Operasi kendaraan armada pertama dan stasiun bahan bakar dimulai pada akhir 1998.

### 7.5.3 Pengembangan Pengelektrolisis Berdayaguna Tinggi

Kinerja GHW (Gesellschaft für Hochleistungselektrolyseur zur Wasserstoffherzeugung GmbH), sebuah perusahaan patungan Jerman, HEW, Norsk Hydro Electrolyser dan Motoren und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH (MTU), telah mengembangkan sebuah pengelektrolisis dengan ciri-ciri istimewa yang beradaptasi dengan produksi hidrogen dari sumber listrik yang mempunyai pembangkitan daya yang begitu bervariasi.

Pengelektrolisis ini mempunyai tingkat efisiensi yang tinggi, watak sebagai beban yang baik dan tingkat kemurnian gas yang tinggi dengan operasi *intermiten* yang tinggi. Teknologi pengelektrolisis GHW adalah:

- Diafragma elektroda PSU biaya rendah
- Tekanan operasi 30 bar
- Efisiensi : rating beban 80% sampai dengan 90% (beban 20%)
- Variasi beban 20% - 110%
- Unit daya tipikal: 0,5 sampai 2,5 MW dan lebih.



Gambar 7.5 Jaringan stasiun pengisian hidrogen dengan electrolyser sebagai “controllable load”.

Sebuah pengektrolisasi yang berdayaguna tinggi merupakan komponen kunci dalam sistem energi hidrogen. Proyek dan studi dengan pengektrolisasi baru di GHW, HEW atau CONSULECTRA, meliputi bidang-bidang berikut:

- Memanfaatkan energi matahari PV dalam proyek Solar-Wasserstoff Bayern.
- Memanfaatkan energi angin yang berfluktuasi di dalam sistem grid lemah dengan pembangkit daya angin yang relatif besar.
- Pengendalian beban grid daya (lihat gambar 5). Oleh karena sifat regulasinya yang sedemikian cepat pengektrolisasi dapat digunakan sebagai beban variabel.

#### **7.5.4 Proyek Hidrogen Lanuma Munich**

Pada tempat parkir pesawat terbang di Lanuma Munich, bis-bis dan mobil-mobil VIP diisi dengan bahan bakar hidrogen. Hidrogen disediakan melalui proses elektrolisis atau secara langsung dalam bentuk cair oleh truk-truk. Proyek ini, yang dimulai dalam bulan Januari 1997, melibatkan sebuah pengektrolisasi GHW untuk produksi hidrogen sebagai bahan bakar bis-bis. Sebuah pengektrolisasi GHW 450 kW dalam konstruksi gelincir yang dibiayai oleh negara Bavaria, akan menghasilkan hidrogen untuk periode operasi yang dimulai bulan Mei 1999 dan berakhir sampai EXPO 2000.

#### **7.5.5 Proyek Hidrogen Terpadu Eropa (EIHP)**

Tujuan utama proyek EIHP (European Integrated Hydrogen Project) adalah membuat landasan untuk sebuah pengembangan yang berkelanjutan, integrasi sistem dan penyebarluasan hidrogen sebagai pembawa energi. Proyek ini memfokuskan pada suatu pendekatan harmonis untuk perolehan lisensi dan persetujuan kendaraan yang berkaitan dengan hidrogen dan infrastruktur di Eropa. Pekerjaan studi yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan industri terkait termasuk perusahaan HEW, akan mengadakan survei tentang peraturan dan mencakup identifikasi kebutuhan pengharmonisasian, defisiensi dalam praktek lisensi, kebutuhan-kebutuhan untuk penelitian dan studi keselamatan sebagai persiapan pembuatan standar. Juga proposal-proposal untuk program pengujian dan analisis pasar untuk kendaraan-kendaraan armada sedang dievaluasi dalam suatu proyek 2 tahun yang dimulai pada awal 1998.

### 7.5.6 Aspek Keselamatan

Aspek-aspek keselamatan piranti-piranti hidrogen meliputi banyak percabangan dari produksi sampai ke pemanfaatannya. Hal ini hanya mungkin termasuk dalam cakupan artikel ini secara ringkas diuraikan aspek-aspek keselamatan untuk proyek-proyek aplikasi di atas :

1. Sistem penyimpanan hidrogen cair sel bahan bakar hidrogen telah disetujui oleh Undang-Undang Emisi Jerman Federal.
2. Mobil van dari armada van hidrogen telah disetujui TUV Jerman, mencakup isu keselamatan juga penyesuaian dengan desain terkini dan standar kerekayasaan.
3. EIHP (European Integrated Hydrogen Project) dimaksudkan untuk membuat watak koordinasi dan standar desain, termasuk isu keselamatan.

#### **Latihan:**

1. Jelaskan sifat-sifat gas hidrogen.
2. Jelaskan fungsi dan manfaat hidrogen dalam bidang energi listrik.
3. Jelaskan prinsip dasar untuk mendapatkan gas hidrogen.
4. Jelaskan prinsip kerja penggunaan hidrogen sebagai pengganti bahan bakar minyak.
5. Berikan pendapat Anda tentang prospek hidrogen dalam bidang energi di masa mendatang.

## 8. PEMANFAATAN TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA BAHAN ISOLASI

### 8.1 PENDAHULUAN

Pengetahuan mengenai bahan isolasi merupakan pengetahuan kimia yang sangat diperlukan dalam aplikasi di bidang teknik. Bahan isolasi merupakan bahan yang secara elektrik memisahkan dua bagian yang bertegangan listrik. Bahan isolasi sangat dibutuhkan dalam bidang teknik elektro khususnya yang berkaitan dengan tegangan tinggi. Bahan isolasi sering disebut juga sebagai bahan dielektrik atau material dielektrik. Isolasi berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang mempunyai beda tegangan agar supaya diantara bagian-bagian tersebut tidak terjadi lompatan listrik (*flash-over*) atau percikan (*spark-over*).

Jika suatu bahan isolasi gagal dalam menjalankan fungsinya dengan baik maka dikatakan mengalami kegagalan isolasi. Kegagalan isolasi saat peralatan sedang beroperasi bisa menyebabkan kerusakan alat sehingga sistem menjadi terganggu. Kegagalan isolasi (*insulation breakdown, insulation failure*) disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih. Kerusakan akibat kegagalan isolasi dapat berupa kerusakan yang bersifat sementara maupun kerusakan yang bersifat permanen. Sehingga pemakaian isolasi sangat diperlukan terutama pada peralatan-peralatan yang berbasis pada tegangan tinggi, misalnya transformator, generator, motor dan lain-lain. Isolasi pada peralatan-peralatan tersebut sangat penting diketahui karena pentingnya peralatan tersebut dalam sistem tenaga listrik terutama dalam hal transmisi. Dan terkadang, isolasi juga merupakan faktor yang sangat dipertimbangkan dalam design dan proses konstruksi, dalam hal keandalan dan harga. Isolasi pada sistem tenaga listrik dapat digunakan untuk memisahkan lilitan dalam suatu kumparan, kumparan yang berbeda fase, dan antara kumparan yang satu dengan yang lain. Karakteristik berbagai macam isolasi yang berbeda-beda sangat penting untuk diketahui. Hal ini guna menentukan bahan isolasi mana yang dapat memberikan kinerja sesuai yang diinginkan. Dan tentu saja dalam pemilihan bahan isolasi

yang akan digunakan, karakteristik-karakteristik yang dimiliki oleh bahan isolasi tersebut disesuaikan dengan parameter-parameter yang dimiliki oleh transformator yang akan diisolasi. Karakteristik yang terpenting adalah nilai dielektrik bahan.

