

The background of the entire page is a photograph of an industrial facility, likely a power plant or refinery. It features a complex network of large, silver-colored metal pipes, some of which are wrapped in reflective insulation. The pipes are connected by various fittings and valves, some of which are painted red. The scene is brightly lit, possibly from natural light coming through windows or skylights, creating a high-contrast environment. The overall impression is one of a large-scale, technical industrial operation.

**Sentuhan**  
**TEKNIK**  
**NUKLIR**  
**dalam Aktivitas**  
**Industri**

**Mukhlis Akhadi**

**Sentuhan TEKNIK NUKLIR  
dalam Aktivitas Industri**

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

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).

Mukhlis Akhadi

Sentuhan **TEKNIK NUKLIR**  
dalam **Aktivitas Industri**

 deepublish

glorify and develop the intellectual of human's life

# SENTUHAN TEKNIK NUKLIR DALAM AKTIVITAS INDUSTRI

**Mukhlis Akhadi**

Copyeditor :  
**Nia Kurniawati**

Desain Cover :  
**Herlambang Rahmadhani**

Sumber :  
Penulis

Tata Letak :  
**Usy Izzani Faizi**

Proofreader :  
**Yudi Mahatma**

Ukuran :  
**x, 172 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :  
**978-623-209-820-6**

Cetakan Pertama :  
**Juli 2019**

Hak Cipta 2019, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2019 by Deepublish Publisher**  
All Rights Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

# KATA PENGANTAR

Perkembangan ilmu pengetahuan telah memengaruhi banyak sektor kehidupan, antara lain peningkatan kualitas pelayanan kesehatan serta perbaikan kualitas pangan dan gizi. Perbaikan di kedua sektor itu ternyata berdampak positif terhadap usia harapan hidup rata-rata penduduk dunia. Memasuki abad 21, usia harapan hidup rata-rata penduduk adalah 65 tahun, naik 20 tahun dibanding era 1950-an. Sedang pada tahun 2050 nanti, diperkirakan usia harapan hidup rata-rata naik menjadi 76 tahun. Memasuki awal abad ke-21, planet bumi dihuni oleh lebih dari tujuh miliar manusia. Setiap usia bumi bertambah satu hari, ada sekitar 219 ribu penghuni baru yang dilahirkan dan menambah jumlah populasi dunia.

Pertumbuhan penduduk dunia yang berlangsung sangat cepat menyiratkan berbagai kekhawatiran terutama jika dikaitkan dengan daya dukung bumi yang sangat terbatas. Daya dukung planet bumi dalam menyediakan bahan pangan terhadap penduduknya akan sangat terbatas apabila dalam proses produksi pangan tidak melibatkan industri modern. Para ahli memperkirakan, apabila proses bercocok tanam dilakukan secara primitif, maka planet bumi ini hanya mampu menyediakan bahan pangan untuk 20 juta penduduknya. Jika saat ini penduduk bumi diperkirakan mencapai sekitar 7 milyar, dan ternyata bumi masih sanggup menyediakan bahan pangan untuk seluruh penduduknya, berarti sentuhan industri modern dalam bidang pertanian telah meningkatkan daya dukung alam hingga mencapai ratusan kali lebih tinggi dibandingkan apabila dalam proses produksi pangan tidak melibatkan aktivitas industri samasekali.

Industri pupuk, industri pestisida, serta industri-industri terkait bidang pertanian lainnya memiliki andil yang sangat besar dalam

meningkatkan jumlah produksi pangan. Namun kebutuhan hidup manusia tentu bukan sebatas makanan. Diperlukan suplai barang-barang kebutuhan hidup manusia yang semakin banyak dengan tuntutan waktu penyediaan yang semakin cepat. Permasalahan itu akhirnya dicoba diatasi dengan industrialisasi yang merambah dalam hampir semua sektor kehidupan. Perkembangan hubungan internasional antar berbagai peradaban dunia telah mempercepat proses industrialisasi di berbagai kawasan.

Industrialisasi memegang peran yang strategis dalam kehidupan masyarakat modern. Selain mampu mempercepat proses suplai barang kebutuhan hidup manusia, industrialisasi juga dapat membuka lapangan pekerjaan baru bagi penduduk bumi yang jumlahnya terus meningkat. Tuntutan industrialisasi dan globalisasi telah melanda semua negara di berbagai belahan bumi. Industri modern mampu menyediakan berbagai barang kebutuhan manusia dalam jumlah besar dalam waktu singkat. Berbagai produk industri hadir di tengah masyarakat sambil menawarkan berbagai kemudahan dan kenikmatan. Produk-produk itu hadir untuk mengatasi permasalahan dalam bidang perumahan, komunikasi, energi listrik, transportasi, pelayanan publik dan sebagainya.

Teknik nuklir merupakan salah satu teknik yang banyak diterapkan dalam berbagai jenis kegiatan industri. Kehadiran teknik nuklir dalam menunjang aktivitas industri itu telah menghasilkan produk nyata dan dirasakan manfaatnya dalam kehidupan modern ini. Begitu banyak produk teknologi modern yang ditemukan dan dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari ternyata dihasilkan melalui sentuhan teknik nuklir dalam proses produksinya. Teknik nuklir ternyata begitu dekat dengan kehidupan manusia.

Buku ini mengupas aplikasi teknik nuklir dalam berbagai jenis kegiatan industri. Penulis berharap, semoga kehadiran buku ini dapat memberikan gambaran mengenai peran maupun sentuhan teknik nuklir dalam industri semikonduktor, kimia, pangan dan desalinasi air laut. Dikupas pula aplikasinya untuk inspeksi teknik dan penjinakan polutan yang keluar dari industri energi. Namun demikian, penulis

menyadari sepenuhnya jika penulisan buku ini masih menyisakan banyak kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dalam diri penulis. Oleh sebab itu, saran maupun masukan untuk penyempurnaan isi buku ini ditunggu dan akan diterima dengan tangan terbuka.

Tangerang Selatan, 01 Mei 2019

*Penulis*

# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Nuklir Mendukung Industri.....	2
1.2. Lingkup Bahasan .....	4
<b>2. INDUSTRI SEMIKONDUKTOR</b> .....	<b>9</b>
2.1. Perilaku Elektron .....	10
2.2. Bahan Semikonduktor.....	16
2.3. Pengembangan Transistor.....	21
2.4. Pencangkakan Semikonduktor .....	26
2.5. Revolusi Mikroelektronika.....	32
<b>3. INDUSTRI POLIMER</b> .....	<b>35</b>
3.1. Bahan Polimer .....	36
3.2. Polimerisasi Radiasi .....	40
3.3. Isolasi Kabel.....	43
3.4. Bahan Bangunan.....	48
3.5. Vulkanisasi Radiasi .....	53
<b>4. INDUSTRI PANGAN</b> .....	<b>59</b>
4.1. Kegiatan Pascapanen .....	61
4.2. Kerusakan Komoditas.....	63
4.3. Sterilisasi Bahan Pangan.....	70
4.4. Menghambat Pertunasan dan Pematangan.....	75
4.5. Pengawetan Bahan Pangan.....	78

<b>5. INDUSTRI DESALINASI .....</b>	<b>84</b>
5.1. Air untuk Kehidupan.....	85
5.2. Krisis Air Bersih.....	90
5.3. Desalinasi Air Laut .....	96
5.4. Kogenerasi Panas Nuklir .....	98
<b>6. INSPEKSI TEKNIS INDUSTRI .....</b>	<b>102</b>
6.1. Masalah Korosi .....	104
6.2. Kecelakaan Industri.....	109
6.3. Uji Tak Merusak .....	113
6.4. Aktivasi Lapisan Tipis.....	120
6.5. Perunut dalam Industri .....	126
<b>7. MENJINAKKAN POLUTAN .....</b>	<b>129</b>
7.1. Dominasi Peran Batubara.....	130
7.2. Fenomena Hujan Asam .....	135
7.3. Mesin Berkas Elektron.....	141
7.4. Uji Coba di Lapangan.....	145
<b>8. PENUTUP.....</b>	<b>150</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>158</b>
<b>INDEKS .....</b>	<b>167</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>171</b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. : Pita energi elektron suatu atom .....	13
Gambar 2.2. : Celah energi pita pada bahan konduktor, isolator dan semikonduktor .....	15
Gambar 2.3. : Semikonduktor tipe-p.....	19
Gambar 2.4. : Semikonduktor tipe-n.....	20
Gambar 3.1. : Proses terjadinya ikatan silang pada polimer .....	41
Gambar 6.1. : Prinsip pengujian bahan dengan teknik radiografi.....	117
Gambar 7.1. : Perjalanan gas-gas asam lepasan cerobong PLTU di lingkungan.....	137
Gambar 7.2. : Prinsip kerja teknologi MBE untuk membersihkan gas buang PLTU.....	143
Gambar 7.3. : Fasilitas pembersih gas buang PLTU dengan MBE .....	147



Dua buah bom nuklir dijatuhkan oleh Amerika Serikat dan meledak masing-masing *Little Boy* di kota Hiroshima pada tanggal 6 Agustus 1945 dan *Fat Man* di Nagasaki pada tanggal 9 Agustus 1945. Ratusan ribu nyawa manusia tak berdosa melayang sia-sia [1]. Tragedi Hiroshima-Nagasaki merupakan catatan sejarah pahit umat manusia berkaitan dengan kehadiran teknologi nuklir. Dapat dikatakan bahwa perkembangan teknologi nuklir memiliki cacat bawaan karena dipakainya teknologi tersebut untuk perang. Dan inilah tragedi kemanusiaan yang paling menakutkan berkaitan dengan kelahiran teknologi nuklir.

Uji coba senjata nuklir yang berlangsung secara intensif antara periode 1946-1980 telah menimbulkan kekhawatiran internasional akan terulangnya perang nuklir [2]. Bayang-bayang ancaman senjata nuklir masih terus menghantui penduduk dunia pasca Perang Dunia II. Dalam prakteknya, perlombaan pembuatan senjata nuklir terus berlangsung di antara *The Nuclear Club* selama perang dingin, yaitu perang ideologi dua kekuatan dunia yang diwakili oleh Blok Barat yang kapitalis di bawah pimpinan Amerika Serikat dan Blok Timur yang sosialis-komunis dibawah pimpinan Rusia. Persaingan dua ideologi dunia itulah yang mendorong pengembangan dan produksi senjata nuklir dengan daya rusak jauh semakin hebat dibandingkan

dengan bom nuklir yang digunakan dalam Perang Dunia II. Perundingan perlucutan senjata nuklir yang digalang oleh Amerika Serikat dan Rusia sedikitpun tak mengurangi minat negara-negara tertentu untuk memiliki senjata nuklir sendiri.

Dibanding dengan teknologi lain, teknologi nuklir merupakan teknologi yang oleh sebagian besar masyarakat awam dirasa paling jarang atau bahkan tidak pernah sama sekali bersentuhan dengan masalah-masalah kehidupan manusia sehari-hari. Masyarakat awam lebih banyak mengenali risiko atau bahaya dibandingkan dengan pengenalan mereka terhadap manfaat yang dapat diperoleh dari teknologi nuklir. Hasilnya adalah deretan panjang pengertian dan asumsi negatif yang diidentikkan dengan nuklir. Kurangnya informasi yang menyeluruh mengenai nuklir, ditambah cacat bawaan dalam perkembangan teknologi nuklir itu sendiri, telah mengakibatkan dalam benak sebagian besar masyarakat awam terpatери istilah nuklir yang identik dengan bom atau bahaya radiasi.

Faktanya, dalam waktu yang hampir bersamaan dengan berlangsungnya perlombaan pengembangan senjata nuklir, teknologi nuklir juga dikampanyekan oleh Badan Tenaga Atom International (IAEA, *International Atomic Energy Agency*) untuk maksud-maksud damai [3]. Jadi kehadiran teknologi nuklir di tengah masyarakat bukan semata-mata untuk pembuatan bom nuklir. Dikaitkan dengan pemanfaatan untuk maksud-maksud damai ini, gambaran masyarakat awam yang mengidentikkan nuklir dengan senjata pemusnah menjadi tidak tepat. Ada beberapa manfaat yang dapat dinikmati oleh umat manusia di muka bumi ini jika teknologi nuklir dimanfaatkan secara benar. Karena itu, kesalahan persepsi terhadap nuklir ini perlu diluruskan dengan memberikan informasi yang menyeluruh mengenai keuntungan yang dapat diperoleh umat manusia berkaitan dengan pemanfaatan teknologi nuklir dalam kehidupan sehari-hari.

### **1.1. NUKLIR Mendukung Industri**

Tuntutan industrialisasi dan globalisasi telah melanda semua negara di berbagai belahan bumi. Karena tuntutan itu, pembangunan

semakin kompleks, bahkan dalam mengungkap kasus kejahatan, studi arkeologi dan pemalsuan seni lukis karya maestro dunia, dapat ditemukan sentuhan teknologi nuklir di dalamnya. Aplikasi teknik nuklir dalam aktivitas kehidupan umat manusia sehari-hari ternyata dapat memberikan nilai tambah terhadap produk-produk yang dihasilkan oleh kegiatan industri. Tanpa disadari sebetulnya banyak produk-produk industri yang dipakai dalam kehidupan sehari-hari mengandung komponen yang proses pembuatannya melibatkan teknologi iradiasi. Buku ini mengulas banyak informasi tentang pemanfaatan teknik nuklir dalam berbagai jenis aktivitas industri.

## **1.2. LINGKUP BAHASAN**

Berbagai produk industri yang monumental dari perkembangan teknologi elektronika hadir di sekeliling kita. Teknologi mikroelektronika bukan sekedar menghadirkan produk modern, namun juga menampilkan produk itu dalam bentuk dan ukuran yang makin lama makin kecil dengan kemampuan kerja yang lebih tinggi. Dapat kita sebut disini sebagai contoh adalah kehadiran komputer, kamera digital dan telepon seluler (ponsel). Kita menyaksikan produk-produk elektronik yang proses miniaturisasinya seakan tak pernah berhenti, baik dalam aspek disain produknya maupun dalam aspek teknologi mikroelektronikanya. Pembahasan mengenai aplikasi teknik nuklir dalam mendukung perkembangan industri mikroelektronika ini dapat ditemukan pada bab 2.

Pembahasan dalam bab 2 diawali dengan memperkenalkan perilaku elektron dalam berbagai jenis bahan, dengan fokus bahasannya adalah bahan semikonduktor. Penelitian dalam bidang semikonduktor inilah yang mengantarkan para ilmuwan berhasil mengembangkan komponen elektronik yang disebut transistor. Komponen ini menjadi penopang utama kemajuan dalam inovasi teknologi berbasis mikroelektronika. Penelitian demi penelitian terus dilakukan hingga akhirnya para ilmuwan berhasil melakukan pencangkakan bahan semikonduktor untuk menghasilkan transistor yang unjuk kerjanya semakin baik. Pada bagian ini dibahas teknologi

iradiasi dengan berkas neutron untuk memproduksi bahan semikonduktor tingkat kemurnian sangat tinggi. Pembahasan dilanjutkan dan dakhiri dengan uraian mengenai peran teknik nuklir dalam menopang kelahiran teknologi mikroelektronika. Prestasi paling nyata dari kelahiran teknologi ini adalah terjadinya miniaturisasi terhadap produk-produk elektronik modern.

Teknik nuklir juga dimanfaatkan dalam industri kimia. Pemanfaatannya yang cukup besar dan penting adalah dalam proses kimia suatu industri. Karena membawa energi yang cukup tinggi, radiasi dapat bertindak sebagai katalis untuk merangsang terjadinya perubahan kimia suatu bahan, salah satunya adalah untuk merubah bahan kimia sejenis cairan dari senyawa organik dalam golongan monomer menjadi polimer. Pembahasan mengenai polimerisasi dengan radiasi ini dapat ditemukan pada bab 3. Bahasan dalam bab ini diawali dengan uraian mengenai pengetahuan dasar kemampuan radiasi yang dapat menyebabkan rantai molekul panjang pada polimer bergandengan pada tempat-tempat tertentu yang prosesnya dikenal sebagai pengikatan silang (*crosslinking*).

Pembahasan utama dalam bab 3 adalah mengenai teknologi polimerisasi radiasi untuk memproduksi polimer bermutu tinggi dengan sifatnya yang sangat kuat serta tahan terhadap panas. Pemanfaatan polimer hasil iradiasi bermutu tinggi yang paling banyak adalah untuk pembuatan bahan isolasi kabel listrik. Dalam bab 3 diuraikan pula pemanfaatan teknologi polimerisasi untuk meningkatkan kualitas bahan-bahan bangunan, serta teknologi vulkanisasi karet alam untuk memproduksi ban mobil berkualitas tinggi.

Aplikasi lain teknik nuklir adalah dalam industri pangan. Ketahanan pangan merupakan persoalan global yang berkaitan erat dengan kelangsungan hidup manusia. Peningkatan jumlah penduduk dunia yang berlangsung begitu cepat akhirnya mendatangkan beberapa tantangan terhadap kelangsungan hidup umat manusia, salah satunya adalah masalah penyediaan pangan dalam jumlah besar. Pembahasan mengenai aplikasi teknik nuklir dalam industri pangan

peningkatan penggunaan bahan bakar fosil adalah dilepaskannya gas-gas polutan yang dapat tersebar langsung ke udara dan memicu terjadinya hujan asam. Berbagai dampak negatif dari hujan asam dapat muncul dan mengancam kelestarian lingkungan hidup maupun kesehatan penduduk bumi.

Bahasan utama dalam bab 7 adalah pemanfaatan radiasi berkas elektron untuk menjinakkan gas-gas buang yang terlepas dari pembakaran batubara. Radiasi dalam bentuk berkas elektron ternyata dapat dimanfaatkan untuk menjinakkan polutan gas-gas asam yang keluar dari pembakaran bahan bakar fosil pada pembangkit thermal. Studi keteknikan maupun studi kelayakan untuk memanfaatkan teknik radiasi berkas elektron telah dilakukan dalam bentuk proyek percontohan melalui kerjasama antara beberapa lembaga penelitian. Teknologi ini ternyata juga dapat dipakai untuk menangani limbah cair, lumpur beracun serta jenis-jenis limbah berbahaya lainnya dari berbagai macam aktivitas industri.

Berbagai manfaat yang dapat diperoleh dari aplikasi teknik nuklir dalam berbagai bidang kegiatan industri disarikan dalam bab 8 sebagai penutup ulasan buku ini. Melalui ulasan komprehensif yang disajikan pada bab 2 hingga bab 7, pembaca diajak menyusuri jalan untuk melihat dan mengenali ragam aplikasi teknik nuklir yang begitu luas dalam relung-relung kehidupan masyarakat modern dewasa ini. Begitu banyak produk teknologi modern yang ditemukan dan dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari ternyata dihasilkan melalui sentuhan teknik nuklir dalam proses produksinya. Diperkenalkan juga peran teknik nuklir dalam menunjang keselamatan kegiatan industri dan menjaga kelestarian lingkungan. Teknik nuklir ternyata begitu dekat dengan kehidupan manusia. Selesai menelaah buku ini, pembaca diharapkan memiliki gambaran obyektif tentang manfaat teknik nuklir dalam memenuhi kebutuhan dan menunjang kehidupan manusia sehari-hari.

## 2 INDUSTRI SEMIKONDUKTOR



Sebagai konsekwensi atas beralihnya bidang kajian dalam fisika dari tataran makro yang mengamati benda-benda kasat mata ke pengamatan mikro seukuran atom, maka muncullah beberapa disiplin ilmu spesialis baru di bidang fisika [5]. Kajian baru dalam bidang kuantum mekanika atau kuantum fisika yang semula dirintis oleh Max Planck (1858-1947) dan Albert Einstein (1879-1955), dilanjutkan oleh ilmuwan lain seperti Niels Bohr (1885-1962), Edwin Schrodinger (1887-1961), Max Born (1882-1970), Samuel A. Goudsmit (1902-1978), Werner Heisenberg (1901-1976) dan lain-lain.

Sekitar tahun 1920-an, lahir kajian baru di beberapa pusat penelitian fisika di Heidelberg, Gottingen, dan Kopenhagen. Salah satu kajian itu melahirkan bidang studi fisika zat padat yang dirintis oleh Friedrich Seitz (1848-1918) dan fisika semikonduktor yang dirintis oleh John Bardeen (1908-1991) di Amerika Serikat, William B. Sockley (1910-1989) di Inggris serta Oleg Losev (1903-1942) di Rusia pada tahun 1940-an [5].

Semula para ilmuwan hanya mengenal adanya dua kelompok bahan terkait dengan perilaku elektron bebas dan sifat kelistrikan bahan, yaitu isolator dan konduktor. Isolator adalah bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik, sedang konduktor adalah bahan yang sangat baik dalam menghantarkan arus listrik. Kemajuan riset

dalam bidang fisika zat padat ternyata mengantarkan para fisikawan dapat meneliti dan mempelajari berbagai sifat kelistrikan zat padat. Dari penelitian ini akhirnya ditemukan bahan semikonduktor yang mempunyai sifat listrik antara konduktor dan isolator.

## **2.1. PERILAKU ELEKTRON**

Elektron dalam keadaan terikat oleh suatu inti atom memang sudah dikenal sejak akhir abad ke-18. Percobaan tentang sinar katoda yang dilakukan oleh Joseph J. Thomson (1856-1940) pada 1897 berhasil memisahkan partikel bermuatan listrik negatif dari ikatan inti atom [6]. Pemisahan yang dilakukan menggunakan medan listrik dan medan magnet itu kemudian mengubah pandangan ilmuwan tentang atom. Semula Thomson menyebut partikel temuannya itu dengan istilah zarah, dan kini partikel itu dikenal dengan nama elektron. Sebelum 1902, Thomson telah membuktikan bahwa elektron merupakan komponen dasar dan universal dari semua jenis materi. Sudah ribuan, bahkan mungkin jutaan, eksperimen fisika dan kimia yang hingga kini telah dilakukan. Meskipun begitu, belum ada satupun eksperimen yang memberikan sinyal bahwa elektron bisa dipecah menjadi partikel yang lebih kecil lagi. Elektron selama ini dianggap sebagai elemen penyusun atom yang tidak dapat dipecah-pecah lagi.