Saat ini telah banyak bermacam-macam isolasi yang diciptakan untuk isolasi pada peralatan-peralatan listrik tegangan tinggi seperti transformator daya, kapasitor daya, pemutus tenaga (*circuit breaker*), penghantar saluran transmisi, dan lain-lain dengan keandalan dan performansi yang berbeda-beda pula. Diantara berbagai jenis bahan isolasi yang ada, yang paling banyak dikembangkan adalah isolasi yang bersifat multifungsi, misalnya isolasi minyak yang dapat berperan sekaligus sebagai pendingin atau juga dapat sebagai peredam surja lebih/petir.

## 8.2 JENIS BAHAN ISOLASI

Secara umum jenis-jenis bahan isolasi dapat dibedakan menjadi lima kategori, yaitu isolasi gas, cair, padat, hampa (*vacuum*), dan komposit.

### 8.2.1 Isolasi Gas

Pada keadaan normal, kebanyakan gas merupakan bahan isolator yang baik. Hal ini dapat dilihat dengan penggunaan isolasi udara pada jaringan transmisi maupun distribusi over head. Selain itu penggunaan gas sebagai isolator dapat ditemukan pada trafo, switchgear, kabel. Jenis-jenis gas (selain udara) yang biasa digunakan diantaranya adalah belerang heksafluorida ( $\text{SF}_6$ ), nitrogen ( $\text{N}_2$ ), freon ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ). Isolasi gas idealnya berharga murah (pada saluran udara), stabil secara kimiawi maupun suhu, serta tidak mengandung racun, bersifat korosif, dan tidak mudah terbakar pada penggunaan yang lama dalam tekanan listrik, juga mampu mengalirkan panas serta meredam busur api dengan baik, memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi baik untuk tegangan AC, DC, maupun impuls.

Gas  $\text{SF}_6$  adalah salah satu bahan yang digunakan untuk isolasi pada peralatan listrik tegangan tinggi. Gas ini mempunyai sifat-sifat

1. Tidak berbau
2. Tidak berwarna
3. Tidak mudah terbakar

4. Sifat kimianya cukup stabil
5. Non korosif
6. Dapat memadamkan busur api dengan cepat

Secara luas SF<sub>6</sub> banyak digunakan pada peralatan-peralatan tenaga listrik. Pada trafo, digunakan sebagai bahan isolasi dan pendingin. Pada bidang lain, gas ini juga digunakan sebagai pemadam api karena sifatnya yang tidak mudah terbakar dan dapat menjadi pendingin.

Gas SF<sub>6</sub> dapat terurai bila berada pada suhu yang sangat tinggi yaitu diatas 500°C menjadi Sulfur Oksida dan Fluoride. Bila turgid electrical discharge, dapat terurai menjadi SO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SF<sub>4</sub> dan SOF<sub>2</sub> berupa gas stabil.

Sifat-sifat kimia gas SF<sub>6</sub> diantaranya:

Boiling point	-60°C
Suhu kritis	45.5 °C
Kerapatan relatif	5 (udara=1)
Tekanan dalam 20 °C	21 bar

Gas SF<sub>6</sub> hanya menempati 0,00000000003 bagian dari atmosfer sehingga stabilitasnya di atmosfer akan tetap terjaga untuk waktu yang sangat lama. Gas yang dapat mempengaruhi lapisan ozon mengandung Chlor dan SF<sub>6</sub> tidak mengandung Chlor sehingga aman bagi lapisan ozon. Gas ini juga hanya memberi kontribusi sebesar kurang dari 0,1% terhadap efek rumah kaca. Nilai ini sangat jauh dibandingkan dengan gas CO<sub>2</sub> yaitu 60%.

Penelitian akan pencampuran gas SF<sub>6</sub> dengan gas lainnya dilakukan karena mem pertimbangkan segi ekonomis serta dampak lingkungan dan keamanan yang mungkin ditimbulkan. Dimungkinkan adanya pencampuran SF<sub>6</sub> dengan gas lain seperti Nitrogen dan CF<sub>4</sub>. Persentase pencampuran ini berkisar antara 5% - 90%. Tentunya pencampuran ini memberikan dampak yaitu mengurangi kemampuan dielektrisnya. Sehingga, tekanan perlu dinaikkan untuk memberikan kemampuan isolasi yang sama. Dampak lainnya terhadap lingkungan yaitu peralatan listrik menjadi lebih mudah rusak sehingga diperlukan perhatian lebih terhadap penanganan peralatan yang menggunakan gas SF<sub>6</sub>, campuran dibandingkan dengan yang murni.

Pada gambar 8.1 ditunjukkan salah satu contoh konstruksi transformator tenaga dengan isolasi gas SF<sub>6</sub> yang terdapat pada gardu induk pasangan dalam.



Gambar 8.1 Transformator tenaga berisolasi gas SF<sub>6</sub> pada gardu induk pasangan dalam

Biasanya gas SF<sub>6</sub> dijual dalam satuan berat. Terdapat beberapa kelas sesuai dengan tingkat kemurnian gasnya. Semakin murni maka semakin mahal. Yang biasa dijual adalah tingkat *chemically pure* seharga \$20/kg. Untuk tingkat lebih tinggi bisa mencapai harga \$40/kg. Biasanya dijual dalam bentuk cair dalam wadah tangki bertekanan 320 psi. Karena heat capacity SF<sub>6</sub> jauh lebih kecil dari pada minyak trafo, maka tekanan gas pada trafo perlu dinaikkan menjadi 0.5Mpa, aliran gas perlu diperbesar dari gas blower, menggunakan bahan isolasi dengan tingkat kemampuan thermal tinggi.

Keuntungan dari trafo dengan bahan isolasi gas adalah tingkat keandalan yang tinggi dengan struktur internal yang cukup sederhana, instalasi mudah tanpa proses pemurnian minyak trafo, serta pengecekan dan maintenance yang mudah. Pada tekanan atmosfer, SF<sub>6</sub> mempunyai kuat dielektri 2,5 kali lebih besar dibandingkan dengan udara. Biasanya gas ini digunakan pada 3-5 kali besar tekanan atmosfer. Sifat dielektrik dari gas ini juga 10 kali lebih baik dibandingkan dengan udara.

Gas lain yang digunakan sebagai bahan isolasi adalah gas  $\text{SO}_2\text{F}_2$ . Gas ini mempunyai sifat kimia sebagai berikut:

Boiling point	-55.4 C
Such kritis	92 °C
Kerapatan relative	3.7 (udara=1)
Tekanan dim 20 °C	16 bar

Bila dibandingkan dengan  $\text{SF}_6$  maka terlihat bahwa sifat kimia  $\text{SF}_6$  lebih baik karena boiling point lebih rendah dan tekanan lebih tinggi serta kerapatan relatifnya juga lebih tinggi sehingga kemampuan isolasi lebih tinggi.

Selanjutnya gas yang juga sering digunakan sebagai bahan isolasi adalah gas  $\text{SO}_2$ . Gas ini mempunyai sifat kimia:

Boiling point	-10.1 °C
Suhu kritis	157.6°C

Tampak bahwa boiling pointnya jauh lebih tinggi dibandingkan dengan  $\text{SF}_6$  sehingga sifat kimianya tidak begitu baik walaupun suhu kritisnya cukup tinggi. Gas  $\text{SO}_2$  merupakan salah satu hasil samping dari penguraian  $\text{SF}_6$  bila terjadi electrical discharge.

### 8.2.2 Isolasi Hampa (*Vacuum*)

Dengan tidak adanya gas residu di sela elektroda, akan menyebabkan timbulnya media hampa dalam sela, yang akan menghasilkan isolasi yang baik dan kemampuan meredam busur yang baik. Kehampaan yang benar-benar murni sulit di dapat dan dalam tekanan  $10^{-9}$  sampai  $10^{-10}$  bar gas residu masih muncul dalam peralatan berisolasi *vacuum*. Sehingga bahan, bentuk, muka elektroda, tekanan gas residu, dan partikel-partikel pengotor merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan peralatan berisolasi hampa (*vacuum*). Isolasi *vacuum* ini digunakan pada switch dan CB.

### 8.2.3 Isolasi Cair

Isolasi cair idealnya memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, resistivitas volume, suhu yang tertentu, konduktifitas termal, serta non korosif, tidak mudah terbakar, tidak beracun, memiliki kestabilan kimiawi, dan kemampuan meredam busur yang baik. Walaupun cairan murni lebih baik (kecuali dalam masalah harga) dibanding dengan

cairan campuran, namun cairan campuran lebih banyak digunakan. Cairan campuran tersebut biasanya merupakan campuran hidrokarbon atau silikon (*silicon oil*) ataupun hidrokarbon sintesis. Penggunaan minyak sayur dan ester pun juga mulai berkembang.

#### 8.2.4 Isolasi Padat (*Solid*)

Isolasi padat juga memiliki beberapa karakteristik seperti dalam isolasi gas maupun cair. Sebagai tambahan, isolasi padat juga memiliki kemampuan mekanis dan pengikatan yang baik. Isolasi padat yang digunakan dalam aplikasi peralatan tegangan tinggi, dapat berupa unsur organik maupun anorganik. Bahan anorganik yang sering digunakan diantaranya keramik dan kaca sebagai bahan isolator dan bushing. Sementara bahan organik yang sering digunakan adalah *thermosetting epoxy resin* atau bahan *thermoplastic* seperti poli vinil klorida (PVC), poli etilen (PE). Bahan lain seperti kertas Kraft, karet alami, karet etilen polipropilena (EPR), karet silikon, dan polipropilena juga sering digunakan. Isolasi padat digunakan sangat luas dalam ketenagaan listrik. Cara paling mudah untuk mengklasifikasi isolasi padat adalah dengan komposisi kimianya, seperti organik, anorganik atau sintetik polimer.

##### 1. Kertas dan papan

Kertas dan papan dibuat dari berbagai macam bahan, meliputi kayu, katun, kaca, serat organik, keramik dan mika. Perbedaan kertas dan papan adalah ketebalannya, kertas < 0.8 mm, papan > 0.8 mm. Untuk papan yang lebih dari 6 mm dilapisi bahan adeseive untuk mendapatkan ketebalan yang diinginkan. Papan sering disebut pressboard, papan transformer atau papan fuller. Kertas yang digunakan khusus untuk isolasi disebut kraft paper. Ketebalan dan kepadatan kertas tergantung penggunaannya. Kepadatan rendah ( $0.8 \text{ g/cm}^3$ ) digunakan untuk kapasitor dan kabel frekuensi tinggi, sedang kepadatan sedang digunakan untuk kapasitor daya. Kertas kepadatan tinggi digunakan pada kapasitor penyimpan daya dan isolasi mesin DC.

##### 2. Mika

Mika yang banyak digunakan untuk isolasi berasal dari bahan organik, yaitu dari kristalisasi mineral silikat dari alumina dan potas. Mika mempunyai kombinasi propertis yang unik, seperti *dielectric strength* tinggi, daya hilang rendah, tahan terhadap suhu tinggi dan kekuatan mekanis tinggi. Mika dapat dicampur dengan damar untuk mendapatkan suhu operasi yang diinginkan.

### 3. Kaca

Kaca adalah material termoplastik anorganik yang dikompres dari  $\text{SiO}_2$ . Sebelum dikristalkan, kaca dapat dikategorikan sebagai liquid. Sebuta E-glass digunakan pada kaca fiber yang dirancang menggantikan material plastik untuk mendapatkan kekuatan mekanis lebih tinggi. Konstanta dielektrik kaca bervariasi dari 3.7 sampai 10, dengan kepadatan dari 2.2 sampai  $6 \text{ g/cm}^3$ . Pada suhu ruangan, hambatan jenisnya  $10^{14}$  sampai  $10^{22}$  ohmm. Kekuatan dielektrik kaca bervariasi dari 3 sampai 5 MW/cm, yang naik sebanding kenaikan suhu. Sekarang ini, penggunaan kaca fiber sebagai isolasi pada (1) membalut inti transformers, (2) bahan pembuatan komposit isolator, (3) pengganti plastik pada isolasi mesin-mesin listrik.

### 4. Keramik

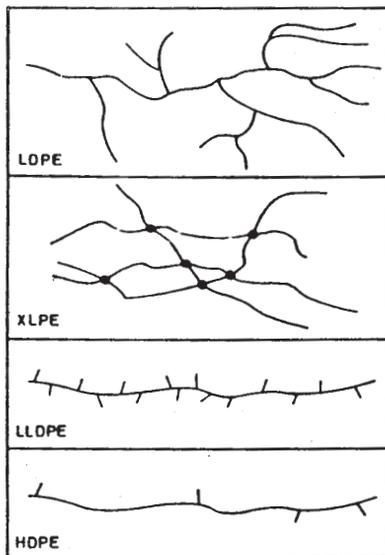
Keramik adalah anorganik material yang dibuat dengan memadatkan mineral agar bersatu dalam suatu bentuk dengan pemanasan suhu tinggi. Keramik dapat dibagi dua berdasar konstanta dielektrik. Keramik permitivitas rendah ( $\epsilon_r < 12$ ) digunakan sebagai isolator, sedang keramik dengan permitivitas tinggi ( $\epsilon_r > 12$ ) digunakan sebagai kapasitor dan transducer.

Tabel 8.1 Sifat Dielektrik Isolator Keramik

Ceramic	Dielectric strength V/mil (ASTM D 149) (kV/mm)	Dielectric constant 1 MHz (ASTM D 150)	Dissipation factor 1 MHz (ASTM D 150)
Alumina (99.9% $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	340 (13.4)	10.1	0.0002
Aluminum silicate	150 (6.0)	4.1	0.0027
Beryllia (99% $\text{BeO}$ )	350 (13.8)	6.4	0.0001
Boron nitride	950 (37.4)	4.2	0.00034
Cordierite ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ )	200 (7.8)	4.8	0.0050
Magnesia ( $\text{MgO}$ )	—	5.4	< 0.0003
Porcelain ( $4\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ )	—	8.5	0.005
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	—	3.8	0.0038
Sapphire	—	9.3–11.5	0.0003–0.00086
Silica (fused)	—	3.2	0.0045
Steatite	—	5.5–7.2	0.001
Zircon ( $\text{ZrSiO}_4$ )	—	5.0	0.0023
Magnesium metatitanate ( $\text{MgTiO}_3$ )	—	16	0.0002
Strontium zirconate ( $\text{SrZrO}_3$ )	—	38	0.0003
Titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ )	—	90	0.0005
Calcium titanate ( $\text{CaTiO}_3$ )	—	150	0.0003
Strontium titanate ( $\text{SrTiO}_3$ )	—	200	0.0005
Barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ )	—	1500	0.015

## 5. Polimer

Polimer adalah rantai panjang makromolekul yang dibuat dari monomer (atau mer). Polimer sederhana dapat dibentuk dari pencabangan rantai utama. Pencabangan dapat dibuat dengan polimerisasi, yang dapat menghasilkan polimer yang berbeda-beda. Yaitu LDPE, XLPE, LLDPE, dan HDPE.



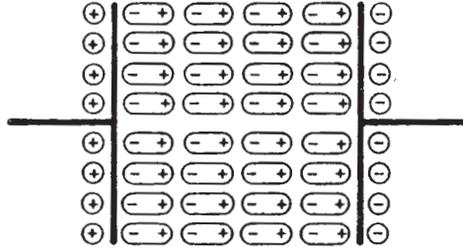
Gambar 8.2 Struktur LDPE, XLPE, LLDPE, dan HDPE.