Ketika pertama kali ditemukan, Thomson dan para ilmuwan lain sezamannya tentu tidak membayangkan, kalau elektron itu di kelak kemudian hari bakal berperan sebagai komponen utama dalam proses-proses yang berkaitan dengan arus listrik dalam dunia elektronika. Kala itu, elektron dalam suatu atom memang sudah dipakai sebagai dasar untuk menerangkan kaidah-kaidah yang menjadi hukum dasar dalam reaksi kimia, yang notabene berdasarkan interaksi antar elektron dari atom-atom yang melakukan reaksi. Keberadaan elektron juga telah mengantarkan para ilmuwan ke arah pengenalan materi secara lebih sempurna. Tak lama setelah penemuan elektron, Ernest Rutherford (1871-1937) dan Niels Bohr (1885-1961) menyusun teori atom yang menggambarkan bahwa atom

Bahan-bahan yang pita konduksinya berisi elektron setengah bagian bersifat sebagai penghantar listrik yang baik. Sedang jika pita konduksinya kosong akan bersifat sebagai penahan listrik (isolator). Agar elektron dapat bergerak lincah, maka harus ada perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Untuk perpindahan ini diperlukan energi sekurang-kurangnya sama dengan celah energi yang ada di atasnya. Bahan yang elektron-elektronnya bisa melakukan perpindahan semacam ini dikenal sebagai bahan semikonduktor yang memiliki sifat hantaran listrik di antara isolator dan konduktor.

Kita dapat membedakan antara bahan semikonduktor dan isolator berdasarkan pada ukuran lebar celah energi antar pita. Pada bahan isolator, celah energi antara pita valensi dan pita konduksi sangat lebar, nilainya kira-kira 6 eV atau lebih dan elektron di pita valensi tidak memiliki energi yang mencukupi untuk meloncat ke pita konduksi. Sedang pada bahan semikonduktor celah tersebut cukup sempit, nilainya kira-kira 1 eV sehingga bahan ini dapat bersifat konduktor pada temperatur 45 - 375 Kelvin. Elektron-elektron dari pita valensi dapat dengan mudah meloncat ke pita konduksi dengan bantuan energi thermal dari lingkungan. Bahan semikonduktor berubah sifatnya menjadi isolator di bawah 45 Kelvin [9].

Sebagai contoh bahan semikonduktor adalah kristal Si dan Ge. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, kristal Si memiliki 14 elektron pada kulit atomnya. Pada suhu 0 K, elektron-elektron itu mengisi pita energi pertama sampai ke-7 hingga penuh, masing-masing dengan 2N elektron. Sedang pita ke-8 dan seterusnya kosong. Hal ini berarti bahwa kristal Si pada suhu 0 K bersifat sebagai isolator karena pita konduksi (pita ke-8) kosong. Namun karena celah energi antara pita valensi dan pita konduksi tidak terlalu lebar, maka pada suhu kamar ada cukup banyak elektron yang meninggalkan pita valensi untuk loncat ke pita konduksi. Elektron dapat bergerak bebas sehingga dapat berperan sebagai penghantar listrik.

Energi termik yang tersedia pada temperatur ruang seringkali sudah mencukupi untuk menaikkan energi elektron sehingga dapat loncat melewati celah energi. Tentu saja jumlah elektron pada pita

Bahan semikonduktor memiliki sifat hantaran listrik yang khusus, sangat berlainan dengan bahan konduktor. Apabila logam-logam konduktor dipanaskan, maka hambatan jenisnya bertambah secara linier dengan koefisien suhunya sangat kecil. Untuk menaikkan hambatan jenis bahan konduktor menjadi dua kali lipat dari semula diperlukan kenaikan suhu lebih dari 200 °C. Sebaliknya, jika bahan semikonduktor dipanaskan, hambatan jenisnya akan berkurang. Hal ini disebabkan elektron-elektron pada pita valensi mendapatkan energi termik yang cukup untuk meloncat ke pita konduksi, sehingga daya hantar listriknya bertambah [8].

Semakin tinggi temperatur akan semakin banyak elektron yang mendapatkan energi termik sehingga semakin banyak pula elektron-elektron yang loncat ke pita konduksi. Dalam pita konduksi ini elektron bergerak lincah sehingga dapat bertindak sebagai penghantar listrik yang baik. Oleh sebab itu, hambatan jenis bahan semikonduktor turun dengan cepat apabila terjadi kenaikan suhu. Pada daerah tertentu, hanya diperlukan suhu beberapa derajat saja untuk menurunkan hambatan jenisnya menjadi setengah dari semula.

Para peneliti tertarik pada bahan semikonduktor untuk terus diteliti dan dikembangkan karena sifat kelistrikannya yang istimewa. Dengan bahan semikonduktor dapat dibuat detektor radiasi, komponen pendukung untuk instrumentasi nuklir, serta komponen-komponen elektronik lainnya yang penggunaannya sangat luas dalam kehidupan sehari-hari. Bahan semikonduktor hadir pada alat komunikasi, komputer, reaktor nuklir, roket, peluru kendali, pesawat ruang angkasa dan sebagainya.

## 2.2. BAHAN SEMIKONDUKTOR

Pada akhir 1830, semikonduktor mulai dipelajari untuk pertamakalinya di laboratorium, namun pengetahuan saat itu belum memungkinkan dimanfaatkannya bahan tersebut untuk pembuatan komponen elektronik [10]. Bahan yang dipelajari pertamakali adalah gabungan unsur-unsur yang sifat konduktornya rendah apabila dipanaskan. Bahan itu dapat memancarkan cahaya (*photoelectric*) dan

menghantarkan arus listrik. Henry A. Miers (1858-1942) memperkenalkan pertamakalinya metode pembuatan kristal semikonduktor silikon (Si) dan galium-arsen (GaAs) pada 1906. Metode pembuatan kristal semikonduktor terus dikembangkan hingga 1927 oleh Walther Kossel (1888-1956) di Gottingen, Jerman.

Pada bahan konduktor, arus listrik dihasilkan oleh adanya aliran elektron. Sedang pada bahan semikonduktor, arus listrik selain dihasilkan oleh aliran elektron, juga dihasilkan oleh aliran lubang (*hole*). Dalam pita valensi, elektron sebetulnya berpasangan dengan lubang. Karena elektron bermuatan negatif dan lubang bermuatan positif, pasangan elektron-lubang adalah netral. Jika elektron loncat dari pita valensi menuju pita konduksi, maka akan terbentuk lubang pada pita valensi yang ditinggalkan oleh elektron. Lubang itu bermuatan positif dan dapat bergerak lincah di dalam pita valensi. Penghantar arus listrik pada bahan semikonduktor bukan hanya dilakukan oleh elektron pada pita konduksi saja, tetapi juga oleh lubang yang bergerak di dalam pita valensi. Bahan semikonduktor yang masih murni atau belum disisipi atom-atom lain seperti ini disebut semikonduktor intrinsik.

Selain melalui pemanasan, hambatan jenis pada bahan semikonduktor dapat juga diturunkan dengan mencangkokkan sedikit pengotor ke dalam bahan tersebut. Istilah cangkok-mencangkok dalam disiplin fisika zat padat berkaitan dengan upaya memperbaiki sifat elektrik suatu bahan semikonduktor. Usaha ini biasanya ditempuh dengan cara menambahkan atom asing ke dalam suatu bahan, sehingga bahan yang tadinya murni menjadi terkotori dengan masuknya atom asing tadi. Ketidakmurnian bahan ini ternyata dapat menimbulkan perubahan sifat elektrik bahan semikonduktor, sehingga dapat dimanfaatkan untuk maksud-maksud tertentu. Atom yang dicangkokkan itu disebut *dopan*, sedang proses pencangkokannya disebut *doping*.

Kita dapat menambahkan atom-atom pengotor ke dalam bahan semikonduktor untuk mendapatkan efek-efek tertentu sesuai dengan yang diharapkan [9]. Dalam bidang elektronika zat padat,

pencangkakan atom dilakukan terhadap bahan semikonduktor untuk meningkatkan sifat konduktivitas atau daya hantar listriknya. Bahan semikonduktor yang sudah dicangkoki sedikit pengotor ini disebut semikonduktor ekstrinsik. Untuk mendapatkan perubahan sifat elektrik terhadap bahan semikonduktor, cukup dicangkokkan satu atom dopan per satu juta atom semikonduktor. Dengan perbandingan seperti itu, dalam bahan semikonduktor sudah terbentuk beberapa tingkat energi diskrit yang cukup untuk mempermudah loncatan elektron. Pencangkakan pengotor 0,005 persen saja sudah dapat menghasilkan banyak elektron bebas sehingga konduktivitasnya meningkat secara drastis.

Jenis atom pengotor yang dicangkokkan ke dalam semikonduktor ada dua jenis, yaitu atom pengotor yang memiliki kekurangan elektron (disebut atom akseptor) dan atom pengotor yang memiliki kelebihan elektron (disebut atom donor). Oleh sebab itu, ada dua jenis semikonduktor ekstrinsik karena perbedaan jenis atom pengotor yang dicangkokkan ke dalamnya, yaitu semikonduktor tipe-p (positif) dan semikonduktor tipe-n (negatif).

Semikonduktor tipe-p adalah semikonduktor yang dicangkoki atom akseptor yang kekurangan elektron. Semikonduktor jenis ini dibuat dari atom yang memiliki empat elektron valensi pada orbit terluarnya, dicangkoki atom pengotor yang memiliki tiga elektron valensi pada orbit terluarnya. Misal atom Ge yang memiliki empat elektron valensi pada orbit terluarnya dicingkoki dengan boron (B) atau aluminium (Al) yang memiliki tiga elektron valensi pada orbit terluarnya. Tiga elektron valensi dari atom B atau Al melakukan ikatan kovalen dengan elektron-elektron valensi atom Ge, namun ada satu elektron valensi dari atom Ge yang tidak mendapatkan pasangan sehingga menimbulkan lubang. Dengan pencangkakan itu, berarti kita telah menambahkan satu lubang untuk setiap atom pengotor B atau Al ke dalam bahan semikonduktor Ge seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.

bertindak sebagai pembawa aliran listrik. Karena pembawa aliran listriknya adalah elektron bebas bermuatan negatif, maka bahannya disebut semikonduktor tipe-n.

Atom-atom yang memiliki sifat kelistrikan semikonduktor dan sering dimanfaatkan sebagai bahan dasar untuk pembuatan komponen elektronik berbasis semikonduktor adalah Ge, Si, Tellurium (Te) dan indium antimonide [11]. Sedang sebagai bahan dopannya adalah B, P, As dan Al. Bahan utama semikonduktor yang selama ini dimanfaatkan terutama adalah Ge dan Si, yaitu unsur-unsur kimia yang terdapat pada golongan IVA susunan berkala. Germanium merupakan unsur kimia bersifat setengah logam dengan nomor atom 32 dan nomor massanya 72,59. Ditemukan pertama kali pada tahun 1886 oleh Clemens Winkler (1838-1904). Dalam industri elektronika, unsur ini terutama digunakan untuk pembuatan transistor dan komponen elektronik lainnya, detektor infra merah, spektroskop, lensa dan fosfor untuk lampu.

Karena Ge bersifat racun bagi tubuh manusia, maka antara 1990–2000 banyak peneliti di bidang semikonduktor mengalihkan penelitiannya ke bahan Si. Bahan ini merupakan unsur kimia bukan logam dengan nomor atom 14 dan massa atomnya 28,1. Ditemukan pada tahun 1824 oleh Jacob Benzelius (1779-1848). Silikon merupakan unsur terbanyak dalam kerak bumi dengan jumlah mencapai lebih dari 25 persen berat bumi. Silika (silicon dioksida) merupakan bentuk yang terbanyak terdapat di alam. Unsur ini tersebar banyak sekali dalam susunan batuan dan mineral.

### **2.3. PENGEMBANGAN TRANSISTOR**

Pada 1874, Karl F. Braun (1850-1918) memanfaatkan sifat kelistrikan bahan semikonduktor untuk tenaga listrik dan teknologi informasi, terutama untuk telepon dan telegraf. Sejak saat itu lahir perangkat semikonduktor yang pertama [10]. Kini bahan semikonduktor hadir pada peralatan komunikasi, komputer, reaktor nuklir, roket, peluru kendali, pesawat ruang angkasa dan sebagainya.

Transistor dapat dihubungkan pada rangkaian elektronik sebagai komponen terpisah atau dalam bentuk terpadu pada suatu *chip*. Pada 1958, insinyur di dua perusahaan elektronik, Jack St. Clair Kilby (1923-2005) dari *Texas Instrument* dan Robert Noyce (1927-1990) dari *Fairchild Semiconductor Company*, telah memperkenalkan ide rangkaian terpadu monolitik yang dikenal dengan nama IC (*integrated circuit*). Kemajuan dalam bidang mikroelektronika saat ini tidak terlepas dari penemuan bahan semikonduktor, transistor, dan rangkaian terpadu.

Pada 1960, produk elektronik masih didominasi oleh radio, *tape recorder* dan televisi yang telah menggunakan transistor. Pada saat itulah Kilby sedang mengembangkan IC. Tidak lama kemudian, IC rancangan Kilby menggusur penggunaan transistor dan menjadi komponen utama dalam komputer. Atas jasanya dalam merintis rangkaian elektronik terpadu yang kini lebih dikenal dengan sebutan *chip*, Akademi Sains Kerajaan Swedia, lembaga yang berwenang menilai kandidat pemenang hadiah Nobel, merekomendasikan untuk memilih tiga pemenang Nobel Fisika tahun 2000 kepada Insinyur Jack S. Kilby, Zhores I. Alferov (1930) dan Herbert Kroemer (1928). Mereka bertiga dianggap berjasa dalam mengembangkan perangkat elektronik sehingga mengantarkan ke arah perkembangan pemanfaatan komputer yang sangat fantastis [13].

Inovasi yang dilakukan oleh Kilby memang diakui dan dikagumi oleh banyak pakar yang terlibat dalam riset dasar semikonduktor, bahan utama untuk pembuatan berbagai jenis komponen elektronik, di antaranya IC. Kilby mengembangkan IC generasi pertama pada 1958. Untuk ukuran saat ini, IC hasil inovasi Kilby di *Texas Instruments* itu memang bisa digolongkan sudah usang, dan kini sudah menjadi penghuni museum. Rangkaian terpadu sederhana yang pertama kali dibikin itu hanya terdiri atas satu transistor dan komponen lain yang dikemas dalam sepotong lembaran germanium dengan ukuran 7/16 x 1/16 inchi [15].

Komputer digital berkecepatan tinggi bisa terwujud berkat penggunaan transistor dalam IC yang merupakan kumpulan jutaan

akselerator di seluruh dunia, sepertiganya digunakan untuk keperluan medis di bidang kedokteran, sedang sisanya dimanfaatkan untuk bidang aplikasi industri.

Aplikasi akselerator dalam bidang industri yang paling menonjol adalah untuk mendukung proses peroduksi bahan semikonduktor dengan teknik implantasi ion [17]. Ditinjau dari aspek teknis, metode pencangkakan ion dengan akselerator jauh lebih unggul dalam pengontrolan tingkat kemurnian hasil yang diperoleh. Proses pencangkakan semikonduktor dengan akselerator ini dikembangkan terutama untuk mendukung industri komponen-komponen elektronika seperti transistor, dioda zener, *integrated circuit*, sel surya serta berbagai jenis detektor. Dari sini dapat diproduksi komponen elektronik terintegrasi yang mempunyai densitas tinggi.

Salah satu jenis akselerator yang banyak dimanfaatkan dalam kegiatan industri semikonduktor adalah implantor ion. Penggunaannya dalam proses doping pada semikonduktor memiliki arti sangat penting karena telah memproduksi bahan semikonduktor bernilai multi milyar Dollar Amerika. Pada akhir abad 20 di seluruh dunia, ada lebih dari 6.000 implantor ion yang diproduksi selama 30 tahun dengan rata-rata 200 alat baru diproduksi pertahunnya. Terbukti bahwa teknologi yang mampu memenuhi tuntutan persyaratan pabrikasi bahan semikonduktor untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan industri mikroelektronika adalah mesin implantasi ion. Pada abad ke 21, antara 200 hingga 400 alat baru telah diproduksi setiap tahunnya [17].

Dengan memanfaatkan mesin implantasi ion, pabrikan semikonduktor dapat menyisipkan atau mencangkakkan berbagai jenis ion ke dalam bahan semikonduktor dengan dosis tertentu dan kedalaman sesuai dengan yang diinginkan. Dengan teknik ini dapat diperoleh pola rangkaian piranti elektronik dan mikroelektronik sesuai dengan yang diinginkan. Selain itu, metode implantasi ion juga memerlukan langkah proses yang lebih singkat dan cepat, memiliki ketelitian tinggi, serta bebas kontaminan karena prosesnya berlangsung dalam kondisi vakum tingkat tinggi. Dengan energi

berorde ratusan kilo elektronVolt (keV) dan arus berkas ion berorde beberapa mili Ampere (mA), proses implantasi ion dengan dosis berorde  $10^{11} - 10^{13}$  ion/cm<sup>2</sup> dapat berlangsung dalam orde detik.

Dengan teknik implantasi ion dapat diproduksi rangkaian terpadu atau IC (*integrated circuit*,) berbasis MOS (*Metal Oxide Silicon*) atau CMOS (*Complimentary Metal Oxide layer Silicon*) berskala MSC (*medium scale integration*) sampai dengan VLSI (*very large scale integration*) serta komponen elektronik renik lainnya seperti Laser diode, Fotodioda dan CCD (*charged couple device*). Komponen elektronik dan mikroelektronik itu banyak dimanfaatkan untuk memproduksi peralatan telekomunikasi dan informatika. Kecenderungan produksi IC juga mengarah kepada teknologi VLSI dimana para pabrikan produk komponen elektronika berusaha membuat atau merangkai jutaan transistor dalam satu IC. Melalui teknologi ini akan diperoleh dua keuntungan sekaligus, yaitu kecepatan proses tinggi dan konsumsi daya yang rendah. Komponen IC ini tetap berbasis pada MOS dan CMOS [15].

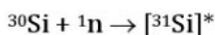
Selain dengan akselerator, teknik nuklir lainnya yang saat ini juga sering dimanfaatkan untuk pencangkakan bahan semikonduktor adalah dengan irradiasi berkas neutron menggunakan teknologi yang biasa disebut *neutron transmutation doping* (NTD). Teknologi NTD dilakukan dengan melibatkan reaktor nuklir. Ada tiga jenis reaktor nuklir dilihat dari tujuan penggunaannya. Pertama adalah reaktor yang digunakan untuk tujuan penelitian yang lazim disebut reaktor penelitian (*research reactor*). Kedua adalah reaktor yang dirancang untuk menghasilkan listrik yang lazim disebut reaktor daya (*power reactor*) dan digunakan untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Ketiga adalah reaktor yang dirancang berperan ganda, yaitu sebagai penghasil listrik (berperan sebagai reaktor daya) dan produksi bahan bakar fisi (membiakkan bahan bakar nuklir) yang lazim dikenal sebagai reaktor pembiak (*breeder reactor*).

Reaktor penelitian mempunyai peran yang sangat besar dalam rangka pemanfaatan teknik nuklir di luar energi. Reaktor jenis ini hanya memanfaatkan neutron hasil reaksi fisi nuklir, sedang panas

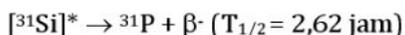
yang keluar dari reaksi nuklir itu akan dibuang. Karena memanfaatkan neutron, reaktor penelitian dirancang mempunyai fluks neutron yang cukup besar sehingga cocok sebagai sarana untuk melakukan irradiasi dengan neutron. Agar fluks neutronnya mencapai optimum, maka pada teras reaktor dikelilingi balok berillium (Be) dan beberapa baris elemen Be sebagai pemantul neutron. Selain itu, karena panasnya tidak dimanfaatkan, maka reaktor penelitian dirancang berdaya thermal rendah. Reaktor penelitian berperan sangat besar dalam rangka pemanfaatan teknologi nuklir di luar energi. Reaktor ini seringkali dilengkapi dengan berbagai fasilitas, salah satunya adalah fasilitas *doping* dengan transmudasi neutron (*neutron doping facility*) yang dapat digunakan untuk melakukan irradiasi neutron pada sampel semikonduktor berbasis Si [18].

Pembuatan bahan baru dengan struktur yang berbeda dari bahan aslinya dapat dilakukan dengan cara memasukkan partikel neutron ke dalam inti atom bahan. Karena penyerapan neutron itu, maka kestabilan inti atom bahan menjadi terganggu dan bahan akan berubah menjadi isotop lain dengan sifat fisika yang berbeda dari unsur aslinya. Teknik ini ternyata dapat dimanfaatkan untuk memproduksi bahan semikonduktor, terutama mengubah karakteristik Si murni menjadi Si yang terdoping dengan atom P dengan kadar tertentu, sehingga berperan sebagai bahan semikonduktor yang sangat baik dengan tingkat kemurniannya yang sangat tinggi. Hingga saat ini, teknik irradiasi neutron dikenal sebagai teknik terbaik untuk proses pencangkakan dopan [17].