### *Dielectric Loss di Isolator Solid*

Kapasitor plate paralel dengan rapat muatan  $q$ , luas permukaan  $A$  dan terpisah sejauh  $d$ , maka medan listrik resultan  $E_0$  di vakum :

$$E_0 = 4\pi q$$

Jika kita menyisipkan material dielektrik dengan permitivitas dielektrik  $\epsilon$  diantara plate, akan menurunkan intensitas medan listrik diantara plate tersebut.



Gambar 8.3 Polarisasi elektrik..

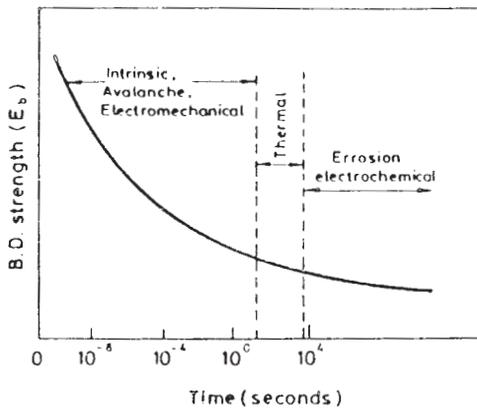
Fenomena ini disebut *dielectric polarization* ( $p$ ). Rapat muatan menjadi  $E_0/4\pi e$ , dengan  $e = e_0 e_r$ . Sehingga

$$P = \frac{E_0}{4\pi} - \frac{E_0}{4\pi\epsilon}$$

$$P = (\epsilon - 1) \frac{E}{4\pi}$$

### Breakdown di Isolator Solid

Meteri solid terdiri dari atom yang berdiri berikatan. Susunan atom ini berulang membentuk bangun 3 dimensi. Oleh karena itulah juga dinamakan kristal. Solid yang atomnya terusun tidak teratur dan lebih acak disebut non kristal atau *amorphous*.



Gambar 8.4 Variasi *breakdown strength* dane mekanisme breakdown terhadap waktu tekan.

Ketika breakdown terjadi, solid secara permanen rusak karena gas menutupi secara penuh *dielectric strength* nya, serta sebagian liquid. Mekanisme breakdown adalah fenomena kompleks pada kasus solid, dan tergantung dari waktu pembebanan tegangan. Prinsip-prinsip variasi fenomena breakdown adalah

1. Mekanisme breakdown elektronik
2. Mekanisme breakdown termal
3. Mekanisme breakdown elektromekanis

### 8.2.5 Isolasi Komposit

Bahan isolasi komposit dimaksudkan apabila lebih dari satu jenis bahan isolasi yang digunakan dalam sebuah peralatan tegangan tinggi. Komposit dapat pula disebut hibrid. Contoh penggunaannya adalah pada GIS (*Gas Insulated Switchgear*), isolasi padat dan gas digunakan secara bersama-sama.

Penggunaan GIS sangat dianjurkan untuk daerah-daerah perkotaan dan perumahan yang mengharuskan peralatan aman kebakaran, dan pada pembangkit-pembangkit hidro, dimana keramahan lingkungan menjadi faktor penting.



Gambar 8.1 Gas Insulated Switchgear.

Keunggulan GIS diantaranya:

1. Keandalan (*reability*) yang tinggi dengan susunan internal yang simpel,
2. Instalasi yang mudah karena tanpa pemurnian minyak trafo,
3. Inspeksi dan perawatan yang mudah,
4. Kompatibilitas yang baik dengan *gas insulated switchgear* (GIS),
5. SF<sub>6</sub> teruji tahan api dan tidak mudah terbakar (meledak), dan peredaman busur yang sangat baik,
6. Tingkat resistansi isolasi yang tinggi sehingga mampu untuk mengatasi gangguan surja maupun petir selama berulang-ulang, dan
7. Dengan adanya SF<sub>6</sub> sebagai isolasi, maka trafo dapat dibuat lebih ringkas (kecil) untuk rating daya yang sama.

Secara kimiawi SF<sub>6</sub> lebih stabil, tidak mengandung racun, dan tidak berwarna, sehingga apabila terjadi kebocoran tangki gas, keamanan lingkungan tetap terjaga.

Pengembangan gas sebagai bahan isolasi dalam trafo, khususnya, masih dalam tahap eksperimen. Hal ini dikarenakan SF<sub>6</sub> masih memiliki kekurangan, yaitu adanya kemungkinan memacu efek rumah kaca. Beberapa eksperimen telah dilakukan untuk mencampur SF<sub>6</sub> dengan gas N<sub>2</sub>. Secara ekonomi gas N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> lebih murah daripada gas SF<sub>6</sub> murni, namun dalam hal pemadaman busur SF<sub>6</sub> murni masih dapat diandalkan.

### 8.3 KEGAGALAN ISOLASI

Kegagalan isolasi disebabkan oleh adanya *partial discharge*. Partial discharge (pelepuhan parsial) adalah peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut. Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair maupun bahan isolasi gas. Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, *streamer*, thermal dan kegagalan erosi. Kegagalan pada bahan isolasi cair disebabkan oleh adanya kavitasi, adanya butiran pada zat cair dan tercampurnya bahan isolasi cair. Pada bahan isolasi gas mekanisme *townsend* dan mekanisme *streamer* merupakan penyebab kegagalan.

Proses dasar dalam kegagalan isolasi gas adalah ionisasi benturan oleh elektron. Ada dua jenis proses dasar yaitu: proses primer, yang memungkinkan terjadinya banjir elektron, dan proses sekunder, yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron. Saat ini dikenal dua mekanisme kegagalan gas yaitu: mekanisme kegagalan Townsend dan mekanisme kegagalan streamer.

### 8.3.1 Mekanisme Kegagalan Townsend

Pada proses primer, elektron yang dibebaskan bergerak cepat sehingga timbul energi yang cukup kuat untuk menimbulkan banjir elektron. Jumlah elektron  $N_e$  pada lintasan sejauh  $dx$  akan bertambah dengan  $dN_e$ , sehingga elektron bebas tambahan yang terjadi dalam lapisan  $dx$  adalah  $dN_e = a N_e dx$ . Ternyata jumlah elektron bebas  $dN_e$  yang bertambah akibat proses ionisasi sama besarnya dengan jumlah ion positif  $dN_+$  baru yang dihasilkan, sehingga  $dN_e = dN_+ = a N_e(t) dt$ ; dimana  $a$  adalah koefisien ionisasi Townsend;  $dN_+$  adalah jumlah ion positif baru yang dihasilkan;  $N_e$  adalah jumlah total elektron;  $V_d$  adalah kecepatan luncur elektron. Pada medan uniform,  $a$  konstan,  $N_e = N_0 e^{ax}$  sehingga  $N_e = N_0 e^{ax}$ . Jumlah elektron yang menumbuk anoda per detik sejauh  $d$  dari katoda sama dengan jumlah ion positif yaitu  $N_+ = N_0 e^{ax}$ . Jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda adalah  $N_e = \frac{N_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)}$  dan arus electron  $i = \frac{i_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)}$  Arus ini akan naik terus sampai terjadi peralihan menjadi pelepasan yang bertahan sendiri. Peralihan ini adalah percikan dan  $\gamma(\epsilon^{ad} - 1) = 1$  diikuti oleh perubahan arus dengan cepat dimana karena  $e^{ad} \gg 1$  maka  $N_0 e^{ad}$  secara teoritis menjadi tak terhingga, tetapi dalam praktek hal ini dibatasi oleh impedansi rangkaian yang menunjukkan mulainya percikan.

### 8.3.2 Mekanisme Kegagalan Streamer

Ciri utama kegagalan streamer adalah postulasi sejumlah besar foto ionisasi molekul gas dalam ruang di depan streamer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan ruang ion pada ujung streamer. Muatan ruang ini menimbulkan distorsi medan dalam sela. Ion positif dapat dianggap stasioner dibandingkan elektron-elektron yang bergerak cepat dan banjir elektron terjadi dalam sela dalam

awan elektron yang membelakangi muatan ruang ion positif. Medan  $E_r$  yang dihasilkan oleh muatan ruang ini pada jari jari  $R$  adalah.

$$E_r = \frac{Q \cdot 10^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 Ne}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{10RN e}{3\epsilon_0} \text{ V/cm}$$

Pada jarak  $dx$ , jumlah pasangan elektron yang dihasilkan adalah  $\alpha e^{\alpha x} dx$  sehingga  $N = \frac{\alpha e^{\alpha x} dx}{\pi R^2 dx} = \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\pi R^2}$  dan  $E_r = \frac{10^2 \alpha e^{\alpha x}}{3\epsilon_0 \pi R}$  R adalah jari-jari banjiran setelah menempuh jarak  $x$ , dengan rumus diffusi  $R = \sqrt{2Dt}$ . Dimana  $t = x/V$  sehingga  $E_r = \frac{10^2 \alpha e^{\alpha x} e}{3\epsilon_0 \pi \sqrt{2D \cdot x/V}}$  dimana

$N$  adalah kerapatan ion per  $\text{cm}^2$ ;  $e$  adalah muatan elektron (C);  $\epsilon_0$

adalah permitivitas ruang bebas;  $R$  adalah jari-jari (cm);  $V$  adalah kecepatan banjiran; dan  $D$  adalah koefisien diffusi.

**Latihan:**

1. Jelaskan pengertian dan fungsi bahan isolasi.
2. Jelaskan manfaat bahan isolasi khususnya dalam bidang teknik elektro.
3. Jelaskan kelebihan dan kekurangan masing-masing bahan isolasi.
4. Jelaskan mekanisme kegagalan suatu bahan isolasi.
5. Jelaskan aplikasi bahan isolasi dalam bidang teknik elektro.

# 9. APLIKASI TEKNOLOGI KIMIA DALAM REKAYASA ENERGI BARU DAN TERBARUKAN UNTUK PELESTARIAN LINGKUNGAN

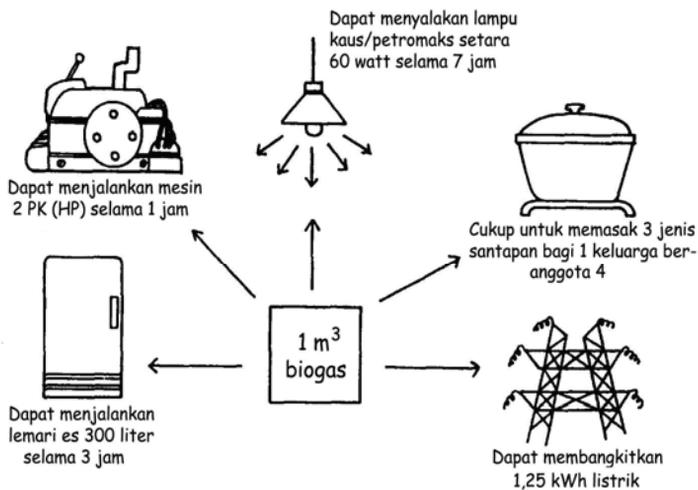
## 9.1 PENDAHULUAN

Biogas merupakan salah satu solusi teknologi energi untuk mengatasi kesulitan masyarakat akibat kenaikan harga BBM, teknologi ini bisa segera diaplikasikan, terutama untuk kalangan masyarakat pedesaan yang memelihara hewan ternak sapi. Dalam rangka pemenuhan keperluan energi rumah tangga, khususnya di pedesaan, maka perlu dilakukan upaya yang sistematis untuk menerapkan berbagai alternatif energi yang layak bagi masyarakat. Sehubungan dengan hal ini, maka salah satu upaya terobosan yang dilakukan adalah melaksanakan program Bio Energi Perdesaan (BEP), yaitu suatu upaya pemenuhan energi secara swadaya (*selfproduction*) oleh masyarakat khususnya di pedesaan. Usaha peternakan di Propinsi-profinsi tertentu cukup berkembang, baik secara intensif, semi intensif maupun tradisional, Tapi pemanfaatan kotoran ternak selama ini belum optimal, bahkan kotoran tersebut hanya menimbulkan masalah lingkungan. Pada hal kotoran ternak dapat dijadikan sebagai bahan baku untuk menghasilkan energi terbarukan (*renewable*) dalam bentuk biogas. Permasalahan yang terjadi di pedesaan, terutama bagi masyarakat peternakan, belum mampu memanfaatkan limbah kotoran ternak sebagai penghasil energi alternatif (energi terbarukan) pengganti kayu dan BBM, dimana kegiatan sehari-hari mereka sangat tergantung pada BBM dan kayu baik untuk memasak maupun penerangan. Hal ini sangat berdampak terhadap pendapatan dari masyarakat desa (peternak) itu sendiri.

Ada empat hal yang menyebabkan masyarakat kurang tertarik menggunakan energi alternatif (termasuk biogas dari kotoran ternak) tersebut, antara lain: 1). Masalah kebiasaan, masyarakat sudah terbiasa menggunakan minyak tanah atau kayu sebagai bahan bakar, sulit bagi mereka untuk mengubah kebiasaan ini secara drastis dan butuh waktu yang lama. 2). Masalah kepraktisan, menggunakan minyak tanah lebih praktis dibandingkan dengan menggunakan biogas, karena mereka belum

terbiasa. 3). Ketersediaan energi alternatif (biogas dari kotoran ternak) di pasar tidak terjamin secara berkesinambungan. 4). Tabung yang beredar di pasaran terbuat dari plat baja dengan harga yang mahal dan kapasitas lebih sedikit. Berdasarkan masalah di atas, untuk membantu pemerintah dalam mendiversifikasi energi bahan bakar minyak tanah ke energi biogas terutama untuk memasak di dapur, maka perlu dirancang alat biogas skala kecil (rumah tangga) yang efisien, praktis, ramah lingkungan dan aman untuk meningkatkan nilai tambah (*Value Added*) dari Limbah (kotoran) ternak tersebut. Biogas adalah gas produk akhir pencernaan atau degradasi anaerobik bahan-bahan organik oleh bakteri. Bakteri anaerobik dalam lingkungan bebas oksigen atau udara (Tatang, 2006). Komponen terbesar (penyusun utama) biogas adalah metana ( $\text{CH}_4$ , 54 – 80 % vol) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ , 20 – 45% vol). Pada literatur lain komposisi biogas secara umum ditampilkan dalam tabel berikut (Juanga, 2005) :

Komponen dalam biogas	Kadar komponen (%)
Metana	50-60
Karbondioksida	34-48
Hidrogen	2
Hidrogen sulfida	Tapak
Karbon	Tapak
Holokarbon	Tapak
<i>Non-methane volatile organic</i>	Tapak



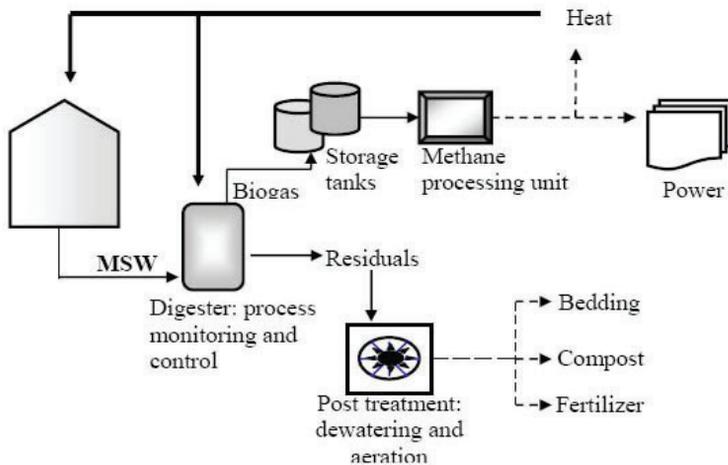
Aziz (1991), Kosaric dan Velikonja (1995)

Gambar 9.1 Penggunaan gas metana untuk berbagai aplikasi

Biogas dapat digunakan dalam berbagai keperluan, seperti memasak, penerangan, pompa air, boiler dan sebagainya. Pada Gambar 9.1 ditunjukkan penggunaan gas metana untuk berbagai aplikasi.