Di alam, atom Si dapat ditemukan dalam tiga jenis isotop, yaitu  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  dan  $^{30}\text{Si}$ . Jika ketiga isotop tersebut diradiasi dengan neutron termik, maka sebuah neutron akan masuk dan menetap dalam inti masing-masing isotop sehingga ketiganya berubah masing-masing menjadi  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  dan  $^{31}\text{Si}$ . Isotop  $^{29}\text{Si}$  dan  $^{30}\text{Si}$  inti atomnya stabil, sedang inti atom  $^{31}\text{Si}$  bersifat tidak stabil. Karena proses irradiasi ini maka sebagian inti atom  $^{30}\text{Si}$  berubah menjadi inti atom radioaktif  $^{31}\text{Si}$  melalui reaksi inti sebagai berikut [18]:



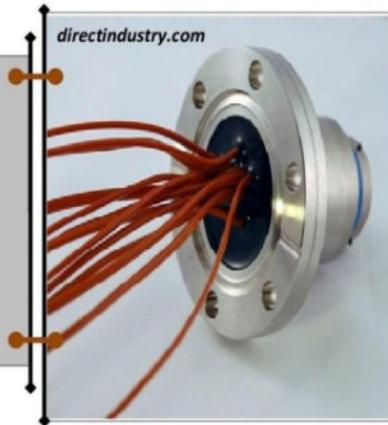
Umur paro ( $T_{1/2}$ ) dari  $^{31}\text{Si}$  adalah cukup pendek, yaitu hanya 2,62 jam. Umur paro adalah waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif untuk meluruh sehingga jumlahnya menjadi setengah dari jumlah semula. Karena bersifat radioaktif, maka inti atom  $^{31}\text{Si}$  akan melakukan peluruhan menuju ke keadaan inti atom yang stabil sehingga terbentuklah atom P disertai pemancaran radiasi beta negatif ( $\beta^-$ ) atau elektron. Namun setelah tiga hari, secara keseluruhan praktis sifat radioaktifnya akan habis. Proses peluruhannya adalah sebagai berikut:



Kemunculan pengotor P dalam bahan semikonduktor Si menyebabkan bahan yang semula tidak memiliki sifat kelistrikan aktif itu berubah sifatnya menjadi semikonduktor Si tipe-n. Semikonduktor Si dengan dopan P ini banyak digunakan untuk pembuatan transistor, *thyristor* tegangan tinggi maupun CCD untuk kamera video. Proses pembuatan bahan semikonduktor dengan teknik iradiasi neutron dapat dilakukan dengan hasil yang sangat baik. Kadar dopan P dapat diatur dengan teknik pengaturan waktu iradiasi yang tepat. Kelebihan teknologi NTD dibanding teknologi pencangkakan semikonduktor lainnya adalah pada teknologi NTD hasil pencangkakannya lebih homogeny [18].

Komponen elektronik seperti transistor biasanya sangat peka terhadap kontaminan, misal ikut terbawa masuknya atom lain pada saat pabrikasi semikonduktor. Karena itu, ketika proses pencangkakan berlangsung, tidak boleh ada kontaminan lain yang ikut masuk ke dalam bahan semikonduktor selain atom yang dicangkakkan. Masuknya kontaminan dapat menyebabkan timbulnya tangga energi yang tidak dikehendaki pada pita larangan. Kemunculan tangga energi itu dapat memengaruhi sifat kelistrikan bahan semikonduktor yang dihasilkan sehingga tidak sesuai dengan yang diharapkan. Dengan NTD, kehadiran pengotor-pengotor lainnya dapat dihindari sejak sebelum proses iradiasi berlangsung.

### 3 INDUSTRI POLIMER



Bahan atau material merupakan kebutuhan hidup manusia sepanjang zaman. Sejak zaman prasejarah, kehidupan manusia sudah mulai berhubungan dengan berbagai jenis bahan yang dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti untuk membuat peralatan berburu, bertani, bangunan tempat tinggal, transportasi, mengolah produk makanan dan sebagainya. Perkembangan peradaban manusia juga bisa diukur dari kemampuannya dalam memproduksi dan mengolah bahan untuk memenuhi berbagai kebutuhan hidupnya. Pada tahap awal, manusia hanya memanfaatkan bahan apa adanya sebagaimana yang telah tersedia oleh alam tanpa proses lebih lanjut, seperti dalam pemanfaatan batu, kayu, kulit, tanah dan sebagainya.

Arkheolog melakukan penelitian kehidupan manusia zaman prasejarah melalui berbagai analisis terhadap hasil kebudayaan yang ditinggalkan atau analisis terhadap corak kehidupannya. Berdasarkan hasil analisis terhadap peninggalan kebudayaan, kehidupan zaman prasejarah dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zaman batu dan zaman logam. Namun pembagian tersebut tidak menggunakan batas-batas waktu yang jelas untuk tiap-tiap zaman, karena hanya didasarkan pada jenis bahan yang digunakan untuk membuat peralatan dan perkakas hidup mereka, yaitu batu dan logam. Untuk zaman logam selanjutnya dibedakan lagi menjadi zaman perunggu dan besi [21].

Dengan perkembangan peradaban manusia, bahan-bahan alam bisa diolah dan direkayasa lebih lanjut sehingga menghasilkan bahan dengan kualitas yang lebih tinggi. Perkembangan ilmu pengetahuan tentang bahan telah mengantarkan para ilmuwan menemukan hubungan sifat-sifat bahan dengan elemen struktur bahan. Lahirlah kajian dalam bidang ilmu bahan/material (*material science*), yaitu disiplin ilmu yang mempelajari hubungan antara struktur dengan sifat-sifat material. Lahir pula kajian dalam bidang rekayasa bahan atau material (*material engineering*) yang mempelajari teknik-teknik perbaikan sifat bahan. Melalui dua bidang kajian itu manusia berhasil merancang struktur bahan untuk mendapatkan sifat-sifat sesuai dengan yang diinginkan untuk maksud-maksud tertentu [22].

### 3.1. BAHAN POLIMER

Polimer berasal dari bahasa Yunani yang terdiri atas dua kata, yaitu *poly* dan *meros*. *Poly* artinya banyak sedangkan *meros* berarti unit atau bagian. Istilah polimer dipakai untuk menggambarkan bentuk molekul raksasa atau memiliki rantai yang sangat panjang yang terdiri atas unit-unit kecil dengan susunan berulang-ulang. Polimer merupakan senyawa besar yang terbentuk dari hasil penggabungan sejumlah unit-unit molekul kecil. Unit molekul terkecil berupa molekul tunggal penyusun polimer dikenal dengan istilah monomer. Reaksi polimerisasi adalah reaksi penggabungan molekul-molekul kecil berupa monomer yang membentuk molekul besar berupa polimer.

Dilihat dari sudut pandang ilmu kimia, polimer merupakan susunan senyawa rantai panjang atau pendek dari karbon yang berulang. Dengan menambahkan ikatan lain pada rantai karbon dapat dihasilkan polimer baru. Karena itu, polimer bisa tersusun atas ribuan atau bahkan jutaan monomer, sehingga dapat disebut sebagai senyawa makromolekul. Sebagai akibatnya, molekul-molekul polimer umumnya mempunyai massa molekul yang sangat besar. Sebagai contoh, polimer poli mempunyai nilai rata-rata massa molekulnya mendekati 300.000. Hal ini yang menyebabkan polimer dengan massa

Polimer jenis politetrafluoretena (Teflon) banyak digunakan sebagai pelapis karena tahan terhadap panas dan permukaannya licin. Contoh penggunaannya adalah untuk pelapisan alat penggorengan karena tidak lengket ketika dipakai untuk memasak. Polimer jenis polivinil clorida (PVC) banyak digunakan sebagai bahan pembuatan pipa dan karpet. Nilon adalah salah satu jenis polimer serat sintetis yang cukup kuat dan banyak digunakan sebagai bahan sandang, terutama pakaian. Sutra merupakan jenis polimer yang diperoleh dari protein (fibroin) kepompong ulat sutra. Polimer jenis ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan sandang karena memiliki serat halus dengan kualitas sangat baik. Kapas merupakan jenis polimer selulosa yang banyak digunakan sebagai bahan untuk membuat kain. Katun dikenal sebagai bahan kain yang kuat dan nyaman dipakai dengan perawatan yang mudah [23].

Penelitian terus dilakukan untuk menghadirkan polimer yang multiguna. PVC, teflon, dakron, nilon, dan poliester adalah beberapa contoh perkembangan teknologi produk polimer untuk kebutuhan manusia. Bidang energi memanfaatkan polimer untuk membuat baterai yang lebih tahan lama dan mampu menyimpan energi lebih banyak. Sifat polimer yang memungkinkan proses daur ulang memudahkan manusia untuk mengatasi persoalan limbah dari polimer. Dalam hal ini polimer tidak harus dibuang setelah pemakaiannya selesai, namun dapat didaur ulang dan dimanfaatkan kembali menjadi polimer yang baru.

Teknik nuklir telah sejak lama diaplikasikan dalam berbagai bidang kegiatan yang berhubungan dengan rekayasa bahan. Penggunaan teknologi radiasi yang cukup besar adalah untuk proses kimia dalam industri. Karena membawa energi yang cukup tinggi, radiasi dapat bertindak sebagai katalis untuk merangsang terjadinya perubahan kimia suatu bahan, salah satunya adalah untuk polimerisasi senyawa organik dalam golongan monomer. Polimerisasi merupakan reaksi kimia yang menggabungkan dua molekul atau lebih menjadi molekul yang lebih besar. Secara umum dapat dikatakan bahwa polimerisasi merupakan usaha untuk memadukan beberapa

unsur menjadi satu zat yang berpadu. Apabila mendapatkan energi dari radiasi, monomer akan saling berikatan membentuk molekul raksasa yang lebih kompleks dalam bentuk polimer. Senyawa inilah yang selanjutnya dijadikan sebagai bahan dasar untuk pembuatan berbagai macam produk plastik [26].

### 3.2. POLIMERISASI RADIASI

Aplikasi teknik nuklir ternyata dapat memberikan nilai tambah terhadap produk-produk yang dihasilkan oleh kegiatan industri. Di bidang industri, teknik nuklir dapat dipakai untuk meningkatkan kualitas produk menggunakan teknologi radiasi. Tanpa disadari sebetulnya banyak produk-produk industri yang dipakai dalam kehidupan sehari-hari mengandung komponen yang proses pembuatannya melibatkan teknologi radiasi. Ada demikian banyak produk polimer yang telah berhasil dimodifikasi untuk keperluan tertentu. Banyak produk plastik keperluan rumah tangga dan beredar secara luas di pasaran yang dibuat melalui proses polimerisasi radiasi.

Isu lingkungan yang gencar belakangan ini telah memaksa industri untuk mengkaji ulang terhadap bahan-bahan yang digunakan dalam proses produksi, terutama yang berbahan baku plastik yang tidak dapat didegradasi oleh alam. Berbeda dengan teknik polimerisasi konvensional yang umumnya menggunakan bahan kimia dan panas agar terjadi reaksi penggabungan, pada polimerisasi radiasi ini, penggunaan bahan kimia dan panas sangat sedikit, sehingga secara ekonomi prosesnya lebih menguntungkan, disamping teknologinya sendiri dinilai bersih dari pencemaran lingkungan, tidak menggunakan bahan-bahan kimia karsinogenik (bahan yang dapat merangsang tumbuhnya kanker dalam tubuh) serta bahan beracun lainnya. Modifikasi polimer dengan radiasi dapat dilakukan dalam berbagai kondisi dan dapat dikontrol dengan teliti [26].

Teknik polimerisasi radiasi merupakan salah satu dari pemanfaatan radiasi untuk memodifikasi polimer. Tujuannya adalah mengolah bahan mentah yang berasal dari alam maupun sintesanya, seperti polietilen dan polipropilen, menjadi bahan setengah jadi atau

tingkat energi yang dimiliki. MBE dengan energi rendah (kurang dari 300 keV) dan sedang (antara 300 keV-1 MeV) hanya dapat digunakan untuk penyinaran bahan yang tipis, karena elektron hanya mampu menembus ketebalan sekitar 1 mm. MBE dengan energi tinggi mampu memproduksi elektron pada tingkat energi di atas 1 MeV. Untuk keperluan polimerisasi, biasanya digunakan MBE yang mampu mempercepat gerak elektron hingga berenergi 2 MeV [27].

Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh sumber radiasi pengion dari MBE diantaranya adalah bahwa MBE memiliki kemampuan mengiradiasi yang tinggi, ekonomis dalam hal proses, dapat dengan mudah dinyalakan dan dimatikan, tidak meluruh dan sumbernya tidak meninggalkan sampah, sehingga lebih mudah diterima oleh masyarakat sebagai fasilitas iradiator. Di negara maju, teknologi iradiasi ini sudah diterapkan dalam berbagai kegiatan industri, sehingga banyak sekali produk bermutu tinggi yang telah dihasilkan oleh industri yang memanfaatkan teknologi iradiasi ini.

Polimer yang ada di pasaran dapat diubah-ubah sifatnya melalui berbagai cara kimia maupun dengan teknik radiasi. Peluang aplikasi teknologi polimerisasi radiasi untuk modifikasi dan produksi bahan-bahan unggul masih terbentang luas di masa-masa mendatang. Dunia industri membutuhkan polimer yang memiliki ketahanan terhadap oksida maupun stabilitas thermal. Polimer ini dapat mengisi kebutuhan permintaan bahan isolasi kabel listrik tegangan super tinggi ataupun bahan polimer untuk isolasi super panas [24].

Polimer tahan panas diperlukan oleh industri otomotif, elektronika, juga dalam pembuatan bahan magnet superkonduktif untuk reaktor fusi. Polimer dengan karakteristik tertentu juga diperlukan oleh industri baterai untuk penyimpanan listrik. Barang-barang produk industri juga memerlukan jenis pengemas yang sifatnya bisa diurai oleh alam (*biodegradable*). Penelitian di bidang ini menarik perhatian internasional sejalan dengan tuntutan penggunaan produk-produk yang ramah lingkungan [23].

Dalam bidang kedokteran, polimer yang telah dimodifikasi sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk berbagai keperluan

Selain memberikan manfaat yang sangat besar, listrik juga mempunyai potensi bahaya yang harus dicegah kemunculannya. Bahaya langsung pada manusia adalah berupa sengatan aliran listrik yang dapat menimbulkan gangguan pada tubuh dengan tingkat keparahannya bergantung pada besar kecilnya aliran listrik. Semakin besar aliran listrik, semakin besar pula efek yang ditimbulkannya. Jenis gangguan yang dapat muncul pada tubuh yang tersengat listrik itu adalah mulai dari kejang-kejang, lumpuh sebagian, tubuh terbakar bahkan bisa berakibat pada kematian. Terlalu sering terkena sengatan listrik dapat mengakibatkan kerusakan sel-sel dalam tubuh. Orang tidak akan dapat melepaskan diri dari sengatan arus listrik sebesar 16 Mega Ampere.

Potensi bahaya listrik yang lain adalah terjadinya hubungan singkat (*konsluiting*) apabila listrik positif dan negatif bersentuhan. Risiko yang paling sering muncul dari adanya hubungan singkat ini adalah terjadinya kebakaran, karena hubungan singkat itu dapat memercikkan api yang bisa berperan sebagai pemantik kebakaran. Akibat yang ditimbulkan dari risiko ini juga bisa sangat fatal, karena di samping menimbulkan kerugian harta benda, tidak jarang peristiwa ini juga memakan korban jiwa.

Untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat luas, listrik yang dibangkitkan oleh generator-generator raksasa di pusat pembangkit listrik, dialirkan melalui jaringan transmisi menggunakan kabel atau kawat konduktor sehingga akhirnya dapat dimanfaatkan oleh para konsumen. Lintasan yang dilalui arus ini disebut sirkuit, yang merupakan jalan arus dari sumber pembangkit listrik melalui konduktor menuju ke konsumen. Untuk menghindari bahaya yang dapat muncul, maka harus dilakukan pencegahan yang seksama terhadap terjadinya kebocoran arus listrik. Cara yang paling umum ditempuh adalah dengan membungkus kawat konduktor dengan bahan isolator. Baik sengatan listrik maupun hubungan singkat dapat terjadi karena isolasi kabel yang tidak sempurna, misal kabel terkelupas. Oleh sebab itu, mutu isolasi kabel harus benar-benar

dimanfaatkan untuk memodifikasi polietilen sehingga memiliki struktur molekul yang berikatan silang. Rantai polimer yang semula linear dibuat saling berikatan sehingga membentuk struktur tiga dimensi yang lebih kuat dan berat molekulnya lebih besar [26].

Pembentukan ikatan silang dalam rantai polimer polietilen dapat dilakukan dengan cara kimia maupun cara radiasi. Ada dua cara kimia yang paling lazim digunakan dalam industri kabel, yaitu metode vulkanisasi kontinyu (*continuous vulcanisation*) dan metode Sioplas. Cara fisika dilakukan menggunakan radiasi pengion. Penggunaan energi radiasi untuk pengolahan polimer dalam industri didasarkan pada sifat energi radiasi yang dapat menginduksi reaksi kimia pada bahan yang diradiasi. Dalam hal ini radiasi pengion baik dalam bentuk berkas elektron maupun sinar gamma digunakan untuk menyinari bahan polimer, sedemikian rupa sehingga pada bahan itu terbentuk ikatan silang yang mengubah sifat-sifat fisika mekanik bahan sehingga sesuai dengan kriteria yang dikehendaki sebagai bahan isolasi kabel. Peristiwa inilah yang sebenarnya menyebabkan bahan isolasi kabel lebih tahan terhadap panas dan listrik tegangan tinggi [23].

Teknologi iradiasi juga dapat memodifikasi polietilen menjadi produk polimer yang dapat memuai dan menyusut volumenya apabila diberi perlakuan panas yang sering disebut sebagai *heat shrinkable polymer*. Dalam hal ini polimer polietilen diformulasikan sedemikian rupa dengan menggunakan antioksidan dan beberapa aditif seperti *carbon black*, titanium oksida dan silicon [23]. Formulasi polietilen tersebut selanjutnya diradiasi dengan sinar gamma atau berkas elektron pada dosis total sekitar 100-300 kilo Gray (kGy). Bahan polimer hasil modifikasi ini biasanya banyak dimanfaatkan untuk pembuatan isolasi kabel yang dikenal dengan nama *heat shrinkable tube*. Produk ini banyak digunakan dalam industri listrik untuk mengisolasi sambungan-sambungan listrik. *Heat shrinkable tube* juga sering digunakan dalam industri telekomunikasi untuk membungkus satuan-satuan kabel seperti satuan kabel telepon, agar terlindung dari pengaruh luar, lebih awet, aman serta dapat ditanam di bawah tanah.

Polimer yang diradiasi pada dosis 100-300 kGy ternyata memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan isolasi kabel tegangan tinggi.

Teknologi iradiasi sangat efisien dan ekonomis untuk memproduksi bahan isolasi kabel berdiameter kecil yang sangat banyak dipakai dalam industri elektronika yang memerlukan akurasi tinggi, seperti komputer dan pesawat telekomunikasi. Kabel jenis ini juga diperlukan untuk industri peralatan dan instrumen yang umumnya mensyaratkan mutu, dan akurasi tinggi, seperti instrumentasi analisis untuk kegiatan di bidang kimia dan fisika nuklir. Produk-produk yang didukung dengan penggunaan kabel berkualitas tinggi seringkali menjadi keharusan agar mampu mendukung pertumbuhan industri modern. Bagi industri-industri di negara maju, isolasi kabel semacam ini sudah menjadi kebutuhan rutin setiap hari. Namun banyak juga negara berkembang seperti Polandia, Hungaria, China, Taiwan, Republik Korea dan India yang mulai menaruh perhatian terhadap masalah kabel iradiasi dan mengambil langkah konkrit untuk menguasai teknologi polimerisasi radiasi [23].

#### 3.4. BAHAN BANGUNAN

Dikaitkan dengan tempat tinggal, pola hidup manusia purba dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu pola hidup nomaden dan sedenter. Nomaden adalah pola hidup dimana manusia purba pada saat itu hidup berpindah-pindah atau menjelajah. Mereka hidup dalam komunitas-kuminatas kecil dengan mobilitas tinggi di suatu tempat. Mata pencahariannya adalah berburu dan mengumpulkan makanan dari alam (*food gathering*). Sedenter adalah pola hidup menetap dimana manusia sudah terorganisir dan berkelompok serta menetap di suatu tempat. Mata pencahariannya bercocok tanam serta sudah mulai mengenal norma dan adat yang bersumber pada kebiasaan-kebiasaan setempat.

Manusia mengenal tempat tinggal atau menetap di suatu tempat semenjak masa Mesolithikum (batu tengah) atau masa berburu dan meramu tingkat lanjut. Banyak peninggalan prasejarah yang

ditemukan di dalam gua karena nenek moyang manusia sejak zaman prasejarah telah memanfaatkan gua sebagai tempat perlindungan. Rumah sebagai tempat berlindung pada prinsipnya dibutuhkan oleh setiap manusia sepanjang zaman untuk melindungi tubuh dari pengaruh faktor-faktor lingkungan yang kurang menguntungkan seperti panas, cuaca dingin, angin kencang, hujan, petir, gangguan binatang buas dan sebagainya.

Semakin maju peradaban umat manusia, semakin maju pula tempat perlindungan yang dihuninya. Bermula dari menempati gua-gua yang terbentuk secara alamiah, perlahan-lahan peradaban nenek moyang manusia bergeser menuju tingkat yang lebih tinggi sehingga mereka mulai megenal tempat tinggal permanen yang diusahakannya sendiri dalam bentuk bangunan rumah tempat tinggal.

Ketika menginginkan pembangunan rumah, gedung maupun bangunan struktur lainnya, manusia membutuhkan bahan bangunan sebagai sarana untuk mewujudkan keinginan itu. Agar diperoleh bangunan berkualitas, maka diperlukan upaya khusus dalam memilih bahan bangunan. Bahan dengan kualitas tinggi tentunya akan menjadikan bangunan tersebut mempunyai kualitas yang tinggi pula, baik dari sisi daya tahan, kekuatan dan lain sebagainya. Metode yang digunakan untuk melihat dan memilih apakah bahan yang digunakan untuk bangunan mempunyai kualitas yang baik, salah satu caranya adalah dengan melihat penampilan fisik bahan bangunan tersebut. Selain itu, diperlukan juga proses uji bahan di laboratorium, untuk mengetahui lebih dalam mengenai kualitas bahan tersebut.

Sebagai hasil hutan, kayu merupakan bahan mentah yang mudah diproses untuk dijadikan barang kebutuhan manusia sesuai dengan tingkat penguasaan teknologi untuk mengolahnya. Kayu memiliki beberapa sifat khusus, yang tidak dimiliki oleh bahan-bahan dari jenis sumber daya alam lainnya. Dalam kehidupan sehari-hari, kayu merupakan bahan yang sangat sering dimanfaatkan untuk mendirikan bangunan tempat tinggal. Untuk maksud-maksud tertentu, seringkali kayu tidak dapat digantikan dengan bahan lain karena sifat khas yang dimilikinya. Selain tumbuh secara alamiah dan bisa

diperbaharui, setiap jenis kayu mempunyai sifat yang berbeda-beda sehingga memiliki peran yang berbeda-beda pula.

Sebagai bahan konstruksi bangunan, kayu sudah sejak lama dikenal dan banyak dipakai sebelum orang mengenal bahan bangunan lain seperti beton dan baja. Bahan kayu dapat dibentuk, dipotong, dan digunakan secara fleksibel. Faktor-faktor seperti kesederhanaan dalam pengerjaan, ringan, kompatibel dengan lingkungan (*environmental compatibility*) telah menjadikan kayu sebagai bahan yang banyak digunakan untuk konstruksi ringan (*light construction*). Kelebihan-kelebihan dari kayu sebagai bahan konstruksi bangunan itu tentu memberikan keuntungan tersendiri bagi penggunaannya. Penggunaan kayu sebagai bahan konstruksi tidak hanya didasari oleh kekuatannya saja, tetapi juga dari aspek keindahannya. Secara alami kayu memiliki bermacam-macam warna dan bentuk serat, sehingga untuk bangunan *exposematerial*, kayu tidak banyak memerlukan perlakuan tambahan.

Namun dibalik kelebihan-kelebihan tadi, kayu juga memiliki beberapa kekurangan seperti mudah terbakar, sering dimakan rayap, terserang jamur, dan tidak tahan terhadap kondisi lingkungan, sehingga lama-kelamaan menjadi rapuh. Sebagian kayu tersusun atas selulosa, lignin dan hemiselulosa, semuanya merupakan senyawa hidrocarbon yang mudah terbakar. Karena itu, kayu digolongkan sebagai material yang mudah terbakar (*combustible material*) apabila terjadi peningkatan temperatur ruangan yang berlebihan. Sedang dalam pemakaiannya, kayu harus memenuhi beberapa syarat teknis seperti mampu menahan bermacam-macam beban agar berfungsi dengan aman dalam jangka waktu yang direncanakan, serta mempunyai ketahanan dan keawetan yang memadai melebihi umur pakainya.

Untuk mengatasi segala bentuk kelemahan kayu, maka diperlukan adanya sentuhan teknologi yang dapat meningkatkan mutu bahan bangunan dari kayu sehingga memenuhi spesifikasi teknis yang dikehendaki dalam sistem rancang bangun. Teknik nuklir ternyata dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan mutu kayu melalui

Baik papan partikel maupun lantai parket sebelum dipakai sebagai barang jadi memerlukan proses pelapisan permukaan terlebih dahulu. Proses ini bertujuan untuk melindungi permukaan kayu terhadap pengaruh dari luar yang bersifat merusak, seperti goresan, kikisan, bahan-bahan kimia serta untuk memperindah penampilannya. Sifat dan penampilan permukaan dapat diatur dengan mengatur komposisi bahan pelapis, alat pelapis, tekstur, warna serta kilap.

Teknologi pelapisan dengan radiasi dapat memenuhi fungsi perlindungan serta keindahan bahan yang dilapisi. Proses pelapisan dengan dosis elektron antara 30-50 kGy berlangsung dalam waktu beberapa detik saja. Sedang waktu yang diperlukan sejak pemberian monomer sampai selesainya proses iradiasi untuk setiap lembar triplek/multiples berukuran 120 cm x 240 cm hanya sekitar dua menit. Oleh sebab itu, industri pelapisan permukaan papan kayu dengan teknik iradiasi ini mempunyai kapasitas produksi yang tinggi.

Keunggulan teknologi pelapisan permukaan papan kayu dengan teknologi polimerisasi radiasi dibandingkan teknik konvensional adalah sebagai berikut [28]:

- Bahan pelapis yang dipakai terpolimerisasi sempurna oleh radiasi berkas elektron dan tidak ada bahan yang menguap, sehingga proses ini berlangsung bersih dan tidak mencemari udara.
- Proses pelapisan permukaan dengan radiasi berkas elektron berlangsung jauh lebih cepat dibanding pelapisan secara konvensional.
- Kualitas produk yang dihasilkan oleh proses pelapisan dengan radiasi lebih baik dibandingkan dengan proses konvensional, seperti lebih keras serta tahan terhadap larutan kimia dan panas.
- Konsumsi energi selama proses pelapisan dengan radiasi lebih sedikit dibandingkan proses konvensional.

Penampilan meubel kayu yang tetap mengkilap dan tidak lapuk dimakan bubuk kayu kering meski sudah dipakai dalam waktu lama

memiliki daya tarik tersendiri bagi konsumen. Untuk mempertahankan penampilan meubel seperti itu, diperlukan teknik pengerjaan akhir antara lain dalam teknik pelapisan permukaan. Dengan teknik polimerisasi radiasi, penampilan kayu yang telah diplitur tetap mengkilap dan tidak dimakan bubuk kayu walaupun usianya telah mencapai lebih dari 15 tahun. Hal itu bisa terjadi karena adanya polimer yang mengisi pori-pori kayu setelah diplitur tidak mudah teroksidasi, serangga perusak kayu tidak dapat masuk ke dalamnya, dan kayu menjadi lebih tahan terhadap serangan bubuk kayu kering. Penyebab lain kayu menjadi awet adalah telur serangga yang mungkin ada di dalam kayu dapat mati akibat paparan radiasi pada saat proses polimerisasi.

### 3.5. VULKANISASI RADIASI

Karet adalah sejenis polimer hidrocarbon berupa emulsi, memiliki bentuk cair dengan warna putih seperti susu yang dikenal sebagai lateks. Tanaman penghasil getah karet adalah *Havea brasiliensis* yang berasal dari Brazil. Tanaman ini merupakan sumber utama lateks karet alam dunia. Jauh sebelum tanaman karet dibudidayakan, penduduk asli di berbagai belahan dunia seperti Amerika Serikat, Asia dan Afrika Selatan telah mengenal jenis pohon lain yang juga menghasilkan getah mirip lateks, yaitu tanaman *Castillaelastica*. Namun seiring dengan perjalanan waktu, tanaman tersebut kurang dimanfaatkan lagi getahnya karena kalah populer oleh tanaman karet yang mulai dikenal secara luas dan dibudidayakan secara intensif. Sebagai penghasil lateks, tanaman karet dapat dikatakan satu-satunya tanaman yang dibudidayakan secara besar-besaran di berbagai tempat.

Karet merupakan salah satu komoditi perkebunan penting, baik sebagai penyedia bahan baku untuk industri, sumber pendapatan, kesempatan kerja dan penghasil devisa bagi negara. Karet menjadi salah satu bahan yang cukup banyak dibutuhkan oleh industri untuk menghasilkan berbagai jenis produk. Produk berbasis karet diolah dari bahan mentah berupa getah dengan melibatkan teknologi proses

hasil vulkanisasi radiasi merupakan proses yang sangat menguntungkan. Apabila radiasi pengion menembus poliisoprena karet alam, maka terbentuklah radikal poliisoprena. Apabila antara radikal itu bertemu, maka akan terjadi pengikatan silang yang peristiwanya disebut vulkanisasi radiasi. Peristiwa ini dapat menghasilkan material baru yang karakteristiknya berubah. Jadi proses iradiasi dapat dipakai untuk memperbaiki sifat fisik karet [29].

Dalam hal vulkanisasi lateks karet alam dengan teknik radiasi, pengikatan silang terjadi pada rantai poliisoprena sebagai akibat terbentuknya ikatan kovalen secara langsung antara atom-atom carbon (ikatan  $-C-C-$ ). Sedang dalam metode konvensional dengan teknik vulkanisasi belerang, pengikatan silang terjadi melalui ikatan antara atom C dengan atom S, sehingga di antara kedua atom C terdapat atom S yang menjembatani (ikatan  $-C-S-S-C-$ ). Pada vulkanisasi radiasi ini, penggunaan bahan kimia dan panas sangat sedikit, lebih hemat energi sehingga secara ekonomi prosesnya lebih menguntungkan, di samping teknologinya sendiri dinilai bersih dari pencemaran lingkungan, tidak menggunakan bahan-bahan kimia karsinogenik serta bahan beracun lainnya. Di samping itu, vulkanisasi dengan radiasi ini dapat dilakukan dalam berbagai kondisi dan dapat dikontrol dengan teliti [29].

Di negara maju, teknologi vulkanisasi lateks sudah diterapkan dalam berbagai kegiatan industri, sehingga banyak sekali produk bermutu tinggi yang telah dihasilkan oleh industri yang memanfaatkan teknologi iradiasi. Dengan memanfaatkan teknologi ini kualitas produk-produk tertentu yang dihasilkan oleh industri dapat ditingkatkan. Dari lateks yang sudah diradiasi dapat dibuat berbagai macam produk dengan kualitas standar. Cukup banyak manfaat yang dapat diperoleh dari pemanfaatan teknologi iradiasi dalam kegiatan industri. Salah satunya adalah vulkanisasi radiasi karet alam untuk pembuatan ban mobil radial [31].

Kompon karet alam berupa lembaran film dengan ketebalan sekitar 2 mm diradiasi dengan berkas elektron dari MBE. Lembaran kompon karet tersebut kemudian dilapiskan di atas permukaan ban

dan dipres panas. Dari proses ini akan dihasilkan ban radial yang memiliki keunggulan karena daya cengkramnya pada aspal lebih kuat, lebih elastis serta tidak cepat panas. Ban dari karet hasil proses vulkanisasi radiasi telah berada di pasaran dan ternyata memiliki nilai komersial karena bermutu tinggi. Penggunaan karet bermutu tinggi ini seringkali menjadi syarat mutlak sehingga produk ban yang dihasilkannya benar-benar dapat diandalkan dan berdaya saing. Ban hasil vulkanisasi radiasi ini aman walaupun dikendarai dengan kecepatan tinggi di atas 100 km/jam [29].

Secara visual, antara lateks alam iradiasi dan lateks hasil vulkanisasi kimia (tidak dengan radiasi) memang tidak bisa dibedakan. Warna, bau maupun bentuknya sama, yaitu cairan berwarna putih seperti susu dan berbau ammonia. Namun jika dilihat di bawah *scanning electron microscope* (SEM) akan terlihat bahwa diameter rata-rata partikel karet lateks alam iradiasi ini lebih kecil dibandingkan lateks alam yang tidak diradiasi, masing-masing berkisar antara 280 dan 300 nanometer [30].

Perbedaan akan tampak jelas jika film karet yang dibuat dari vulkanisasi radiasi dan non-radiasi diuji sifat fisik dan mekaniknya. Pada dosis radiasi yang optimum, proses radiasi mampu menghasilkan tegangan putus film karet berkisar antara 220-270 kg/cm<sup>2</sup>, sementara tegangan putus film karet yang diproses dengan vulkanisasi belerang hanya berkisar antara 7-10 kg/cm<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa lateks alam hasil vulkanisasi radiasi memiliki kekuatan sekitar 30 kali lebih tinggi dibandingkan karet biasa [30].

Film karet dari lateks alam iradiasi juga jauh lebih ulet dan elastis dibandingkan dengan karet tanpa proses radiasi. Peningkatan kualitas ini disebabkan oleh adanya peristiwa ikatan silang langsung antara poliisoprena karet lateks setelah diradiasi. Sedang pada karet alam biasa, ikatan tersebut membentuk jembatan sulfur. Balon udara dari lateks iradiasi mudah ditiup karena film karet dari lateks ini mempunyai modulus rendah, perpanjangan putus tinggi (1000–1100%) dan tegangan putusnya cukup tinggi, sehingga lebih kuat dan

# 4

## INDUSTRI PANGAN

aaronomy.org



Pangan merupakan salah satu dari tiga kebutuhan primer manusia. Dua kebutuhan primer lainnya adalah sandang dan papan. Dari asupan pangan itulah milyaran penduduk bumi mampu mempertahankan kehidupannya. Tanpa asupan pangan yang memadai, jalannya kehidupan akan terganggu. Begitu vital peran pangan dalam kehidupan, sehingga masalah ini menjadi isu menarik yang terus di bahas oleh berbagai kalangan. Tidak mengherankan jika ancaman terhadap ketahanan pangan mencuat menjadi isu global yang terus diupayakan solusinya.

Pangan merupakan permasalahan semua bangsa yang mendesak untuk ditindaklanjuti dan memerlukan langkah-langkah penanganan dengan pendekatan yang sistematis, terpadu dan menyeluruh. Upaya-upaya tersebut ditujukan untuk memenuhi hak-hak dasar setiap warga negara secara layak, sehingga mereka dapat menjalani dan mengembangkan kehidupan yang bermartabat [32]. Banyak aspek memiliki keterkaitan langsung dengan ketersediaan pangan dunia. Gangguan-gangguan terhadap kelangsungan aktivitas pertanian dapat memicu munculnya malapetaka kelaparan bagi penduduk bumi.

Ketahanan pangan merupakan persoalan global yang berkaitan erat dengan kelangsungan hidup manusia. Ketahanan pangan adalah

ketersediaan pangan dan kemampuan seseorang untuk mengaksesnya. Organisasi Kesehatan Dunia (*World Health Organization*, WHO) mensyaratkan tiga komponen utama terwujudnya ketahanan pangan, yaitu ketersediaan pangan, akses pangan, dan pemanfaatan pangan. Ketersediaan pangan adalah kemampuan seseorang untuk memiliki sejumlah pangan yang cukup untuk kebutuhan dasar. Akses pangan adalah kemampuan memiliki sumber daya, secara ekonomi maupun fisik, untuk mendapatkan bahan pangan bernutrisi. Pemanfaatan pangan adalah kemampuan dalam memanfaatkan bahan pangan dengan benar dan tepat secara proporsional [32].

Salah satu faktor yang mengancam ketahanan pangan dunia adalah lonjakan jumlah penduduk dunia yang berlangsung secara cepat. Jumlah populasi dunia terus meningkat dengan cepat sejak tahun 1950. Hanya diperlukan waktu 12 tahun untuk menambah jumlah penduduk dunia sebanyak satu miliar dari 5 miliar pada tahun 1987 menjadi 6 miliar pada tahun 1999. Pada bulan Agustus 2011, jumlah penduduk dunia mencapai angka hampir menyentuh 7 miliar, tepatnya 6,953 miliar jiwa. Jika dirata-rata pertumbuhan penduduk dunia antara tahun 1987 -1999, maka penduduk dunia bertambah rata-rata sebesar 78 juta jiwa per tahun. Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) memperkirakan, pada awal abad 22, jumlah penduduk dunia bisa mencapai 16,6 miliar jiwa [33].

Peningkatan jumlah penduduk dunia yang berlangsung begitu cepat akhirnya mendatangkan tantangan terhadap empat pokok permasalahan yang meliputi: penyediaan pangan dalam jumlah besar, layanan kesehatan yang memadai, persediaan energi yang mencukupi, dan lingkungan hidup yang harus tetap terjaga dari kehancuran total. Pangan merupakan kebutuhan pokok semua makhluk hidup. Oleh sebab itu, sektor pertanian merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari suatu negara, bahkan kelangsungan hidup hampir seluruh negara di dunia ini perlu ditopang oleh sektor pertanian. Guna membebaskan seluruh penduduk dunia dari kelaparan, produksi pangan harus ditingkatkan hingga mencapai dua kali lipat dibanding produksi pada

dasawarsa 2000-an. Ada kekhawatiran bahwa teknologi pangan akan semakin sulit digunakan untuk mengatasi persoalan pangan jika pertumbuhan penduduk tidak berhasil dikendalikan [34].

#### **4.1. KEGIATAN PASCAPANEN**

Dalam pengertian luas, panen didefinisikan sebagai rangkaian kegiatan pengambilan hasil budidaya berdasarkan umur, waktu, dan cara sesuai dengan sifat dan/atau karakter produk. Istilah panen paling umum digunakan dalam kegiatan bercocok tanam dan menandai berakhirnya kegiatan di sebuah lahan. Dalam bidang pertanian, inti dari panen adalah pemungutan atau pemetikan hasil sawah atau ladang. Namun, berbagai aspek terkait dengan panen perlu diperhatikan agar diperoleh hasil maksimal dari kegiatan bercocok tanam. Penanganan saat panen yang salah dapat berakibat pada kehilangan hasil yang umumnya disebabkan oleh penentuan waktu dan cara panen yang kurang tepat.

Panen merupakan pekerjaan akhir dari budidaya tanaman (bercocok tanam), namun merupakan awal dari pekerjaan pascapanen. Pascapanen merupakan seluruh rangkaian kegiatan yang dimulai dari panen hingga menjadi bahan siap dikonsumsi. Penanganan pascapanen merupakan upaya sangat strategis dalam rangka menyelamatkan hasil panen. Dalam bidang pertanian, istilah pascapanen diartikan sebagai serangkaian kegiatan yang meliputi pemanenan, penyimpanan sementara, pengolahan, hingga berakhir pada distribusi dan pemasaran hasil panen kepada konsumen.

Perlu penanganan yang tepat terhadap komoditas hasil panen. Karena itu, kegiatan pascapanen merupakan rangkaian penting dari panen. Penanganan hasil panen yang tidak tepat akan menyebabkan kerusakan produk yang berakibat pada kerugian bagi petani. Secara garis besar, ada dua kelompok kegiatan utama terkait dengan pascapanen, yaitu kegiatan primer dan sekunder. Pascapanen primer mencakup seluruh kegiatan dari sejak panen hingga menjadi bahan baku yang siap disimpan, dipasarkan atau diolah lebih lanjut. Pascapanen sekunder mencakup seluruh rangkaian kegiatan yang

## 4.2. KERUSAKAN KOMODITAS

Semua produk yang dihasilkan dari kegiatan pertanian berpotensi mengalami kerusakan yang berakibat menimbulkan kerugian. Kerusakan bahan pangan didefinisikan sebagai perubahan karakteristik bahan baik secara fisik maupun kimiawi yang tidak diinginkan, atau adanya penyimpangan dari karakteristik normal. Perubahan karakteristik fisik mencakup sifat organoleptik seperti warna, bau, tekstur, dan bentuk. Sedang perubahan karakteristik kimiawi meliputi perubahan komponen penyusunnya seperti kadar air, karbohidrat, protein, lemak, mineral, vitamin, pigmen dan sebagainya. Beberapa perubahan yang terjadi pada bahan mengindikasikan terjadinya penyimpangan, misal pembusukan buah dan sayuran dari tekstur keras menjadi lunak meskipun masih dalam keadaan segar, penggumpalan tepung, komoditas berjamur atau berketu, dan sebagainya [36].

Penyebab kerusakan komoditas pangan umumnya adalah mikrobial, enzimatik, dan kimia. Hasil pertanian sedikit banyak terinfeksi oleh mikrobia yang mendekomposisi kandungan bahan hasil pertanian tersebut hingga timbul bau dan senyawa toksik. Enzimik sering terjadi dalam bentuk penguraian lemak, karbohidrat, atau protein menjadi molekul yang lebih kecil yang menyebabkan pemudaran warna (*discoloration*) atau menjadi kecoklatan (*browning*).

Pada buah tertentu apabila dipotong atau diiris akan mengalami perubahan warna pada tempat yang dipotong menjadi kecoklat-coklatan. Warna hijau sayuran selama penyimpanan akan berubah menjadi kuning karena klorofilnya mengalami degradasi. Menguapnya air dari buah dan sayur-sayuran menyebabkan komoditas tersebut menjadi keriput sehingga tidak estetik dan tidak menarik bagi konsumen. Karena ancaman kerusakan, maka umbi ketela pohon tidak dapat disimpan lama dan patinya harus segera diekstrak. Demikian juga tebu yang baru dipanen harus segera digiling, karena cairan sukrosa di dalamnya akan segera terurai dan rusak.

gliserol dan asam lemak. Terurainya makromolekul ini menyebabkan penurunan tingkat keasaman bahan (pH), penyimpangan bau dan rasa, bahkan dapat menghasilkan racun berbahaya bagi manusia [38].

Kerusakan pada komoditas pangan dapat disebabkan oleh salah satu sebab atau gabungan dari beberapa penyebab sebagaimana diuraikan di atas. Karena itu, dalam penanganan komoditi pangan sejak mulai penen hingga sampai ke tangan konsumen, dapat terjadi susut dan kerusakan. Pada proses pengolahan awal (*pre processing*), susut dapat terjadi karena butir-butir banyak yang pecah, atau remuk, pelepasan kulit dan pemotongan yang berlebihan. Dalam proses transportasi, susut terjadi karena pembusukan, memar, atau kerusakan lainnya. Susut atau kerusakan dalam transportasi dipengaruhi oleh suhu yang tinggi atau rendah. Selama penyimpanan, susut dan kerusakan dapat disebabkan oleh insekta, jamur, bakteri, tikus, burung dan munculnya kecambah. Selama proses pengolahan dan pengepakan, susut dan kerusakan dapat terjadi karena pengupasan dan pemotongan berlebihan yang memicu terjadinya kontaminasi. Selama pemasaran komoditas dapat pula terjadi kontaminasi sehingga kualitasnya memburuk.