## 9.2 PRINSIP KERJA SISTEM

Proses produksi biogas, terjadi dalam dua tahap persiapan bahan baku dan proses penguraian anaerobik oleh mikroorganisme untuk menghasilkan gas metana, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.2.



Gambar 9.2 Proses produksi biogas

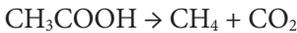
Proses penguraian oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan-bahan organik terjadi secara anaerob. Pada prinsipnya proses anaerob adalah proses biologi yang berlangsung pada kondisi tanpa oksigen oleh mikroorganisme tertentu yang mampu mengubah senyawa organik menjadi metana (biogas). Proses ini banyak dikembangkan untuk mengolah kotoran hewan dan manusia atau air limbah yang kandungan bahan organiknya tinggi. Sisa pengolahan bahan organik dalam bentuk padat digunakan untuk kompos. Berikut ini adalah proses pengolahan bahan organik menjadi biogas dengan proses anaerobik.

Secara umum, proses anaerob terdiri dari empat tahap yakni: hidrolisis, pembentukan asam, pembentukan asetat dan pembentukan metana. Proses anaerob dikendalikan oleh dua golongan

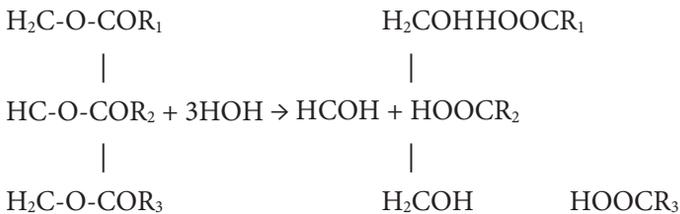
mikroorganisme (hidrolitik dan metanogen). Bakteri hidrolitik terdapat dalam jumlah yang besar dalam kotoran unggas karena reproduksinya sangat cepat. Organisme ini memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa sederhana diuraikan oleh bakteri penghasil asam (acid-forming bacteria) menjadi asam lemak dengan berat molekul rendah seperti asam asetat dan asam butirat. Selanjutnya bakteri metanogenik mengubah asam-asam tersebut menjadi metana.

Rangkaian reaksi enzimatik berbagai senyawa organik misalnya pengurai karbohidrat, lemak, protein dapat dilihat berdasarkan reaksi berikut [Nemerow, 1978].

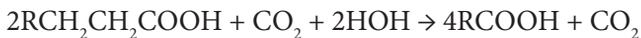
Penguraian karbohidrat:



Penguraian lemak :



Alfa oksidasi asam :



Proses pembentukan biogas dibagi dalam 4 tahap sebagai berikut :

### 1. Tahap Hidrolisis

Tahap pertama dari penguraian anaerobik adalah hidrolisis yaitu depolimerisasi atau pelarutan makromolekul substrat menjadi molekul yang lebih sederhana. Reaksi hidrolisis dilakukan oleh enzim ekstraselular yaitu enzim hidrolase. Pada proses ini enzim hidrolase dapat menguraikan karbohidrat, protein, dan lemak menjadi senyawa-senyawa sederhana seperti monomer gula, asam amino, dan asam

lemak rantai panjang. Bakteri yang berperan dalam proses hidrolisis diantaranya *Clostridium aciduric* dan *Clostridium cylindrosporum*.

Pada proses hidrolisis, terjadi perubahan senyawa organik tidak terlarut menjadi senyawa organik terlarut. Mikroorganisme yang berperan dalam proses hidrolisis merupakan senyawa yang paling dominan selama proses anaerobik :

Terdapat tiga jenis utama bakteri hidrolisis yaitu :

- a. Proteolitik, bakteri penghasil enzim protease yang berperan dalam mengubah protein dan peptida menjadi amonia dan asam amino.
- b. Lipolitik atau bakteri penghasil enzim lipase yang mengubah lemak menjadi asam lemak dan gliserol.
- c. Selulolitik, bakteri penghasil enzim hidrolisis yang mengubah polisakarida menjadi monosakarida.

Untuk substrat padat, hidrolisis merupakan tahap reaksi paling lambat sehingga merupakan tahap penentu dari reaksi anaerob.

## 2. Tahap pembentukan asam

Tahap pembentukan asam (acidogenesis) adalah proses pengubahan senyawa organik sederhana dari hasil hidrolisis dan fermentasi menjadi asam. Hasil hidrolisis dimanfaatkan oleh bakteri pembentuk asam menjadi asam-asam organik. Bakteri jenis ini tumbuh cepat (waktu regenerasi 30 menit) pada temperatur 35°C. Asam asetat sebagai produk utama yang diubah dari glukosa menghasilkan energi terbesar bagi bakteri pembentuk asam untuk pertumbuhannya. Contoh bakteri pembentuk asam adalah *Clostridium propionicum*, *Clostridium histolyticum*, *Clostridium acetobutylicum*, dan *Clostridium butylicum* (Grady dan Henry, 1980). Berikut ini adalah reaksi hidrolisis penguraian asam.

asam asetat



Asam Butirat



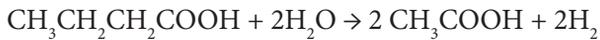
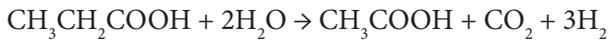
Asam propionat



Bakteri pembentuk asam mengubah senyawa organik sederhana menjadi asam organik seperti asam asetat, asam propionat, asam butirat dan senyawa lain (hidrogen, karbondioksida dan air).

3. Tahap pembentukan asetat

Pengubahan asam propionat dan asam butirat menjadi asam asetat dilakukan oleh bakteri asetogenik dengan reaksi sebagai berikut :

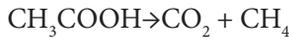


Proses konversi ini dibantu oleh *Obligate Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria* (OHPA).

4. Tahap pembentukan metana

Metana dibentuk dari dua jalur yaitu jalur asam asetat, jalur  $CO_2$  dan  $H_2$ . Bakteri yang terlibat adalah bakteri asetoklastik (*acetoclastic methane bacteria*) yang bersimbiosis dengan bakteri pembentuk asam, dengan cara mengubah asam asetat sehingga pH sistem dapat dikontrol. Bakteri pengonsumsi hidrogen (*hydrogen utilizing bacteria*) membentuk metana dari  $CO_2$  dan  $H_2$ .

Tahap akhir adalah pengubahan asam asetat menjadi metana dan karbondioksida, yang dilakukan oleh bakteri pembentuk metana (*acetoclastic methane bacteria*) dengan persamaan reaksi berikut (Grady dan Henry, 1980) :



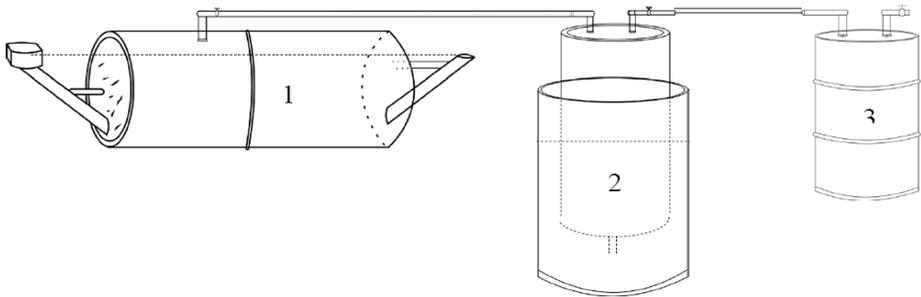
Hydrogen:	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Acetate:	$\text{CH}_3\text{COOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Formate:	$4\text{HCOOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Methanol:	$4\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Carbon monoxide:	$4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{CO}_3$
Trimethylamine:	$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$
Dimethylamine:	$2(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$
Monomethylamine:	$4(\text{CH}_3)\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$
Methyl mercaptans:	$2(\text{CH}_3)_2\text{S} + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$
Metals:	$4\text{Me}^\circ + 8\text{H}^+ + \text{CO}_2 \longrightarrow 4\text{Me}^\circ + \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