Dalam masa pascapanen, komoditas dapat mengalami susut yang besarnya bervariasi bergantung pada macam, jenis, varietas, dan cara penanganan komoditas tersebut. Kehilangan atau susut pascapanen ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Secara garis besar, penyusutan ini dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori yang masing-masing mempunyai implikasi ekonomis, yaitu susut kuantitatif, kualitatif, dan kehilangan kandungan nutrisi [35].

Susut kuantitatif adalah pengurangan berat yang dengan mudah dapat diukur secara kuantitatif, misal dengan penimbangan. Susut kualitatif adalah kehilangan yang sukar diukur secara kuantitatif dan biasanya hanya didasarkan pada pertimbangan subjektif. Sedang kehilangan nilai nutrisi merupakan kombinasi kehilangan kuantitatif dan kualitatif. Kehilangan kualitatif bahan pangan dapat disebabkan karena kerusakan, kontaminasi, dan perubahan-perubahan nutrisi. Suatu bahan pangan dianggap rusak apabila bahan tersebut

menunjukkan penyimpangan konsistensi dan tekstur dari keadaan normal dan tidak dapat diterima secara normal oleh pancaindra atau parameter lain yang biasa digunakan. Sebagai akibatnya, komoditas menjadi kurang menarik bagi calon konsumen.

Ketika para pemimpin dunia memperingatkan bakal terjadinya krisis pangan, produksi beberapa komoditas pangan dunia sebenarnya justru meningkat. Produksi dan volume perdagangan jagung dunia meningkat pesat pada periode 1960-1980. Puncaknya terjadi pada 1980 yang mencapai 82 juta ton atau 20% dari produksi dunia. Pada 2000, volume ekspor jagung mencapai 80 juta ton atau 13% dari produksi jagung dunia. Selama empat dekade produksi jagung terus meningkat dengan laju 2,9% per tahun, dan sebagian besar dari kenaikan tersebut disebabkan oleh peningkatan produktivitas, atau lebih lazim disebut dengan istilah revolusi hijau [39].

Panen jagung mencapai rekor produksi 781 juta ton pada 2007, yang berarti meningkat sebesar 89,35 juta ton dibanding tahun sebelumnya. Amerika Serikat, Cina, Brazil, Meksiko dan Argentina merupakan produsen utama jagung dunia. Dominasi Amerika Serikat terlihat menonjol dalam perdagangan jagung dunia dengan pangsa pasar mencapai 68%, diikuti Argentina 14% dan Cina 9%. Antara 2006 dan 2007, produksi gandum juga mengalami kenaikan hingga mencapai 9,34 juta ton.

Namun di lain pihak, terkait dengan ancaman krisis pangan dunia, pada tahun 1979 FAO menyatakan bahwa panen dan pascapanen dalam sistem agribisnis menjadi masalah besar kedua (*Second Generation Problem*). Masalah yang berhubungan dengan proses penyediaan pangan itu muncul karena terjadi kehilangan hasil panen yang besar, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Ekonomi global mengalami kerugian sebesar 750 miliar Euro atau US\$ 995 miliar setiap tahun. Fakta itu dilaporkan oleh FAO di Roma, Italia, pada hari Rabu tanggal 11 September 2013. Penyebabnya, sepertiga makanan di dunia atau 1,3 miliar ton makanan terbuang percuma. Dalam laporan yang diberi judul *The Food Wastage Footprint* itu disebutkan bahwa hampir 30% lahan pertanian memproduksi

makanan yang kemudian sia-sia. China menjadi wilayah utama di mana banyak makanan terbuang. Di China, Jepang dan Korea Selatan, diperkirakan setiap orang per tahun rata-rata membuang 80 kg sereal, terutama beras [40].

Persediaan pangan yang diperoleh dari hasil pertanian, peternakan dan perikanan biasanya tidak seluruhnya sampai ke tangan konsumen akhir karena bersifat mudah rusak (*perishable*). Sekitar 25% produksi pangan dunia rusak akibat gangguan serangga, mikroba dan tikus. Kehilangan komoditas pangan pascapanen di negara-negara kawasan Asia misalnya, diperkirakan mencapai 20-40% untuk buah dan sayuran, 20% untuk pepadian, dan sampai 50% untuk hasil perikanan. Pada pepadian, kacang-kacangan dan produk kering lain, kehilangan tersebut terutama disebabkan oleh gangguan hama gudang [41].

Dari beberapa hasil penelitian atau survei menunjukkan, persentase kehilangan hasil produk segar hortikultura mencapai 40%-50%. Hal ini didukung oleh sifat fisiologi produk tersebut yang mudah rusak. Oleh karena itu, produk tersebut membutuhkan penanganan yang lebih baik sejak panen hingga pascapanen. Variasi tata cara penanganan panen dan pascapanen sangat dipengaruhi oleh karakteristik produk dan/atau tanaman hortikultura sehingga membutuhkan penanganan, penyimpanan, pengangkutan dan kompetensi sumber daya manusia yang berbeda-beda [35].

Fakta lain yang teridentifikasi dalam laporan FAO adalah terbuangnya makanan oleh industri daging di Amerika Utara dan Amerika Latin. Sedang buah-buahan yang terbuang banyak terjadi di Eropa, Asia dan Amerika Latin. Di negara maju, makanan terbuang karena sikap konsumen yang berlebihan. Mereka membeli makanan terlalu banyak yang akhirnya tak termakan semua dan sisanya dibuang. Sedang di negara berkembang, penyebab utamanya adalah praktek pertanian yang tidak efisien. Penyebab lain adalah kurangnya fasilitas yang layak untuk menyimpan bahan makanan.

Di negara maju, makanan terbuang pada saat fase konsumsi, sedang di negara berkembang terjadi selama proses produksi. Di

mengubah sifat asal atau sifat-sifat kimia dari komoditi tersebut. Teknologi pascapanen merupakan proses awal penyiapan produk untuk diproses lebih lanjut agar siap dikonsumsi. Melalui sentuhan teknologi industri, pati dari ubi kayu dapat diubah menjadi gula-gula, sari buah-buahan diubah menjadi minuman, pati pada ketan diubah menjadi tape, gandum diubah menjadi mie instan, dan sebagainya.

#### 4.3. STERILISASI BAHAN PANGAN

Selain kerusakan hasil pertanian, pencemaran bahan makanan juga menjadi masalah serius bagi penduduk bumi. Makanan dapat mudah tercemar atau kandungan gizinya berkurang. Pencemaran itu bisa bersifat kimiawi maupun biologis. Pencemaran yang sifatnya kimiawi dapat disebabkan oleh pemakaian pestisida pada sayur-sayuran, tanaman pertanian atau gudang tempat penyimpanan hasil pertanian. Pemakaian pestisida ini dapat meninggalkan sisa-sisa (residu pestisida) pada komoditi tersebut. Bahan pencemar berupa timbal (Pb) dari emisi gas pembuangan kendaraan bermotor dapat menempel pada tanaman buah atau sayur dan jajanan anak yang dijual di pinggir jalan. Pencemaran kimiawi dapat juga berasal dari zat-zat kimia yang terdapat pada kemasan makanan yang dikonsumsi seperti kehadiran *styrofoam* yang sering digunakan orang untuk membungkus makanan. Bila berakumulasi dengan panas, senyawa kimia pada *styrofoam* dapat memunculkan zat yang bersifat karsinogenik sebagai pemicu kanker [37].

Pencemaran kimiawi lainnya berasal dari penggunaan zat aditif atau bahan tambahan makanan. Bahan ini umumnya diperlukan untuk menambah rasa, memberi warna, melembutkan tekstur dan mengawetkan makanan. Tidak jarang zat penawar racun (antibiotika), hormon, dan lain sebagainya pada makanan hewan yang dimaksudkan untuk menggemukkan hewan tersebut sebelum dipotong, akhirnya meracuni produk peternakan. Ikan dan hewan-hewan laut lainnya dapat tercemar karena berasal dari laut yang tercemar merkuri atau arsen. Produk pakan ternak yang tercemar dioxin pada akhirnya mengkontaminasi produk-produk peternakan seperti daging, susu,

oleh mikroba itu sendiri. Sedang faktor pengolahan berpengaruh terhadap perubahan mikroba awal sebagai akibat pengolahan bahan pangan, misalnya pemansan, pendingan, radiasi dan penambahan bahan pengawet.

Beberapa jenis atau spesies bakteri saproba dan bakteri patogen dapat tumbuh dan berkembang biak dengan baik jika makanan yang dihindangi itu mempunyai tingkat keasaman, kelembaban dan temperatur yang menguntungkan bagi kehidupan mereka. Selama berada di dalam bahan makanan, bakteri dapat memproduksi dua jenis toksin. Pertama adalah enterotoksin yang mengganggu alat-alat pencernaan. Kedua adalah neurotoksin yang mengganggu urat syaraf manusia [37].

Diantara racun-racun yang mencemari bahan makanan, ada sejenis racun yang dihasilkan oleh *Clostridium Botulinum* yang terdapat dalam makanan kalengan. Spora dari bakteri itu tidak mati dalam proses pasteurisasi. Dalam keadaan tertutup (anaerob) dengan suhu yang menguntungkan, spora-spora dapat tumbuh menjadi bakteri *Clostridium Botulinum* yang akan menghasilkan toksin yang tidak mengganggu alat pencernaan namun mengganggu urat saraf tepi. Makanan yang ditumbuhi *Aspergillus Flavus* dapat mengandung racun aflatoksin yang berbahaya bagi kesehatan. Keracunan juga dapat diakibatkan karena memakan udang terutama bagi orang dengan kondisi tubuh tertentu. Perlakuan panas yang tidak cukup pada pengalengan daging seringkali menyebabkan spora bakteri pembusuk jenis *Clostridia* anaerob mengalami germinasi.

Penyakit yang bersumber dari makanan tercemar (*foodborne diseases*) merupakan ancaman kesehatan global yang perlu diatasi. Produk pangan terutama yang berasal dari hewan, sering tercemar oleh berbagai jenis mikroba patogen dan parasit sehingga dapat menimbulkan penyakit, bahkan keracunan pada manusia. Menurut WHO, pada 1990 sekitar 25% kematian penduduk di negara-negara berkembang disebabkan oleh penyakit diare, dan diperkirakan sampai 70% kasus tersebut disebabkan oleh makanan yang tercemar. Karena itu, banyak negara telah menetapkan standar higienia yang sangat

larut dalam pelarut organik dan memiliki efek karsinogenik yang dapat memicu terjadinya kanker [38].

Teknik konvensional untuk disinvestasi yang ada saat ini masih belum sepenuhnya mampu membasmi sisa-sisa stadium telur, larva, pupa dan serangga dewasa *T. castaneum*. Radiasi pengion merupakan salah satu proses fisika yang dapat diterapkan untuk tujuan disinfestasi serangga [38]. Beberapa keunggulan teknik nuklir ini adalah aman, efektif dan tidak meninggalkan residu pada bahan yang disinari. Aplikasi iradiasi pada dosis 0,2-0,5 kGy dapat dimanfaatkan untuk disinfestasi serangga dengan berbagai jenis dan stadiannya hingga beberapa minggu setelah iradiasi.

Peraturan karantina mengharuskan agar buah-buahan dari negara tropis didisinfestasi terlebih dahulu sebelum masuk ke negara-negara tertentu, karena sering di dalam buah-buahan tersebut terdapat larva serangga yang dapat berkembang biak setelah tiba di suatu negara tujuan ekspor. Hal ini tentu dapat merupakan sumber bencana bagi pertanian di negara setempat. Di AS dan Australia, telah dilakukan penelitian dalam skala besar tentang pemakaian iradiasi untuk buah-buahan dengan dosis sampai 1 kGy dalam karantina buah-buahan. Dosis radiasi ini cukup efektif untuk membunuh seluruh stadium serangga hingga beberapa hari setelah perlakuan iradiasi. Sedang untuk membunuh serangga dewasa diperlukan dosis radiasi hingga 5 kGy [41].

Teknik iradiasi merupakan satu-satunya cara yang sesuai pada saat ini untuk menggantikan pemakaian fumigasi dengan bahan kimia *etilen dibromida* (EDB). Di AS, pemakaian bahan kimia itu sudah dilarang sejak Juli 1983, karena diketahui dapat memberi efek buruk bagi kesehatan. Penerimaan masyarakat terhadap aplikasi teknik nuklir untuk disinvestasi dalam rangka mengontrol antropoda perusak bahan makanan terus meningkat dari waktu ke waktu. Di Hawai, AS, iradiasi dipakai untuk mengontrol lalat buah pada 10 jenis buah dan empat jenis sayuran [41].

#### 4.4. MENGHAMBAT PERTUNASAN DAN PEMATANGAN

Pada mulanya penggunaan radiasi dalam bidang pangan ditujukan untuk membunuh organisme hidup yang menyebabkan terjadinya proses pembusukan atau kerusakan bahan pangan karena dapat mengganggu kesehatan konsumen. Namun dalam perkembangan berikutnya, teknik nuklir ternyata dapat dipakai juga untuk menekan perubahan fisiologis yang terjadi dalam komoditas pertanian sehingga memengaruhi daya simpannya, misal terjadinya pertunasan pada umbi-umbian dan proses pematangan pada buah-buahan yang sedang dalam transportasi maupun penyimpanan [45].

Bawang merah yang tidak diiradiasi hanya dapat disimpan secara optimal tanpa mengalami pertunasan dalam jangka waktu lama pada suhu mendekati 0°C dan kelembaban relatif 65-70%. Pertumbuhan tunas pada umbi-umbian seperti kentang, bawang bombai, dan bawang putih yang terlalu cepat dapat diatasi dengan menggunakan radiasi dosis rendah [63]. Dosis serap yang dibutuhkan untuk mencegah pertunasan pada bawang merah sangat bergantung pada kondisi penanaman, perbedaan varietas, kondisi perlakuan dan suhu penyimpanan pasca iradiasi. Umumnya, dosis serap yang sesuai untuk menghambat pertunasan bawang berkisar antara 20 - 150 Gy. Jika iradiasi dilakukan pada saat satu sampai dua bulan setelah pemanenan, maka dosis serap 20 - 70 Gy sudah cukup efektif untuk menekan pertunasan. Jika iradiasi dilakukan setelah waktu yang lebih lama, tunas-tunas akan tumbuh selama waktu tertentu tetapi kemudian menjadi layu dan mati, terutama jika dosis yang diberikan lebih dari 80 Gy. Bawang merah yang telah diiradiasi dapat disimpan selama lebih dari 8-9 bulan pada suhu kamar pada kondisi iklim sedang [46].

Umbi lapis yang lebih kecil membutuhkan dosis radiasi yang lebih besar. Seperti halnya pada bawang merah, dosis serap untuk menghambat pertunasan pada bawang putih bergantung pada jarak waktu pelaksanaan iradiasi setelah pemanenan. Dosis serap antara 20 - 60 Gy cukup efektif menekan pertunasan jika iradiasi dilaksanakan segera setelah pemanenan. Namun jika iradiasinya dilaksanakan pada

iradiasi pepaya adalah antara 750 hingga 1000 Gy, diberikan pada saat pepaya dalam kondisi pra-klimaterik [47].

#### **4.5. PENGAWETAN BAHAN PANGAN**

Kegiatan pengamanan hasil panen tidak hanya ditujukan untuk membuat bahan pangan mampu bertahan lama, tetapi juga untuk mencegah terbentuknya racun akibat cemaran mikroba patogen yang berasal dari lingkungan. Berbagai cara pengawetan pangan konvensional yang telah dikembangkan adalah pengeringan, pembekuan, penggaraman dan fermentasi. Seiring dengan perjalanan waktu dan perkembangan penguasaan teknologi oleh umat manusia, maka teknik pengawetan bahan panganpun meningkat.

Semua bahan pangan mentah merupakan komoditas yang mudah rusak. Sejak dipanen, bahan pangan mentah, baik hasil tanaman maupun hewan, akan mengalami kerusakan melalui serangkaian reaksi biokimiawi. Kecepatan kerusakan sangat bervariasi, dapat terjadi secara cepat hingga relatif lambat. Agar hasil panen dapat bertahan lama selama penyimpanan, maka diperlukan suatu teknik untuk pengawetannya [44].

Teknik pengawetan bahan pangan secara konvensional bisa dilakukan secara fisika (pemanasan, pendinginan, pembekuan, dan penekanan) maupun dengan penambahan bahan kimia (penggaraman, penambahan bahan pengawet kimia, dan antibiotik). Kedua teknik tersebut umumnya dilakukan terutama untuk mengawetkan makanan olahan. Namun dalam prakteknya, kedua pendekatan tadi seringkali memiliki kendala yang tidak dapat dihindarkan. Penyimpanan dan pengawetan bahan pangan sering menyebabkan perubahan nilai gizi yang sebenarnya tidak diinginkan.

Bahan makanan dapat menjadi busuk karena di dalamnya terdapat bakteri pembusuk yang terus berkebang biak. Pengawetan bahan makanan dimaksudkan untuk menghindari atau menunda proses pembusukan. Salah satu caranya adalah dengan teknik iradiasi terhadap bahan makanan tersebut. Untuk mengatasi kendala dalam pengawetan bahan pangan, teknik radiasi telah menunjukkan potensi

Internasional yang beranggotakan wakil-wakil dari FAO, Badan Tenaga Atom Internasiona (IAEA) dan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) yang tergabung dalam *Joint Expert Committee on Food Irradiation* (JECFI). Komite ini bertugas untuk mengevaluasi nilai pangan iradiasi dan memberikan masukan ke *Codex Alimentarius Commission* (CAC). Kajian teknis yang dilakukan Komite meliputi segala aspek yang berkaitan dengan kondisi iradiasi (meliputi dosis radiasi, suhu selama proses, dan kadar oksigen lingkungan), jenis, komposisi dan sifat pangan, teknik pengemasan dan evaluasi pangan antara sebelum dan setelah proses iradiasi.

Dalam teknologi iradiasi bahan pangan, dosis radiasi yang diberikan dinyatakan dalam dosis serap yang diberi satuan Gray dan disingkat Gy. Untuk ukuran dosis yang lebih besar dinyatakan dalam satuan kilo Gray (kGy, 1 kGy = 1.000 Gy). Berdasarkan data yang sangat lengkap, pada bulan November 1980 Komite menyimpulkan bahwa bahan makanan yang diradiasi hingga dosis 10 kGy aman untuk dikonsumsi. Komite menyetujui dan merekomendasikan ke CAC untuk mengesahkan Standar Umum Pangan Iradiasi, dan Tata Cara Pengoperasian Fasilitas Iradiasi Pangan. Pada 1983 standar iradiasi pangan dunia disahkan sebagai acuan bagi negara-negara anggotanya. Penggunaan teknik iradiasi dalam bidang pertanian dan pangan ini ternyata memberikan banyak keuntungan, antara lain [45]:

- Dapat memperbaiki mutu pangan.
- Meningkatkan higienitas bahan pangan.
- Memberantas serangga perusak bahan pangan.
- Menurunkan residu zat kimia pada makanan.

Perkembangan terakhir tentang iradiasi pangan terjadi setelah adanya *press release* WHO pada tanggal 19 September 1997 yang menyatakan bahwa batas dosis maksimum sampai 10 kGy yang ditetapkan pada 1980 seharusnya dihapus. Berdasarkan bukti hasil penelitian dan alasan ilmiah yang kuat, penerapan teknologi radiasi bahan pangan sampai dosis 75 kGy masih tetap aman, selama pangan yang diradiasi tidak mengalami perubahan mutu dan citarasa yang berarti. Kesimpulan ini merupakan hasil evaluasi para pakar FAO,

WHO dan IAEA tentang iradiasi pangan dosis tinggi yang diadakan di Jenewa, Swiss, pada tanggal 15-20 September 1997. Dengan adanya harmonisasi peraturan antar negara, peluang untuk memanfaatkan teknologi iradiasi pangan secara komersial akan semakin terbuka luas.

Dalam prakteknya, ada berbagai nilai dosis radiasi yang digunakan dalam kegiatan iradiasi bahan pangan. Berdasarkan nilai dosis serap yang digunakan, aplikasi teknik nuklir untuk iradiasi pangan dibedakan menjadi tiga jenis kegiatan sebagai berikut [42]:

- Dosis rendah ( $<1$  kGy), biasanya dipakai untuk mencegah pertunasan pada rimpang dan umbi-umbian (0,05–0,15 kGy), menunda proses pematangan buah (0,1–1,15 kGy), membunuh serangga (0,2–1 kGy), dan membunuh parasit daging (0,1 – 0,3 kGy).
- Dosis sedang (1–10 kGy), biasanya dipakai untuk menurunkan kandungan mikroba dengan proses pasteurisasi (0,5–10 kGy), dan membunuh bakteri patogen (3–10 kGy).
- Dosis tinggi ( $>10$  kGy), biasanya dipakai untuk membunuh semua mikroba yang ada dengan proses sterilisasi (10–50 kGy).

Pembusukan mikrobiologis, misal pada arbey dan jamur merang, dapat ditekan dengan menggunakan dosis radiasi berkisar antara 1,0-1,25 kGy. Iradiasi dengan dosis 1,0-2,0 kGy dapat memperpanjang masa simpan sayuran beku sekaligus mengontrol mikroba patogen yang ada. Sedang mikroba pembusuk daging, ikan dan hasil laut lain umumnya peka terhadap iradiasi dosis sedang (2,0-10 kGy). Kombinasi antara perlakuan pengemasan, pembekuan dan iradiasi dengan dosis 3,0-5,0 kGy dapat menghilangkan sebagian besar mikroba pembusuk yang mencemari daging dan hasil laut yang telah dibekukan, sehingga daya simpannya pada suhu rendah dapat bertahan lebih lama [44].

Iradiasi pada makanan kering di dalam kemasan yang memenuhi persyaratan dengan dosis sedang antara 3-5 kGy tidak menyebabkan kerusakan tekstur, komposisi kimia seperti vitamin, protein dan kandungan nutrisi lainnya. Jenis makanan yang diawetkan meliputi rempah-rempah, biji kopi, tepung terigu, jamur dan pangan

# 5

## INDUSTRI DESALINASI



Persediaan air di muka bumi ini relative konstan, sehingga peningkatan pemanfaatan air dapat mengganggu kualitas air tersebut. Kualitas air akan menurun apabila gangguan yang diterimanya sudah melampaui batas kemampuannya untuk membersihkan dirinya sendiri secara alamiah (*self purification*). Karena penurunan kualitas ini, maka banyak sumber daya air yang tidak lagi memenuhi standar baku mutu air sehat. Standar baku mutu untuk air berbeda-beda bergantung pada tujuan penggunaan air tersebut. Air untuk minum tentu berbeda standar baku mutunya dengan air untuk mandi atau keperluan industri dan pertanian.

Dari segi kualitas, banyak sumber persediaan air bersih yang saat ini sudah tercemar oleh berbagai jenis limbah, baik domestik, urban maupun industri. Karena tercemar, kualitas air tersebut tidak memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan sebagai air konsumsi. Ada empat penggolongan air menurut peruntukannya, yaitu [48]:

- Golongan A, yaitu air yang dapat digunakan sebagai air minum secara langsung, tanpa pengolahan terlebih dahulu.
- Golongan B, yaitu air yang dapat digunakan sebagai bahan baku air minum.
- Golongan C, yaitu air yang dapat digunakan untuk keperluan perikanan dan peternakan.

- Golongan D, yaitu air yang dapat digunakan untuk keperluan pertanian, usaha di perkotaan, industri dan pembangkit listrik tenaga air.

Keberadaan air tidak selalu sesuai dengan yang dikehendaki oleh penggunaannya. Pada saat diperlukan, air tidak selalu ada atau tempatnya berada di lokasi yang jauh dari penggunaannya. Kemungkinan lain, air justru datang dalam jumlah yang terlalu banyak sehingga menimbulkan banjir. Bagi manusia, air bisa menjadi sahabat, tapi di lain waktu bisa menjadi musuh yang berbahaya. Pandangan yang menyatakan bahwa saat ini air semakin langka tidak sepenuhnya benar. Bisa jadi hanya pengelolaan sumber daya itu saja yang selama ini tidak memperhatikan aspek kelestarian lingkungan, sehingga ketika air itu datang dalam jumlah banyak (banjir) bumi tidak mampu menampungnya, dan air segera mengalir kembali ke laut. Jadi yang mendesak untuk dibenahi adalah cara pengelolaan sumber daya air yang baik dan benar sehingga air akan selalu menjadi sahabat dalam kehidupan [49].

### **5.1. AIR UNTUK KEHIDUPAN**

Banyak masalah kehidupan memiliki keterkaitan baik langsung maupun tidak langsung dengan persediaan air tawar. Ketahanan pangan harus ditopang oleh aktivitas pertanian yang memerlukan air untuk irigasi. Kesehatan penduduk akan terganggu jika kebutuhan air bersih tak terpenuhi. Proses pembangkitan energi memerlukan suplai air yang tidak sedikit. Gangguan terhadap lingkungan akan diikuti oleh terjadinya gangguan terhadap persediaan sumber daya air. Itulah sebabnya, dalam merumuskan 25 jenis kajian yang dituangkan dalam Visi Indonesia 2030, ketersediaan air merupakan salah satu unsur yang diperhitungkan bersama dengan potensi pangan dan energi (*food, energy and water*) [50].

Begitu strategisnya peran air dalam kehidupan, banyak daerah pemukiman berkembang menjadi kota yang ramai penduduknya muncul pada muara sungai. Kota Jakarta misalnya, berdiri pada muara sungai Ciliwung, kerajaan Majapahit mengandalkan sungai Bengawan

Tanpa sifat itu, air yang berada dalam jaringan tubuh makhluk hidup maupun yang terdapat di laut, sungai, danau dan badan air lainnya akan berada dalam keadaan uap atau padat (es) pada suhu yang sesuai dengan kehidupan. Mengingat sekitar 60% - 90% bagian sel makhluk hidup adalah air, dan aktivitas metaboliknya mengambil tempat di larutan air, maka kehidupan di muka bumi tidak akan pernah ada apabila air yang terdapat dalam sel hidup itu berada dalam fasa gas atau padat [48].

Daya dukung air terhadap kehidupan juga diperlihatkan oleh sifat dimana perubahan suhu air berlangsung lambat, sehingga air memiliki sifat sebagai penyimpan panas yang sangat baik. Karena sifat itu, air tidak akan mudah menjadi panas atau dingin dalam selang waktu singkat. Perubahan suhu air yang berlangsung sangat cepat (mendadak) mungkin tidak dapat ditolelir oleh tubuh dan dapat memicu *stress* pada makhluk hidup. Sebaliknya, perubahan suhu air dalam sel tubuh yang berlangsung lambat dapat ditolelir tubuh sehingga menghindari terjadinya *stress* pada makhluk hidup. Perubahan suhu air yang berjalan lambat juga memelihara suhu bumi sehingga tetap hangat sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan oleh makhluk hidup.

Perubahan fasa air melibatkan penyerapan atau pelepasan panas dalam jumlah yang tinggi. Perubahan fasa adalah perubahan benda dari keadaan padat menjadi cair, dari keadaan cair menjadi gas (padat-cair-gas) atau sebaliknya (gas-cair-padat). Air memerlukan penyerapan panas yang tinggi untuk proses penguapan, yaitu proses dimana air berubah menjadi uap. Sebaliknya, air akan mengeluarkan panas yang tinggi dalam proses kondensasi, yaitu proses dimana uap berubah menjadi air kembali. Sifat ini merupakan salah satu faktor utama dalam meteorologi yang memungkinkan terjadinya penyebaran panas di muka bumi sehingga bumi terasa hangat dan cocok untuk mendukung kehidupan.

Sifat lain dari air yang juga penting dalam mendukung kehidupan adalah bahwa air dapat berperan sebagai pelarut yang baik. Air mampu melarutkan berbagai jenis senyawa kimia. Karena

maka gumpalan es yang terbentuk di permukaan badan air (laut maupun danau) akan langsung tenggelam ke dasar air, disusul air yang ada di permukaan membeku lagi dan tenggelam lagi, demikian seterusnya sehingga seluruh danau atau laut terisi atau menjadi es. Jika hal itu terjadi maka kehidupan akuatik di dalamnya tidak akan mampu menyesuaikan diri dengan kondisi ini, sehingga kehidupan akan punah. Dikaitkan dengan sifat anomali air ini, jelas keberadaan sumber daya air tidak akan pernah dapat digantikan oleh sumber daya alam lainnya.

## **5.2. KRISIS AIR BERSIH**

Perkembangan jumlah penduduk di permukaan bumi yang berlangsung sangat pesat menyebabkan kebutuhan akan air bersih juga meningkat dengan pesat pula. Untuk memenuhi kebutuhan hidup penduduk bumi dalam bentuk suplai makanan, juga diperlukan banyak tambahan air guna mendukung aktivitas pertanian. Peningkatan jumlah penduduk juga menuntut peningkatan jumlah persediaan barang kebutuhan hidup manusia, yang mendorong laju industrialisasi dalam berbagai sektor. Aktivitas inipun tentu akan meningkatkan penggunaan sumber daya air. Inilah pokok permasalahan umat manusia yang bakal menimbulkan krisis berkaitan dengan terbatasnya persediaan cadangan air bersih di muka bumi.

Perlu diketahui, untuk menghasilkan satu kilogram daging rata-rata diperlukan 16.000 liter atau 16 meter kubik air (1 meter kubik = 1.000 liter). Produksi satu kilogram tekstil membutuhkan 11 meter kubik air. Dalam bidang pertanian, produksi satu kilogram beras harus didukung dengan persediaan tiga meter kubik air. Intinya dapat disimpulkan bahwa ketahanan air dan pangan tidak bisa dipisahkan. Tanpa persediaan sumber daya air yang mencukupi, ketahanan pangan pasti terancam. Kegiatan industri dalam rangka memproduksi barang-barang kebutuhan manusia juga memerlukan banyak air. Untuk membuat satu metrik ton batang baja misalnya, diperlukan 80 metrik ton air, dan diperlukan 190 metrik ton air lagi untuk

tentang akan munculnya krisis air bersih skala dunia dimasa-masa mendatang, dengan salah satu penyebabnya adalah peningkatan aktivitas industri yang diiringi oleh meningkatnya kualitas maupun kuantitas pencemaran dari industri tersebut. Meski kini sudah banyak kalangan lembaga swadaya masyarakat (LSM) yang melakukan advokasi terhadap masalah-masalah lingkungan hidup, namun gerakan advokasi itu belum akan bisa memengaruhi kebijakan lingkungan karena masih kalah kuat dibandingkan kelompok bisnis dan industri dalam memengaruhi kebijakan pemerintah [53].

Bersamaan dengan peringatan Hari Air Dunia, PBB memaparkan sebuah laporan yang sangat mengejutkan. Dalam laporan berjudul "Air yang Sedang Sakit" yang disusun oleh Program Lingkungan Hidup PBB (UNEP, *United Nation Environment Program*) disebutkan, bahwa jumlah orang yang meninggal dunia akibat polusi air setiap tahun ternyata jauh lebih banyak dibandingkan jumlah korban dari peperangan atau aksi-aksi kekerasan lainnya. Penyebab utama dari kematian itu adalah karena sekitar dua milyar ton limbah air, termasuk limpasan pupuk kimia, air buangan dan limbah industri, dilepas ke lingkungan setiap hari. Buangan limbah itu akhirnya mengancam lingkungan hidup dan menyebabkan berjangkitnya wabah penyakit di muka bumi. Karena itu, 208 negara di dunia telah mengalami kelangkaan air, bahkan 56 negara lainnya diperkirakan akan menyusul masuk daftar tambahan pada tahun 2025. Meluasnya konflik memperebutkan air bersih merupakan masalah yang saat ini dihadapi oleh negara-negara yang mengalami kelangkaan air [53].

*World Water Council for the 21<sup>st</sup> Century* melaporkan bahwa suplai air untuk konsumsi dunia, baik sebagai air minum maupun untuk irigasi daerah pertanian, ternyata sudah tidak mencukupi lagi. Dilaporkan juga bahwa di masa mendatang, kebutuhan penduduk bumi terhadap air naik hingga 40 persen. Sementara itu, ekosistem air di berbagai belahan dunia justru mengalami penurunan sehingga kualitas air memburuk di negara-negara miskin yang dari segi ekonomi tidak memiliki biaya dan dari segi teknologi tidak memiliki kemampuan untuk mengolah kembali ekosistem yang terlanjur rusak.

daerah perkotaan mencapai jumlah 3,3 milyar jiwa. Pertumbuhan jumlah penduduk di daerah perkotaan yang berlangsung sangat cepat itu tentu akan membawa konsekuensi semakin beratnya beban pemerintah suatu negara dalam menyediakan berbagai kebutuhan sosial dasar penduduk, salah satunya adalah persediaan air bersih [53].

Sekitar 830 juta manusia yang menempati kawasan-kawasan miskin dan kumuh di negara-negara berkembang di kawasan Asia-Pasifik tidak memiliki akses untuk memperoleh air minum. Sedang dua milyar jiwa lainnya bakal menghadapi masalah sanitasi lingkungan yang tidak memadai sehubungan dengan sulitnya memenuhi kebutuhan air bersih. Kondisi buruk ini tentu akan memunculkan masalah kesehatan bagi penduduk setempat.

Di kota-kota besar, pasokan air bersih berkurang hingga 40 persen karena berbagai sebab, mulai dari pencemaran hingga buruknya pelayanan oleh pemerintah. Mahalnya air bersih juga telah menyebabkan banyak penduduk miskin kesulitan untuk memenuhi kebutuhan akan air bersih. Harga air bersih di Bolivia misalnya, naik sampai 300% setelah perusahaan multinasional dari California mengambil alih pengelolaan air bersih. Keluarga-keluarga di Bolivia kini harus menyisihkan seperempat penghasilannya untuk membeli air bersih sehingga biaya hidup menjadi lebih mahal, dan bisa jadi sangat memberatkan kelompok masyarakat kalangan bawah.

### **5.3. DESALINASI AIR LAUT**

Dari 1.445 juta km kubik air yang menyelimuti planet bumi ini, sebanyak 97,5 persen merupakan air asin (laut, sumber air asin dan danau air asin), sisanya sebanyak 2,5 persen merupakan air tawar. Dari jumlah air tawar yang sangat sedikit itu, kira-kira hanya satu persen dari total persediaan air dunia yang dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai air minum, dan sebagian besarnya berada dalam keadaan beku di daerah kutub [52].

Melalui sentuhan teknologi, air laut yang merupakan bagian terbesar dari persediaan air di muka planet bumi ini, sebenarnya

dikonsumsi sebagai air minum.

Di beberapa negara, teknologi desalinasi air laut sudah cukup berkembang dengan pesat. Ada beberapa jenis teknologi yang diterapkan untuk proses desalinasi melalui proses evaporasi. Di kota Las Palmas, Spanyol, misalnya, air laut dihilangkan rasa asinnya melalui penguapan. Uap air selanjutnya mengalami beberapa tahap pemulihan kondensasi dengan cara mengurangi temperatur dan tekanan, sehingga uap air tadi mengembun dalam bentuk air tawar. Di kota ini, air hasil desalinasi mampu mensuplai sekitar 76 persen (hingga 80 persen di musim kering) kebutuhan air minum penduduk setempat.

#### **5.4. KOGENERASI PANAS NUKLIR**

Kogenerasi merupakan teknologi sistem pembangkitan tenaga listrik dan uap panas secara simultan yang keduanya dibutuhkan dalam aktivitas industri. Kebutuhan listrik dan panas dalam suatu proses produksi dapat dipenuhi dengan cara yang lebih efisien dengan teknik kogenerasi. Teknik ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar yang cukup tinggi. Tanpa sistem kogenerasi, efisiensi pemanfaatan energi dalam bahan bakar umumnya hanya berkisar antara 40-50 persen. Dengan teknik kogenerasi, efisiensi thermal penggunaan bahan bakar dapat ditingkatkan hingga 85 persen. Efisiensi setinggi itu dapat dicapai pada pembangkit listrik berbahan bakar gas. Pembangkit jenis ini banyak digunakan di pabrik untuk peleburan besi, pabrik tekstil serta memenuhi kebutuhan panas hotel [57].

Teknologi kogenerasi sebetulnya sudah mulai digunakan sejak sebelum 1960. Setelah 1960, penggunaannya semakin berkembang, dan saat ini perkembangannya semakin pesat karena unjuk kerja dan keekonomiannya semakin baik. Pasar pengguna teknik kogenerasi adalah industri yang memerlukan suplai energi dalam bentuk listrik dan panas secara simultan. Selain pasar pengguna di atas, diperkirakan juga terdapat peluang pasar kogenerasi pada berbagai Industri lain, seperti industri makanan, pengilangan kelapa sawit,

# 6

## INSPEKSI TEKNIS INDUSTRI



Sebelum penemuan mesin uap, umat manusia memenuhi kebutuhan energinya dengan bahan-bahan organik melalui rantai makanan yang disediakan oleh alam. Energi tersebut dipakai dalam aktivitas sehari-hari seperti mengolah ladang pertanian dengan cara mencangkul dan mempekerjakan binatang ternak. Sementara itu, hasil pertaniannya diangkut dan didistribusikan menggunakan kendaraan yang juga ditarik oleh binatang ternak. Hasil pertanian itu diproses atau digiling menggunakan tenaga kincir angin. Untuk keperluan transportasi darat, mereka masih mempekerjakan binatang, untuk transportasi sungai mengandalkan kekuatan otot untuk mendayung perahu, sedang untuk transportasi laut mengandalkan energi angin melalui kapal layar [61].

Penemuan mesin uap ternyata mampu mengubah secara drastis sistem penyediaan energi dalam kehidupan. Penemuan itu merupakan pemicu munculnya revolusi industri di Inggris pada pertengahan abad ke-18. Perubahan yang terjadi di Inggris itu merupakan perubahan dalam cara memproduksi barang-barang yang semula mengandalkan tenaga manusia dan hewan (tenaga organik) beralih ke penggunaan tenaga yang dihasilkan oleh mesin-mesin industri, terutama mesin uap (tenaga teknis). Revolusi Industri merupakan titik awal terjadinya perubahan sistem produksi barang dalam kegiatan industri. Berkat

oleh lubang kecil (*pitting*) dengan diameter hanya sekitar 4 mm. Menurut catatan, pesawat Boeing pernah juga mengalami beberapa kecelakaan akibat korosi seperti ini. Pada 1982, roda-roda depan dua pesawat Sie Harrier milik Angkatan Laut Kerajaan Inggris yang baru saja menjalankan misi perang di Kepulauan Falklands (Malvinas) mengalami patah. Hasil penyelidikan terhadap pesawat itu mendapatkan bahwa korosi galvanis telah terjadi antara lingkaran roda (*wheel hub*) dari paduan magnesium dan bantalan (*bearing*) dari baja tahan karat.

Korosi adalah gejala destruktif yang dapat memengaruhi hampir semua jenis logam. Karat adalah istilah yang sering dikaitkan dengan korosi yang dikhususkan pada besi. Meski besi bukan merupakan jenis logam pertama yang dimanfaatkan manusia, namun logam ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan oleh masyarakat dalam kehidupan sehari-hari, sehingga tidak mengherankan jika istilah korosi dan karat hampir disamakan dalam kehidupan sehari-hari. Salah satu jenis korosi disebabkan oleh adanya kotoran dalam logam. Korosi jenis lainnya dapat terjadi pada logam sangat murni yang secara kebetulan menyerap molekul oksigen dari udara. Apabila terdapat lapisan asam dalam embun, maka molekul oksigen itu akan menangkap elektron dan berubah menjadi ion oksigen. Logam murni tersebut akan bertindak sebagai sel udara dan terkorosi [63].

Pengalaman mengenai korosi logam diperoleh umat manusia melalui jenis korosi galvanis di lingkungan air laut, sebagaimana hal itu dilaporkan terjadi pada kapal-kapal perang milik Angkatan Laut Kerajaan Inggris. Namun kini umat manusia berhasil mengenali berbagai jenis penyebab korosi yang dapat memengaruhi logam, salah satunya adalah korosi yang dipicu oleh adanya pencemaran udara di lingkungan.

Sebagian besar batubara mengandung unsur sulfur/belerang (S) dan akan berubah menjadi sulfur oksida ( $SO_x$ ) yang terlepas ke lingkungan sewaktu batubara itu dibakar. Gas asam seperti  $SO_x$  menghadapi dua kemungkinan selama berada di udara. Pertama, sebagian  $SO_x$  akan jatuh dan perlahan-lahan terserap oleh tanah dan

tanaman, sebelum keduanya mengalami proses oksidasi oleh energi sinar matahari. Peristiwa ini disebut sebagai pengendapan kering (*dry deposition*). Sebagian besar gas-gas asam tetap berada di udara selama beberapa hari sehingga mengalami kemungkinan kedua. Dengan bantuan energi sinar matahari, gas-gas asam tadi akan mengalami proses oksidasi, sehingga bahan-bahan tadi dalam udara dapat membentuk polutan sekunder berupa butiran  $H_2SO_4$  serta garam sulfat. Semuanya dapat terlarut dalam butiran-butiran air awan dan dapat jatuh ke bumi bersamaan dengan turunnya air hujan. Proses kedua ini disebut pengendapan basah (*wet deposition*) yang lebih populer dengan sebutan hujan asam (*acid rain*). Selain terbawa hujan, polutan sekunder juga dapat jatuh ke bumi dalam bentuk embun dan partikel asam [64].

Asam sulfat yang terkandung di dalam embun bersifat sangat reaktif, mudah bereaksi (memakan) benda-benda lainnya sehingga menyebabkan kerusakan, seperti proses korosi serta proses kimiawi lainnya. Dalam kehidupan sehari-hari, korosi dapat kita jumpai terjadi pada berbagai jenis logam. Bangunan-bangunan maupun peralatan elektronik yang memakai komponen logam seperti seng, tembaga, besi-baja dan sebagainya semuanya dapat terserang oleh korosi ini. Seng untuk atap dapat bocor karena termakan korosi. Besi untuk pagar sangat mudah mengalami korosi. Jembatan dari baja maupun badan mobil dapat menjadi rapuh karena korosi.

Faktor yang berpengaruh terhadap korosi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu yang berasal dari bahan itu sendiri dan dari lingkungan. Faktor dari bahan meliputi kemurnian bahan, struktur bahan, bentuk kristal, unsur-unsur kelumit yang ada dalam bahan, teknik pencampuran bahan dan sebagainya. Faktor dari lingkungan meliputi tingkat pencemaran udara, suhu, kelembaban, curah hujan, keberadaan zat-zat kimia yang bersifat korosif dan sebagainya. Bahan-bahan korosif (yang dapat menyebabkan korosi) terdiri atas asam, basa serta garam, baik dalam bentuk senyawa anorganik maupun organik [65].

untuk perbaikan struktur maupun peralatan yang terkorosi. Sedang kerugian tak langsung jumlahnya mungkin lebih besar karena terhentinya aktivitas produksi selama perawatan dan perbaikan. Beberapa negara telah berusaha menghitung biaya korosi nasional dengan cara yang berbeda-beda, umumnya jatuh pada nilai yang berkisar antara 1,5 - 5,0 persen dari GNP. Para praktisi saat ini cenderung sepakat untuk menetapkan biaya korosi sekitar 3,5 persen dari GNP [63].

Peristiwa korosi pada logam, terutama besi, merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, namun dapat dihambat maupun dikendalikan untuk mengurangi kerugian dan mencegah dampak negatif yang diakibatkannya. Dengan penanganan ini umur produktif alat pada suatu industri maupun fasilitas umum lainnya menjadi panjang sesuai dengan yang direncanakan, bahkan dapat diperpanjang untuk memperoleh nilai ekonomi yang lebih tinggi. Upaya penanganan korosi diharapkan dapat banyak menghemat biaya operasional, sehingga berpengaruh terhadap efisiensi dalam suatu kegiatan industri. Sebaliknya, jika masalah ini dibiarkan, maka kerugian yang timbul akan semakin besar, bahkan menelan korban jiwa [63].