### 9.3 PROTOTYPE PERALATAN PRODUKSI BIOGAS

Alat yang digunakan pada pembuatan alat biogas adalah seperangkat alat bengkel seperti mesin las listrik, mesin gerindra, gergaji besi, palu, thermometer, meteran, anemometer. Dan bahan yang digunakan adalah:

1. Drum ukuran 200 liter sebanyak 3 buah
2. Drum ukuran 120 liter sebanyak 1 buah
3. Drum ukuran 35 liter sebanyak 2 buah
4. Pipa ukuran 05 in sebanyak 2 batang
5. Pipa ukuran 2 in sebanyak 120 cm
6. Kompor gas sebanyak 1 buah
7. Selang karet sebanyak 1 buah
8. Plat besi 3 mm 50x30 sebanyak 1 buah
9. Panci ukuran 6 liter air

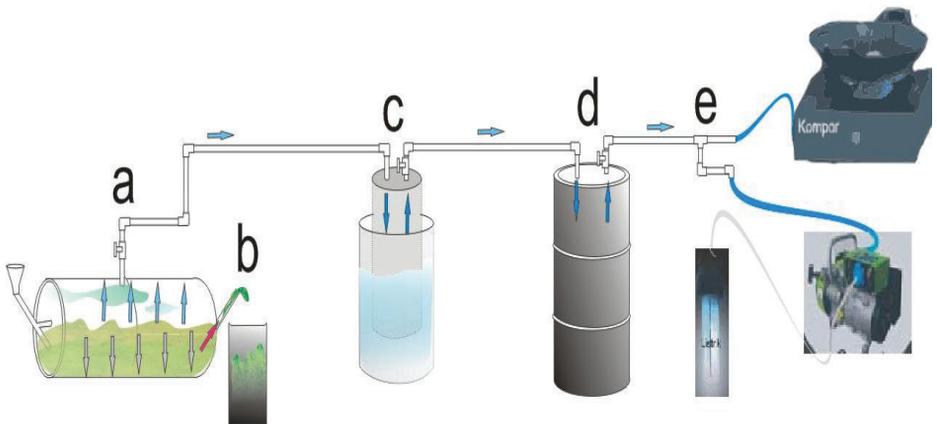
Dibawah ini adalah contoh bangun rancang alat:



Keterangan gambar: (1) tabung pencerna, (2) tabung penyekat, (3) tabung gas sementara dan (4) tabung gas murni.

Gambar 9.3. Prototype peralatan produksi biogas

Cara kerja produksi biogas dapat dijelaskan dengan skema seperti ditunjukkan pada Gambar 9.4.



Gambar 9.4. Cara kerja produksi biogas.

#### KETERANGAN GAMBAR

- A. Tabung gas pencerna. Pada bagian ini terjadi proses digester, yaitu proses monitor dan kontrol. Pertama, kotoran sapi dimasukan dalam tabung A kemudian dilakukan penyesuaian mikroorganisme terdiri dari dua golongan yaitu *hidrolitik* dan *metanogen*. Bakteri hidrolitik memecah senyawa organik kompleks menjadi lebih sederhana → senyawa sederhana diuraikan oleh

bakteri penghasil asam (acid-forming bacteria) menjadi asam lemak dengan berat molekul rendah seperti asam asetat dan asam butirat. Selanjutnya bakteri metanogenik mengubah asam-asam tersebut menjadi metana (dihasilkan biogas). Pada proses ini pun perlu diperhatikan beberapa hal yang dapat mempercepat produksi gas metana yaitu:

- a. Suhu : Gabungan bakteri anaerob bekerja dibawah tiga kelompok temperatur utama. Temperatur kriofilik yakni kurang dari 20°C, mesofilik berlangsung pada temperatur 20- 45°C (optimum pada 30-45) dan termofilik terjadi pada temperatur 40-80°C (optimum pada 55-75°C). Kondisi optimum merupakan kondisi dimana laju pertumbuhan mencapai maksimum sehingga laju penguraian senyawa organik juga akan mencapai maksimum.
- b. pH : pH optimum untuk memproduksi metana adalah rentang netral yaitu 6,2 sampai 7,6. Jika pH tidak sesuai, bakteri akan mati selanjutnya akan menghambat produksi gas.
- c. Mikroorganisme membutuhkan beberapa vitamin esensial dan asam amino. Zat tersebut dapat disuplai ke media kultur dengan memberikan nutrisi tertentu untuk pertumbuhan dan metabolismenya. Berdasarkan nilai COD, perbandingan COD : N : P adalah 400 : 7 : 1 dan 1000 : 7 : 1 dikatakan sebagai kebutuhan untuk substrat tinggi dan rendah. Selain itu juga dibutuhkan mikronutrien untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme, misalnya besi, magnesium, kalsium, natrium, barium, selenium, kobalt dan lain-lain (Malina,1992).
- d. Salinitas (kandungan garam) NaCl 0.2 M dilaporkan memiliki pengaruh minimal terhadap populasi metanogenik, namun salinitas yang besar dapat bersifat inhibitor.

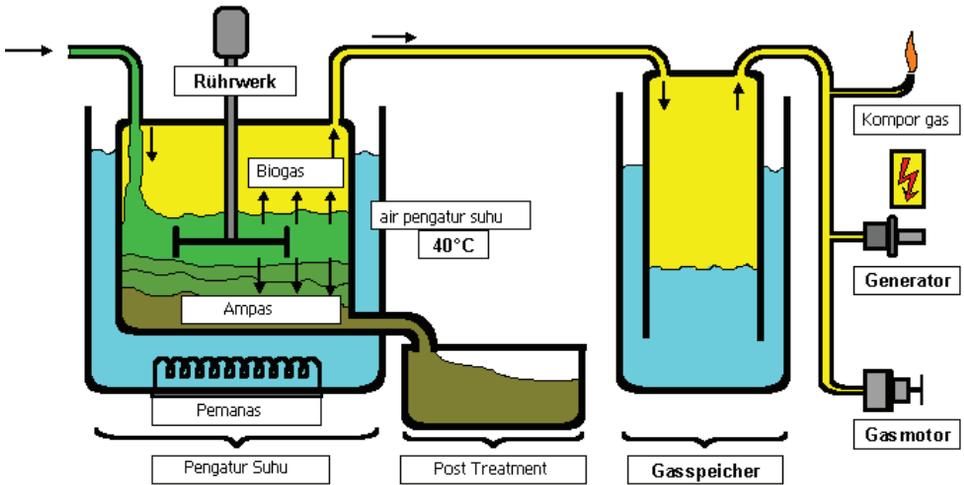
Kation	Konsentrasi dalam mg/l		
	Stimulatory	Moderately inhibitor	Strongly inhibitor
Natrium (Na)	100-200	3500-5500	8000
Kalium (K)	200-400	2500-4500	12000
Kalsium (Ca)	100-200	2500-4500	8000
Magnesium (Mg)	75-150	1000-1500	3000

- e. Keracunan dan hambatan: disebabkan asam lemak mudah menguap (*volatile*) yang dapat mempengaruhi pH. Pertumbuhan

mikroba metanogenik terbatas jika jumlah asam lemaknya berlebihan. Amonia, hidrogen sulfida dan asam lemak volatil berasal dari reduksi sulfat dan nitrat oleh bakteri yang juga dapat membentuk asam lemah dan basa lemah pada sistem penyangga (*buffer*). Zat-zat penghambat lain terhadap aktivitas mikroorganisme pada proses anaerob diantaranya kandungan logam berat sianida.