## **6.2. KECELAKAAN INDUSTRI**

Perangkat industri yang bekerja pada temperatur tinggi sangat potensial mengalami kerusakan, bahkan memicu ledakan. Peristiwa ini sringkali menjadi penyebab terjadinya kebakaran instalasi seperti kilang minyak atau rusaknya piranti-piranti industri semacam ketel uap (*boiler*) untuk pembangkit tenaga. Ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan itu dilakukan dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa. Sumber panasnya berasal dari pembakaran bahan bakar, umumnya batubara. Pembakaran dilakukan secara terus-menerus di dalam ruang bakar dengan cara mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan ketel adalah uap sangat panas (*superheat*) dengan tekanan dan temperatur tinggi [65].

mudah larut. Faktor inilah yang mendorong terjadinya korosi pada pipa-pipa ketel uap. Korosi ini biasa terjadi pada bagian pipa yang aliran fluida di dalamnya mengalami gerak turbulensi seperti aliran yang terjadi pada lekukan atau sambungan pipa berbentuk siku. Korosi yang terus berlangsung akan mengakibatkan terjadinya pengikisan dinding pipa dan laju pengikisanpun semakin cepat karena dipicu oleh sifat turbulensi aliran fluida di dalamnya. Sebagai akibatnya, ketebalan pipa berangsur-angsur menipis akibat peristiwa itu. Korosi ini sangat berbahaya karena pada suatu saat pipa yang terkorosi dapat pecah dan meledak akibat tekanan fluida yang tinggi pada sisi pipa yang menipis [65].

Pengalaman selama ini menunjukkan bahwa dunia industri terus larut disibukkan oleh rutinitas produksi. Karena minimnya pengetahuan, kerusakan perangkat terus berlangsung tanpa ada pengawasan yang memadai, sehingga musibah dengan korban jiwa pun tak terelakkan. Sebuah pipa berisi gas hidrokarbon bocor pada tanggal 5 Mei 1988. Pipa gas milik Norco tersebut kemudian meledak dan terbakar, tujuh orang tewas dan 42 luka-luka. Sementara 2.800 warga diungsikan dari tempat tersebut. Kerugian ditaksir mencapai US\$ 706 juta. Beberapa puing hasil ledakan terlempar hingga delapan kilometer dari pusat ledakan.

Tanggal 6 Juli 1988, perusahaan Piper Alpha Platform yang memproduksi gas alam, minyak mentah, dan *liquified petroleum gas* (LPG) di Laut Utara terbakar dan meledak. Ledakan yang terjadi di sekitar 110 kilometer dari Aberdeen, Skotlandia, itu menewaskan 167 orang, sementara 30 mayat tak pernah ditemukan. Peristiwa tersebut dianggap tragedi ledakan kilang minyak lepas pantai paling parah dengan total kerugian US\$ 3,4 miliar. Penyebab tragedi adalah kebocoran gas dari pompa yang belum selesai diperbaiki.

Musibah-musibah seperti dikemukakan di atas hanyalah beberapa contoh dari sekian banyak musibah yang pernah terjadi yang umumnya dipicu oleh ledakan pipa dan menimpa industri energi. Musibah serupa bisa juga terjadi dan menimpa industri-industri lain termasuk industri kimia seperti yang akan dikemukakan berikut ini.

Kecelakaan industri sebagaimana diuraikan di atas hanyalah beberapa contoh kegagalan teknologi yang dimanfaatkan manusia untuk mengatasi berbagai permasalahan dalam kehidupan. Masih banyak kecelakaan industri lainnya yang berdampak serius baik terhadap kesehatan maupun ancaman kehidupan, seperti kecelakaan dalam industri energi, manufaktur, konstruksi dan sebagainya. Ada beberapa faktor yang dapat berperan sebagai penyebab timbulnya kecelakaan industri yang perlu mendapatkan perhatian, salah satunya adalah faktor operasi yang mencakup masalah perawatan dan inspeksi teknis [63].

### 6.3. UJI TAK MERUSAK

Inspeksi teknis pada suatu fasilitas industri dimaksudkan untuk mengetahui atau meyakinkan bahwa instalasi yang dioperasikan dalam kondisi aman dan keselamatan kerja yang memenuhi syarat telah diproteksi dengan sistem yang berfungsi dengan baik. Sebagai bagian dari inspeksi, pengukuran ketebalan perlu dilakukan pada bagian pipa atau tangki pada titik-titik yang berpotensi mengalami korosi terbesar. Pelaksanaan evaluasi keselamatan (*risk assessment*) mencakup identifikasi penyebab potensial terjadinya kegagalan dan pengaruhnya terhadap kelangsungan operasi instalasi serta dampaknya terhadap lingkungan. Perlu juga dilakukan evaluasi sisa usia produktif (*remaining life assessment*) berdasarkan kondisi riil fasilitas, parameter operasi dan lingkungan yang ada, untuk memperkirakan umur pakai dari fasilitas tersebut [68].

Teknik nuklir telah sejak lama diaplikasikan dalam berbagai bidang kegiatan yang berhubungan dengan aktivitas industri. Aplikasinya meliputi bidang industri manufaktur, proses produksi, keselamatan industri dan kualitas produk [63]. Dalam kegiatan industri, pemeriksaan tak merusak untuk mengetahui kualitas suatu bahan dapat dilakukan baik dengan metode teknik nuklir maupun non-nuklir. Radiasi berdaya tembus tinggi dapat dipakai untuk melakukan pemeriksaan struktur dan/atau kualitas bahan dengan teknik uji tak merusak yang lazim dikenal dengan istilah NDT (*non-*

memenuhi standar keamanan dan dapat mengurangi beban kerja pemeriksaan karena tidak perlu menghentikan kegiatan yang sedang berjalan. Kebocoran sistem perpipaan dapat ditemukan dengan mudah dan tingkat keparahan kondisinya dapat diketahui dengan cepat dan tepat. Namun pemeriksaan langsung seperti ini tentu tidak dapat dilakukan untuk mengetahui kondisi pelemahan konstruksi yang terjadi di dalam pipa. Oleh sebab itu, diperlukan teknik lain untuk inspeksi yang dapat menjangkau dan mengetahui kondisi di dalam pipa. Inspeksi dengan teknik radiografi dapat memenuhi kebutuhan itu [70].

Kerugian yang sangat besar akibat kerusakan perangkat industri sebetulnya bisa diantisipasi, yaitu melalui metode inspeksi yang tepat dan prosedural. Hingga kini ada beberapa metode inspeksi industri yang telah diterapkan, beberapa diantaranya adalah inspeksi menggunakan metode konvensional seperti pemeriksaan dengan ultrasonik, termografi maupun radiografi. Inspeksi industri dengan teknik-teknik itu seringkali dikenal dengan istilah NDT. Ada juga metode lain, yaitu model inspeksi berbasis risiko yang terpadu. Salah satu caranya adalah pengawasan terpadu sejak dini pada pemilihan material. Kesalahan dalam pemilihan material bisa memicu terjadinya kebakaran jika piranti yang dipilih tidak memiliki daya tahan yang memadai terhadap temperatur sekitar. Perlu juga dilakukan kontrol kualitas dan pengawasan yang ketat selama proses pembangunan instalasi untuk menghindari terjadinya kesalahan dalam pemakaian komponen [69].

Aplikasi teknologi nuklir dalam bidang industri radiografi sebenarnya hampir mirip dengan pemakaian pesawat sinar-X pada bidang kedokteran, yaitu untuk melihat keadaan dalam tubuh manusia dengan cara di foto menggunakan sinar-X. Sedangkan dalam teknik radiografi yang di foto adalah benda atau obyek yang akan dilihat keadaan bagian dalamnya, bisa menggunakan sinar-X, sinar gamma dan neutron. Teknik radiografi banyak digunakan dalam bidang industri karena alasan-alasan sebagai berikut [70]:

- Peralatan mudah dibawa ke lapangan.

dihasilkan lebih baik. Penentuan jarak sumber radiasi ke film atau *source-film distance* (SFD) juga dapat memengaruhi hasil yang diperoleh. Penentuan SFD yang tidak tepat akan berpengaruh terhadap tingkat kehitaman gambar yang berdampak pada tingkat sensitivitas dan tingkat ketelitian hasil analisis kualitas bahan yang diperiksa.

Radiografi industri merupakan salah satu metode pengujian bahan yang selama ini banyak digunakan dalam industri baja untuk menentukan jaminan kualitas dari produk yang dihasilkan [69]. Dalam proses produksi baja, ada anggapan bahwa semua bahan selalu mengandung cacat, yang terdiri atas cacat bawaan dan cacat yang terjadi karena penanganan yang kurang baik. Cacat pada material merupakan sumber kegagalan bagi industri baja. Penyebab cacat pada material bersumber dari desain yang tidak tepat, proses selama pabrikan dan faktor lingkungan. Desain yang kurang tepat disebabkan oleh pemilihan bahan, metode pengerjaan, perlakuan panas yang tidak tepat, serta tidak dilakukan uji mekanik. Cacat pabrikan meliputi keretakan karena penggerindaan, proses pabrikan dan cacat pengelasan. Sedangkan faktor lingkungan disebabkan oleh peristiwa korosi. Radiografi industri juga banyak digunakan sebagai sarana pemeriksaan pada tahap konstruksi. Selain bagian-bagian konstruksi besi yang dianggap kritis, pemeriksaan juga dilakukan terhadap kualitas hasil las-lasan ketel uap bertekanan tinggi serta uji kekerasan dan keretakan konstruksi beton.

Selain menggunakan radiasi jenis foton (sinar-X dan sinar gamma), radiografi industri dapat pula dilakukan menggunakan berkas neutron [71]. Reaktor penelitian dirancang untuk dapat digunakan sebagai sarana melakukan berbagai jenis penelitian menggunakan neutron. Pada reaktor penelitian seringkali dilengkapi dengan berbagai fasilitas untuk penelitian, salah satunya adalah fasilitas radiografi neutron untuk melakukan penelitian dan pemeriksaan bahan. Untuk tujuan penelitian, neutron sering diklasifikasikan berdasarkan pada energi kinetik yang dimilikinya. Dari klasifikasi ini dikenal ada beberapa jenis neutron, yaitu:

itu mengoperasikan 14 fasilitas radiografi neutron dengan sumber neutronnya menggunakan reaktor nuklir, siklotron dan radioisotop californium-252. Banyak penelitian berkaitan dengan fenomena termohidrolika dilakukan di Jepang, seperti pengukuran fraksi hampa pada aliran dua fasa, visualisasi dan pengukuran kecepatan aliran fluida logam.

Di kawasan Eropa ada tujuh negara yang mempunyai fasilitas neutron radiografi, yaitu Perancis (empat fasilitas), Denmark (dua fasilitas), Italia, Hongaria, Austria, Jerman dan Slovenia (masing-masing satu fasilitas). Fasilitas neutron radiografi itu telah banyak digunakan untuk keperluan industri nuklir maupun non-nuklir, seperti industri pesawat terbang dan ruang angkasa. Sebagai kontrol kualitas pada industri pesawat terbang, di AS radiografi neutron dimanfaatkan untuk pengujian terhadap komponen piroteknik seperti *cable cutters*, *pyro valve*, *shock wave transmitter* dan lain-lain.

#### 6.4. AKTIVASI LAPISAN TIPIS

Keausan suatu komponen baik yang terjadi pada mesin maupun alat-alat lainnya, merupakan masalah yang perlu mendapatkan perhatian serius. Masalah ini berkaitan erat dengan program perawatan dan perbaikan peralatan. Termasuk dalam lingkup program perawatan fasilitas industri adalah mengidentifikasi dan menangani keausan tadi [63]. Pemeriksaan keausan secara dini sangat berguna untuk menghindari kerugian ekonomi akibat kerusakan komponen-komponen permesinan maupun peralatan lainnya. Pemeriksaan dini juga dapat dipakai untuk menghindari terjadinya kecelakaan kerja dalam aktivitas industri.

Degradasi material karena pengaruh lingkungan seperti korosi dan erosi merupakan bentuk pembatasan umur dari berbagai fasilitas, seperti peralatan proses, petrokimia, pengolahan minyak (*refinery*), dan pembangkit daya. Suatu alat biasanya dirancang berdasarkan kriteria tertentu dengan umur operasi yang sudah ditetapkan sebelumnya. Namun dalam kenyataannya, masa operasi alat tersebut sangat bergantung pada umur minimal material yang digunakan dan

nuklir maupun dengan iradiasi partikel bermuatan yang dipancarkan oleh alat pemercepat partikel (akselerator) [72]. Dalam reaktor riset biasanya dilengkapi dengan fasilitas untuk melakukan penelitian, seperti fasilitas radiografi neutron yang dapat dipakai untuk melakukan penelitian dan pemeriksaan bahan.

Dengan mengetahui ketebalan permukaan komponen yang diaktivasi (biasanya antara 20 mikrometer sampai sekitar 0,2 mm) dapat ditentukan laju keausan pada komponen. Dengan suatu kurva kalibrasi maka tingkat maupun laju keausan suatu komponen dapat ditentukan secara kuantitatif. Dengan metode yang sama, kita juga dapat menentukan laju korosi maupun erosi pada dinding silinder atau mesin industri pada umumnya. Melalui penelitian yang menyeluruh, dapat diperoleh data laju keausan cincin piston pada berbagai jenis logam dan berbagai kondisi operasi [66].

Aplikasi teknik ALT ternyata cukup sederhana. Selain itu, teknik ALT juga memiliki beberapa keunggulan dibanding teknik konvensional lainnya sebagai berikut [65]:

- Pengamatan degradasi komponen dapat dilakukan dari jarak jauh, karena pengamatan itu cukup dilakukan dengan cara mencacah atau mengukur intensitas radiasi yang dipancarkan dari permukaan komponen.
- Dapat dipakai untuk mengamati keausan pada bagian mesin yang tidak dapat diakses secara langsung, misal karena tertutup atau terhalang oleh struktur pembungkus atau bagian yang diamati berada pada lokasi yang sulit dijangkau.
- Pengukuran keausan dapat dilakukan secara langsung (*in-situ*) tanpa perlu membongkar mesin. Pengukuran bahkan dapat dilakukan pada saat mesin sedang beroperasi tanpa mengganggu proses produksi maupun kinerja mesin industri.
- Pengukuran pada berbagai bagian mesin yang sama dapat dilakukan secara simultan (*multiple point monitoring*), sehingga menghemat biaya dibandingkan pengukuran secara konvensional.

- Jumlah maupun aktivitas zat radioaktif yang terbentuk pada permukaan komponen sangat rendah sehingga tidak memerlukan proteksi radiasi yang rumit. Sebagian besar kasus bahkan tidak memerlukan sarana proteksi radiasi sama sekali. Aktivasi hanya dilakukan pada permukaan komponen setebal beberapa mm saja dengan total aktivitas zat radioaktifnya tidak lebih dari 0,37 Mega Becquerel (MBq), sehingga intensitas radiasi yang dipancarkannya sangat rendah dan masih dalam batas aman ditinjau dari sudut proteksi radiasi.
- Mampu memantau degradasi permukaan logam yang berlangsung sangat lambat dengan tingkat akurasi yang tinggi, yaitu pada rentang dari 0,0001 sampai 1 mm per tahun.
- Pemeriksaan keausan komponen dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan metode lainnya.
- Ketebalan bagian permukaan yang akan diteliti (penandaan) dapat ditentukan dan diatur sebelum proses aktivasi.

Teknik ALT telah banyak dimanfaatkan di negara-negara industri maju, terutama dalam disain industri mesin mobil, kapal laut, pesawat terbang, petrokimia, perminyakan dan lain-lain. Pemantauan tingkat degradasi biasanya dilakukan pada komponen-komponen mekanis yang rentan mengalami keausan, erosi atau korosi. Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengembangkan bentuk maupun material baru, terutama untuk komponen-komponen pembakaran.

Negara-negara maju seperti Amerika Serikat dan Eropa Barat telah memanfaatkan teknik ALT untuk memeriksa keausan komponen-komponen mesin seperti bantalan (*bearings*), piringan rem kendaraan (*vehicle brake disks*), piston dan cincin piston, blok mesin, poros hubung atau poros nok (*camshaft*), baling-baling turbin gas, turbin uap dan lain-lain. Penggunaan teknik ini kemudian berkembang untuk menyelidiki pengaruh berbagai jenis bahan minyak pelumas terhadap keausan komponen, yang pada akhirnya dipakai untuk mengembangkan minyak pelumas berkualitas tinggi [65].

Dalam kegiatan R&D (penelitian dan pengembangan atau litbang) suatu industri, teknik ALT dipakai untuk pengembangan

dipakai sebagai pendukung metode non-nuklir lainnya yang telah ada. Meskipun tidak semua persoalan di bidang keteknikan dapat diselesaikan dengan teknik nuklir, namun penggunaan *radiotracer* seringkali merupakan satu-satunya metode terbaik yang dapat menyelesaikan persoalan. Dalam bidang keteknikan, *radiotracer* tersebut dapat digunakan sebagai perunut dalam berbagai kegiatan industri untuk mengamati proses pencampuran bahan, aliran fluida dalam pipa dan sebagainya [75].

Radioisotop dapat dimanfaatkan sebagai perunut dalam kegiatan industri. Banyak masalah dalam proses industri dapat diselesaikan dengan teknik perunut radioisotop. Dengan teknik ini hampir setiap karakteristik suatu proses industri termasuk kelainan-kelainan yang terdapat pada sistem kerjanya, dapat diketahui untuk kemudian dijadikan masukan informasi bagi pabrik maupun industri yang bersangkutan. Kelebihan dari teknik perunut radioisotop ini adalah dapat dilakukan tanpa mengganggu atau menghentikan proses produksi yang sedang berjalan sehingga kerugian waktu maupun biaya dapat dihindari. Teknik ini dapat diaplikasikan hampir pada setiap industri, seperti industri tekstil, semen, pupuk, kertas, minyak, besi baja dan peleburan aluminium [73].

Proses pencampuran bahan-bahan dalam industri merupakan proses yang perlu dikontrol karena hasil proses tersebut dapat memengaruhi kualitas dari produk yang dihasilkan industri. Dalam proses industri, misal pencampuran bahan X dan bahan Y akan dianggap sempurna apabila X dan Y tersebut telah bercampur secara homogen. Untuk mengetahui homogenitas campuran tersebut, maka ke dalam bahan pencampur dimasukkan suatu perunut radioisotop. Homogenitas campuran bahan X dan Y ditunjukkan oleh homogenitas radioisotop dalam campuran. Pengamatan proses pencampuran dapat dilakukan dengan pemantauan radiasi dari luar bak pencampur. Apabila hasil cacahan radiasi dari radioisotop yang dipakai sebagai perunut telah menunjukkan nilai cacahan yang merata pada semua bagian, maka proses pencampuran antara bahan X dan bahan Y telah sempurna.

# 7

## MENJINAKKAN POLUTAN



Batubara sebagai salah satu jenis bahan bakar fosil telah dikenali oleh nenek moyang manusia sejak berabad-abad lampau. Manusia primitif mencari batubara untuk tungku perapian. Sisa-sisa pengapian dengan batubara telah dirunut sampai ke masa prasejarah. Batubara telah ditambang di Cina dan Yunani berabad-abad Sebelum Masehi. Para pandai besi di Inggris pada abad ke-13 menemukan nyala api dari batubara berkualitas bagus untuk tujuan pemanasan. Namun baru sekitar permulaan abad ke-18 batubara mulai memegang peranan sebagai sesuatu yang sangat vital dalam kehidupan masyarakat dunia [77].

Penemuan mesin uap merupakan pemicu munculnya revolusi industri di Inggris pada pertengahan abad ke-18. Revolusi industri merupakan suatu momen yang sangat bersejarah dalam peradaban Barat karena dari situ muncul perubahan besar dalam sistem perekonomian Barat dan berpengaruh besar terhadap sistem perdagangan dunia. Revolusi industri di Inggris telah menempatkan batubara sebagai sumber energi utama. Tambang batubara yang pertama di koloni Amerika dibuka dekat Richmond, Virginia, pada abad ke-18. Setelah revolusi Amerika, lebih banyak lagi tambang batubara yang dibuka. Pembangunan jalur-jalur kereta api pada pertengahan pertama abad ke-19 menjadi sejarah penting dalam

industri batubara. Dengan sarana ini, perdagangan batubara antar satu daerah dengan daerah lain dapat berjalan lancar.

Peningkatan konsumsi batubara tidak terpisahkan dari peranannya sebagai komoditas pertambangan sekaligus merupakan sumber energi primer yang sangat penting. Sekitar 27 persen dari seluruh sumber energi primer dunia pada 1995 dibangkitkan dengan memanfaatkan batubara sebagai bahan bakarnya. Introduksi dan perkembangan sumber-sumber energi yang bersih, dapat diperbaharui dan ramah lingkungan, seperti energi angin dan surya, ternyata belum dapat menggeser dominasi bahan bakar fosil sebagai pemasok sumber energi utama. Di Amerika Serikat misalnya, sebagian besar kebutuhan energi nasionalnya berasal dari fosil, terutama batubara dan minyak bumi [78].

Kini batubara merupakan salah satu sumber tenaga terpenting sebagai bahan bakar untuk mesin uap guna memproduksi listrik. Batubara juga dipakai untuk tujuan pemanasan dalam proses-proses industri. Selain itu, mineral ini juga digunakan oleh pabrik untuk pemrosesan berbagai jenis logam dan baja. Pada mulanya, batubara hanya dikenal sebagai bahan bakar untuk mesin. Namun dalam perkembangan berikutnya juga digunakan untuk industri berskala besar, menengah maupun kecil. Pada saat ini bahkan dimasyarakatkan penggunaan briket batubara untuk keperluan bahan bakar rumah tangga [78].