- f. Konsentrasi ideal padatan untuk memproduksi biogas adalah 7-9% kandungan kering. Kondisi ini dapat membuat proses digester anaerob berjalan dengan baik.
- B. Pada tabung B, adalah sisa dari proses dalam tabung A. terjadi penanganan akhir (*post treatment*)→pengairan dan pengisian udara yang kemudian akan dihasilkan kompos dan pupuk.
- C. Tabung penyekat sekaligus sebagai pengatur tekanan \*(pen
- D. Storage device, C dan D adalah unit pemproses methan.
- E. Hasil proses bisa di salurkan untuk kebutuhan, seperti kompor gas dan listrik.

Proses pembuatan biogas



Gambar 9.5. Proses produksi biogas.

Biogas berasal dari hasil fermentasi bahan-bahan organik diantaranya :

- a. Limbah tanaman : tebu, rumput, jagung, gandum, dan lain-lain.
- b. Limbah dan hasil produksi : minyak, bagas, penggilingan padi, limbah sagu,
- c. Hasil samping industri: tembakau, limbah pengolahan buah-buahan dan sayuran, dedak, kain dari tekstil, ampas tebu dari industri gula dan tapioka, industri tahu,
- d. Limbah perairan : alga laut, tumbuh-tumbuhan air,
- e. Limbah peternakan : kotoran sapi, kotoran kerbau, kotoran kambing, kotoran unggas.

Salah satu permasalahan yang dihadapi dalam fermentasi anaerob adalah keberadaan senyawa-senyawa tertentu yang bertindak sebagai inhibitor. Oleh karena itu perlu dtambahkan sesuatu pada bahan supaya menghilangkan pengaruh inhibitor.

Rasio ideal C/N untuk proses dekomposisi anaerob untuk

menghasilkan metana adalah 30. Oleh karena itu, pada proses pencampuran bahan baku diusahakan memenuhi rasio ideal. C/N rasio dari beberapa bahan organik dapat dilihat dari tabel berikut ini.

Tabel, Rasio C/N untuk berbagai bahan organik

Bahan organik	Perbandingan C/N	Total N pada keadaan kering (%)
Kotoran hewan		
Ayam	15	6,3
Kuda	25	2,8
Sapi	18	1,7
Lumpur aktif	6	5
Rumput kering	12	4
Rumput kering alfafa	17	2,8
Jerami	150	0,5
Serbuk gergaji	200-500	0,1

Perolehan biogas berbagai jenis bahan baku menunjukkan hasil yang berbeda-beda. Berikut ini adalah tabel perolehan biogas untuk berbagai bahan baku.

Tabel, perolehan biogas untuk berbagai bahan baku

Bahan mentah	Perolehan, Liter/(Kg POK)	Perolehan rata-rata, Liter/(Kg POK)
Kotoran babi	340 – 550	445
Kotoran sapi	90 – 310	200
Kotoran kuda	200 – 300	250
Kotoran domba	90 – 310	200
Kotoran unggas	310 – 620	465
Bagas	165	165
Batang + daun jagung	380 – 460	420
Jerami padi	170 – 280	225
Sekam padi	105	105
Rumput	280 – 550	419
Rumput gajah	430 – 560	495
Enceng gondok	375	375

Berikut adalah laju pembangkitan kotoran untuk berbagai bahan baku

Hewan	Kg-kering/ekor/hari
Sapi perah	7,68
Sapi pedaging	3,06
Babi	0,56
Kambing dan domba	0,76
Kuda	6,75
Ayam petelur	0,025
Ayam pedaging	0,040
Bebek	0,043
Kalkun	0,101

Penggunaan limbah sebagai bahanbaku gas memerlukan metode pengumpulan, penyiapan, penanganan, dan penyimpanan yang memadai. Pemilihan metode didasarkan pada sifat dan jumlah bahan baku yang bervariasi. Sifat alami bahan baku adalah padatan, semi padatan, atau cairan. Sejalan dengan itu, sistem penangananny harus sesuai dengan kondisi setempat. Untuk wilayah pedesaan, degetrasi dilakukan ditempat, karena lebih praktis dan biaya lebih murah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Dara, S.S., 1986, *A Textbook of Engineering Chemistry*, S. Chand & Co. Ltd., New Delhi.
- Ditjen PPHP-DEPTAN, 2006, Biogas Skala Rumah Tangga melalui Program Bio Energi Perdesaan (BEP), Jakarta.
- Fairlie, M.J., Scott, P.B., "Filling Up With Hydrogen 2000", Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Annual Technical Review, 9-11 Mei 2000, Livermore, California.
- Garcelon, J., Clark, J., Waste Digester Design, Civil Engineering Laboratory Agenda, University of Florida. [http://www. ce. ufl. edu/activities/waste/wddndx.html](http://www.ce.ufl.edu/activities/waste/wddndx.html).
- Haryono, T., "Hidrogen Sebagai Penyimpan Energi Listrik yang Fleksibel", Media Elektro, Vol.10, No.1, Juli 2000, Yogyakarta.
- Intergovernmental Authority on Development (IGAD), Biogas Digester, [http://igadrhep. energyprojects. net/Links/Profiles/Biogas/Biogas](http://igadrhep.energyprojects.net/Links/Profiles/Biogas/Biogas).
- Malik, N.H., *Electrical Insulation in Power Systems*.
- Miller, E., Rocheleau, R., "Photoelectrochemical Hydrogen Production", Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Annual Technical Review, 9-11 Mei 2000, Livermore, California.
- Rahman, B, 2005. "Biogas sumber energi alternative". Kompas 8 Agustus. <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRCULT/AGA/FRG/Recycle/biodig/manual.htm>
- Reven, RPJM, gregersen, KH., 2005, Biogas Plant in Denmark: Successes and Setbacks, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Article in Press. <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRCULT/AGA/FRG/Recycle/biodig/manual.htm>
- Setiawan, Ade Iwan, 1996, "Memanfaatkan Kotoran Ternak". Penebar Swadaya. Jakarta.
- Syahputra, R., 2002, "Hidrogen: State of the Art dalam Teknologi Penyimpanan Energi Listrik", Elektro Indonesia, Jakarta.

- Syahputra, R., Soesanti, I, 2019. Performance improvement for small-scale wind turbine system based on maximum power point tracking. *Energies*. Vol, 12. 2019.
- Syahputra, R., Soesanti, I, 2020. Planning of hybrid micro-hydro and solar photovoltaic systems for rural areas of central Java, Indonesia. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 2020.
- Weimnanll, O., “Power Engineering Journal”, Vol.13, Number 3, June 1999, EE, Savoy Place, London.
- Wikipedia, 2005.[http://en. Wikipedia, org/wiki/Anaerobic\\_digester](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digester).  
[http://en. wikipedia. org/wiki/Anaerobic\\_digester](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digester)

## BIODATA PENULIS



Nama Lengkap	Dr. Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.
Jabatan Fungsional	Lektor Kepala
Tempat dan Tanggal Lahir	Galang, Deli Serdang, Sumatera Utara, 10 Oktober 1974
Agama	Islam
Pekerjaan	Staf Pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (2010 – sekarang)
Pendidikan	S1: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Medan, Medan, 1993-1998 S2: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, 1999-2002 S3: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011-2015
Alamat Rumah	Perum Popongan No. AA1, Jl. Magelang Km 5 Sinduadi, Mlati, Sleman, DI Yogyakarta 55284
Nomor HP	081215526565
Alamat Kantor	Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55183
Nomor Telepon/ Faks	0274-387656/ 0274-387646
Alamat e-mail	<a href="mailto:ramadoni@umy.ac.id">ramadoni@umy.ac.id</a>