### **7.1. DOMINASI PERAN BATUBARA**

Masyarakat modern membutuhkan energi listrik untuk berbagai keperluan seperti kebutuhan konsumsi rumah tangga, penerangan umum, penggerak sarana transportasi, penggerak mesin-mesin industri dan sebagainya. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, maka dibangunlah pusat-pusat pembangkit listrik berkapasitas tinggi. Ada berbagai sistem pembangkit listrik yang saat ini beroperasi di permukaan bumi, seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batubara sebagai bahan bakarnya, atau pembangkit listrik tenaga air (PLTA)

Sektor jaspun terkena dampaknya. Ratusan jadwal penerbangan dibatalkan, yang paling parah terjadi di Bandara Internasional John F. Kennedy di New York dan Bandara La Guardia, di kawasan Detroit dan Cleveland. Semua akses internet di seluruh perkantoran terputus. Banyak kereta api dan kereta bawah tanah terpaksa menghentikan pelayanannya. Berselang dua minggu dari pemadaman listrik di AS, kejadian serupa juga menimpa kota London dan Bagian Tenggara Inggris. Karena berlangsung pada saat jam sibuk, maka akibat yang ditimbulkannya juga cukup parah, paling tidak 500 ribu komuter terjebak di dalam kereta bawah tanah (*subway*) [80].

Batubara merupakan salah satu jenis bahan bakar atau sumber energi yang sangat berharga. Berdasarkan pada cara penggunaannya, energi yang dihasilkan oleh batubara dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu [78]:

1. Penghasil energi primer apabila batubara langsung digunakan dalam industri, misal sebagai bahan bakar dalam industri semen, pembakaran batu kapur, penggerak lokomotif, kapal dan sebagainya.
2. Penghasil energi sekunder apabila energi yang terkandung dalam batubara dikonversikan menjadi energi dalam bentuk lain, misal dibakar dalam PLTU untuk menghasilkan energi listrik, diubah menjadi bahan bakar cair untuk kendaraan bermotor dan sebagainya.

Masyarakat pemakai batubara baik untuk keperluan pembangkit listrik tenaga uap, bahan bakar industri semen, briket batubara dan sebagainya, menyadari bahwa pemanfaatan batubara mempunyai beberapa kelebihan, yaitu [77]:

1. Adanya penekanan biaya karena harga persatuan energi yang dihasilkan batubara lebih murah dibandingkan dengan bahan bakar lainnya.
2. Di antara bahan bakar hidrocarbon, batubara menempati persediaan yang paling melimpah di dunia, dan masih dapat diandalkan sebagai sumber energi hingga memasuki abad ke-22 nanti.

kembali aktif melakukan eksplorasi guna mendapatkan deposit batubara sekaligus meningkatkan eksploitasi terhadap deposit-deposit batubara yang telah diketahui. Meski termasuk sumber energi tak terbarukan, namun batubara masih dapat diandalkan sebagai sumber energi dunia hingga lebih dari 230 tahun, bahkan diperkirakan dapat mencapai hingga 300 tahun mendatang. Negara-negara yang terkenal sebagai penghasil batubara adalah AS, Negara-negara bekas Uni Sovyet, Republik Rakyat Cina, Jerman, Polandia dan Inggris.

## 7.2. FENOMENA HUJAN ASAM

Masalah utama berkaitan dengan peningkatan penggunaan bahan bakar fosil adalah dilepaskannya gas-gas polutan seperti nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) dan sulfur oksida ( $\text{SO}_x$ ). Walaupun sebagian besar pusat tenaga listrik dan industri yang membakar batubara telah menggunakan alat pembersih endapan (*presipitator*) untuk membersihkan partikel-partikel kecil dari asap batubara, namun  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$  yang merupakan senyawa gas dengan bebasnya naik melewati cerobong dan terlepas ke udara bebas. Sekitar 60 % dari emisi  $\text{SO}_x$  dibebaskan dari cerobong asap yang tinggi dan dibuang ke udara. Senyawa itu kemudian bercampur dengan udara di sekitar dan dihembus oleh angin [53].

Senyawa-senyawa seperti  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  menghadapi dua kemungkinan selama berada di udara. Pertama, sebagian  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$  akan jatuh dan perlahan-lahan terserap oleh tanah dan tanaman, sebelum keduanya mengalami proses oksidasi oleh energi sinar matahari. Peristiwa ini disebut sebagai pengendapan kering (*dry deposition*). Kemungkinan pertama ini dapat terjadi di sekitar lokasi sumber emisi atau tempat lain yang jaraknya ratusan kilometer dari sumber emisi. Pengendapan kering terjadi jika keadaan cuaca cerah dan berawan sehingga butiran-butiran gas dan aerosol yang bersifat asam diterbangkan angin dan memungkinkan tertinggal di pepohonan, bangunan, bahkan terhirup masuk ke pernafasan [53].

bagian selatan dan Swedia. Di daerah-daerah tersebut, sungai dan danau telah menjadi terlalu asam bagi ikan dan kehidupan lainnya. Pada akhir 1960-an sampai dengan awal 1970-an, penduduk Skandinavia dan Amerika Serikat sebelah timur laut mulai melihat kerusakan pada daerah-daerah yang terletak jauh dari sumber polusi manapun. Mereka mulai mengukur pH air hujan serta danau yang menampung air hujan tadi. Mereka dikejutkan oleh penemuan bahwa air hujan itulah yang asam, dimana nilai pH-nya seringkali jatuh sampai di bawah 5,0.

Penelitian yang lebih komprehensif selanjutnya dilakukan di negara-negara industri yang banyak mengkonsumsi batubara. Pada era 1970-an, para ilmuwan dari kelompok negara-negara yang tergabung dalam Masyarakat Ekonomi Eropa (OECD), AS dan Kanada menemukan bahwa hujan dan salju asam jatuh di seluruh wilayah AS bagian timur, di Kanada bagian tenggara, dan di beberapa wilayah sekitar kota-kota di bagian barat, serta sebagian besar benua Eropa. Pada era 1980-an, hujan asam menyebar ke wilayah bagian selatan dan barat hingga menyeberangi AS. Para ilmuwan telah berhasil mempelajari penyebab terjadinya hujan asam tersebut. Sumber  $SO_2$  yang paling utama adalah di Mississippi bagian hulu dan lembah Ohio, keduanya merupakan tempat yang banyak membakar batubara [83].

Senyawa  $SO_2$  yang dilepaskan ke udara berubah menjadi  $H_2SO_4$  dalam waktu 2-3 hari, dan hujan asam yang diakibatkannya dapat mencapai wilayah sejauh 800–1.600 km. Deposit asam juga mulai menjadi permasalahan di beberapa negara industri baru di Asia seperti Cina, di Afrika seperti Nigeria, dan di Amerika Latin seperti Brazil. Hujan asam yang ditimbulkan dari pelepasan gas-gas asam pada saat pembakaran bahan bakar fosil kini diketahui dapat menimbulkan berbagai macam dampak negatif baik terhadap lingkungan hidup maupun kesehatan manusia [53].

Masalah hujan asam mungkin akan merupakan masalah lingkungan jangka panjang yang teramat serius. Hujan asam bisa juga menjadi isu politik besar terutama karena sumber asal dan para korbannya sering berada di tempat yang berbeda. Bahan pencemar

### 7.3. MESIN BERKAS ELEKTRON

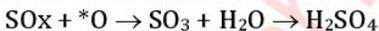
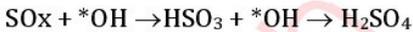
Teknik nuklir memiliki peran yang cukup besar dalam upaya pencegahan pencemaran lingkungan. Teknik ini memanfaatkan radiasi atau radioisotop serta sifat-sifat lainnya yang telah dikenal dan dimanfaatkan secara luas dalam berbagai bidang, tanpa mengabaikan segi keselamatan dan kelestarian lingkungan. Salah satu sifat radiasi nuklir adalah dapat mengionkan bahan dan mempercepat proses reaksi kimia. Sifat ini dapat dimanfaatkan untuk membuat produk baru atau menguraikan produk yang tidak diinginkan. Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) yang didirikan pada 1957 salah satu misinya adalah memperkenalkan secara luas penggunaan radiasi dan radioisotop dalam penelitian dan pengembangan di berbagai bidang. Pada saat ini, penelitian dan pengembangan manfaat radiasi nuklir untuk daur ulang limbah padat, cair dan gas sedang dikembangkan oleh IAEA [84].

Salah satu peralatan berteknologi tinggi untuk menjinakkan polutan udara adalah *electron beam machine* atau mesin berkas elektron (MBE). Prinsip kerja alat ini adalah menghasilkan berkas elektron dari filamen logam tungsten yang dipanaskan. Berkas elektron selanjutnya difokuskan dan dipercepat dalam tabung akselerator vakum bertegangan tinggi, umumnya berkisar antara 200 kilo elektron-Volt (keV) hingga 10 Mega elektron-Volt (MeV) [27]. Saat ini sedang dikembangkan teknologi radiasi dengan berkas elektron sebagai cara alternatif untuk mengeliminasi gas buang SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batubara.

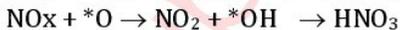
Proses pengambilan SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> dilakukan dengan cara mengalirkan gas buang yang keluar dari boiler ke dalam tangki atau menara pendingin setelah dikurangi kandungan abu terbangnya. Di dalam tangki ini suhu gas akan turun dan kelembabannya naik. Jika gas buang yang mengandung polutan sulfur dan nitrogen diradiasi dengan berkas elektron dalam suatu tempat yang mengandung gas ammonia, sulfur dan nitrogen oksida itu dapat berubah menjadi ammonium sulfat dan ammonium nitrat [85].

Proses pembersihan gas buang dilakukan pertama-tama dengan mendinginkan SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> dengan semburan air (H<sub>2</sub>O). Ke dalam campuran senyawa ini selanjutnya ditambahkan gas ammonia dan dialirkan ke dalam tabung pereaksi (*vessel*). Campuran senyawa yang mengalir dalam tabung pereaksi ini selanjutnya diradiasi dengan berkas elektron. Karena mendapatkan tambahan energi dari elektron itu, maka gas-gas polutan akan berubah, SO<sub>x</sub> menjadi SO<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub> menjadi NO<sub>3</sub>. Masih dalam pengaruh iradiasi elektron, kedua senyawa tersebut bereaksi dengan air sehingga dihasilkan produk antara (*intermediate product*) berupa asam sulfat dan asam nitrat seperti ditunjukkan pada Gambar 7.2 [86].

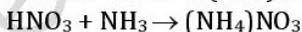
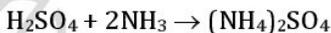
Proses kimia yang terjadi di dalam tabung pereaksi pertama-tama adalah penyerapan energi berkas elektron dari MBE oleh nitrogen (N<sub>2</sub>), oksigen (O<sub>2</sub>) dan uap air dari udara, sehingga terbentuk H<sub>2</sub>O dan spesi aktif berupa radikal \*OH, \*O dan \*HO<sub>2</sub>. Radikal yang terbentuk selanjutnya mengoksidasi SO<sub>x</sub> sehingga dihasilkan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) melalui proses reaksi kimia sebagai berikut [84]:



Radikal juga akan mengoksidasi NO<sub>x</sub> sehingga dihasilkan asam nitrat (HNO<sub>3</sub>) melalui persamaan reaksi sebagai berikut:



Setelah dilakukan penambahan gas ammonia (NH<sub>3</sub>) dalam jumlah yang seimbang secara stokiometrik, maka kedua jenis asam tadi akan berubah menjadi serbuk garam sulfat dan nitrat melalui proses reaksi kimia sebagai berikut:



- Rasio pengambilan sulfur dan nitrogen oksida meningkat dengan semakin besarnya intensitas pancaran berkas elektron dari MBE.
- Rasio pengambilan sulfur dan nitrogen oksida bergantung pada suhu gas, semakin rendah suhu semakin tinggi rasio pengambilannya.

Penelitian yang telah dilakukan di Indianapolis, AS dan di Kalshruhe, Jerman dengan kapasitas gas buang sebesar 10.000 sampai dengan 20.000 Nm<sup>3</sup>/jam bahkan mencatat, bahwa radiasi dengan MBE ini mampu mereduksi polutan hingga 99 persen. Beberapa hasil penelitian tadi menunjukkan bahwa teknologi MBE mempunyai prospek masa depan yang sangat baik. Teknologi MBE kini terus dikembangkan di beberapa negara maju, dan kelak kemungkinan besar akan dimanfaatkan oleh banyak negara. Teknologi berkas elektron sendiri sudah cukup lama dikenal. Teknik irradiasi elektron untuk membersihkan polutan dalam gas buang ini telah dipelajari di Jepang sejak tahun 1970-an. Hasil akhir dari instalasi MBE berupa bahan baku pupuk merupakan daya tarik tersendiri. Teknologi ini juga diketahui dapat dipakai untuk menangani limbah cair, lumpur beracun serta jenis-jenis limbah berbahaya lainnya dari berbagai macam aktivitas industry [88].

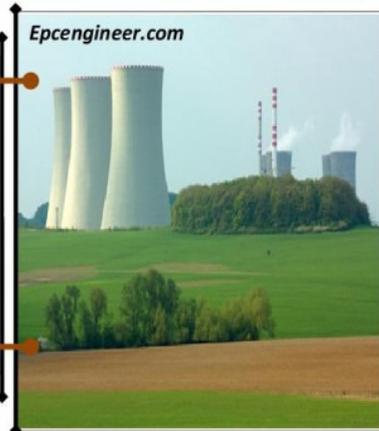
#### 7.4. UJI COBA DI LAPANGAN

Penelitian dan kerjasama internasional yang didukung oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), JAERI dan Institut Kimia Nuklir dan Teknologi Polandia (INCT) telah berhasil mengembangkan fasilitas berkas elektron untuk pengolahan gas buang yang dilepaskan oleh stasiun pembangkit listrik batubara seperti ditunjukkan pada Gambar 7.3. Proyek percontohan itu dilengkapi dengan dua buah akselerator elektron dengan energi 10 MeV arus 50 mA dan ditempatkan di *Kaweczyn Electric Power Station* di Polandia [87].

Instalasi percontohan di Polandia itu membakar batubara dengan kandungan sulfur antara 0,55 persen sampai dengan 0,8 persen. Boiler jenis WP-120 yang digunakan dalam proyek ini

# 8

## PENUTUP



Pertumbuhan jumlah penduduk dunia berjalan begitu cepat. Diproyeksikan populasi dunia akan terus bertambah dengan kecepatan yang belum adaandingannya dalam sejarah. Pada Agustus 2011 jumlah penduduk dunia ditaksir hampir mencapai angka tujuh miliar jiwa, dan diperkirakan akan meningkat mencapai 10 milyar kelak pada 2050. Peningkatan jumlah penduduk dunia yang berlangsung begitu cepat akan mendatangkan berbagai jenis tantangan dalam bidang energi, lingkungan hidup, kesehatan dan pangan. Semua tantangan itu harus dicarikan solusinya agar roda kehidupan tetap dapat berjalan dengan baik.

Industrialisasi di segala sektor menjadi pilihan karena disamping dapat mengatasi permasalahan ledakan populasi dunia juga dapat meningkatkan taraf kesejahteraan hidup manusia. Berbagai produk industri hadir di tengah masyarakat sambil menawarkan berbagai kemudahan dan kenikmatan. Dengan mesin pendingin, manusia dapat mengubah temperatur sekelilingnya sesuai dengan yang diinginkan. Dengan berbagai macam kendaraan transportasi, mobilitas manusia menjadi semakin lancar. Dengan berbagai produk audio visual, informasi dari mancanegara menjadi semakin mudah diperoleh. Dengan berbagai sarana telekomunikasi modern, jarak bukan lagi menjadi penghalang dalam menjalin hubungan sosial di

masyarakat. Masih banyak lagi kemudahan dan kenyamanan hidup yang dapat dihadirkan oleh produk-produk industri modern.

Kemajuan teknologi telah melahirkan peradaban modern dengan tuntutan kesejahteraan hidup yang semakin tinggi. Perkembangan peradaban itu akhirnya memacu kebutuhan barang dalam jumlah, variasi, jenis, dan tingkat mutu yang semakin tinggi untuk menunjang kualitas kehidupan modern. Tuntutan kebutuhan itu akhirnya mendorong kalangan industri untuk meningkatkan kemampuannya dalam memproduksi dan menyediakan barang-barang guna memenuhi permintaan masyarakat. Peningkatan kemampuan dalam produksi merupakan bagian dari usaha yang terus dilakukan oleh kalangan industri agar permintaan masyarakat terpenuhi secara efektif dan efisien, sehingga diperoleh keuntungan maksimal dari kegiatan produksi tersebut.

Kehadiran berbagai jenis produk industri modern berupa barang-barang elektronik yang dimanfaatkan untuk membantu kerja manusia, telekomunikasi maupun barang elektronik lainnya bermula dari penelitian dan pengembangan teknologi semikonduktor. Melalui teknologi inilah aliran-aliran elektron dalam chip semikonduktor dapat dimanfaatkan untuk mengolah, menyimpan dan mengantarkan data serta informasi melalui sandi-sandi digital. Perkembangan teknologi telah mengantarkan teknologi elektronika beralih ke orde mikro dengan lahirnya teknologi mikroelektronika. Komputer generasi baru dikembangkan dengan menggunakan mikroprosesor yang makin renik sehingga secara fisik tampil dengan ukuran yang lebih kecil, namun dengan kecepatan dan kemampuan kerja yang jauh lebih tinggi dibandingkan generasi sebelumnya.

Hampir semua alat maupun perkakas sedikit atau banyak bertumpu pada teknologi elektronika. Penggunaan semikonduktor dalam berbagai peralatan elektronik terus meningkat seiring dengan semakin canggihnya teknologi mikroelektronika. Pembuatan bahan baru dengan struktur yang berbeda dari bahan aslinya dapat dilakukan dengan teknik iradiasi berkas neutron. Semakin reniknya komponen elektronik menuntut semakin murninya bahan

semikonduktor yang digunakan untuk pembuatan komponen tersebut.

Pemanfaatan teknologi nuklir baik akselerator implantor ion maupun teknik *neutron transmutation doping* (NTD) untuk pencangkakan bahan semikonduktor ternyata mampu memenuhi tuntutan tersebut, bahkan menempati posisi sebagai metode terbaik yang ada saat ini untuk memproduksi bahan semikonduktor dengan tingkat kemurnian sangat tinggi. Semikonduktor itu melahirkan berbagai jenis komponen yang dipakai dalam berbagai produk elektronik modern. Aplikasi teknik nuklir dalam industri bahan semikonduktor memiliki arti penting dalam memicu kelahiran revolusi teknologi mikroelektronika.

Listrik memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat modern. Berbagai macam peralatan yang beroperasi dengan bantuan listrik sudah sangat akrab dengan aktivitas hidup manusia. Dalam kehidupan sehari-hari, listrik mempunyai peran yang demikian besar, mulai dari untuk penerangan, transportasi, proses industri, pendingin ruangan, memasak, mencuci, pengobatan hingga hiburan dan sebagainya. Bahkan tingkat konsumsi listrik sering kali dikaitkan dengan tingkat kesejahteraan hidup suatu bangsa. Ketersediaan energi listrik biasanya merupakan salah satu indikator tingkat kemapanan ekonomi suatu negara. Masyarakat awam mengkonsumsi energi listrik lebih banyak berkaitan dengan unsur-unsur yang menunjang kualitas kehidupan, termasuk masalah kenyamanan dan kemampuan untuk mengembangkan diri. Karena itu, listrik telah menjadi kebutuhan utama dalam kehidupan sebagian kelompok masyarakat modern.

Bahan yang berkaitan langsung dengan pemanfaatan listrik dalam berbagai bidang kehidupan adalah isolator kabel. Bahan isolator memiliki arti penting dalam menjaga keamanan dalam penggunaan listrik. Kerusakan yang menyebabkan isolator kehilangan fungsinya sebagai pengaman dapat memicu terjadinya sengatan listrik pada tubuh manusia maupun hubungan pendek yang berakibat pada

kebakaran. Karena itu, dibutuhkan bahan isolasi kabel dengan unjuk kerja prima agar listrik dapat dimanfaatkan secara aman.

Energi radiasi dapat merangsang terjadinya ikatan silang antar polimer sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi yang dapat mengubah sifat polimer menjadi tahan panas dan tegangan tinggi. Teknologi polimerisasi radiasi memiliki peran penting dalam memproduksi bahan isolasi kabel berkualitas tinggi sehingga pemanfaatan listrik dalam berbagai bidang kehidupan terjamin keamanannya. Lapisan permukaan isolator sangat tipis (membran) pada baterai perak oksida yang digunakan dalam jam digital, kalkulator maupun telepon seluler, semuanya merupakan polimer yang diproses menggunakan teknologi iradiasi.

Selain untuk memproduksi isolasi kabel listrik berkualitas tinggi, teknologi polimerisasi radiasi juga telah dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas bahan bangunan berbasis kayu. Melalui sentuhan teknologi polimerisasi, kayu dapat tampil lebih indah, kuat, dan tahan terhadap serangan hama perusak. Dalam bidang perkaretan, radiasi dapat dimanfaatkan untuk vulkanisasi lateks alam. Alat transportasi seperti mobil memanfaatkan ban yang proses produksinya melibatkan teknologi vulkanisasi radiasi.

Aplikasi teknik nuklir juga menyentuh bidang pangan. Pangan merupakan kebutuhan pokok semua makhluk hidup. Setiap negara harus mampu menjaga ketersediaan pangan untuk konsumsi dalam negerinya, agar terhindar dari ancaman kelaparan yang sewaktu-waktu dapat menimpa penduduknya. Kegagalan dalam mewujudkan ketahanan pangan dapat berakibat pada gangguan ketertiban dan keamanan nasional. Masalah pangan bisa menciptakan ketidakstabilan politik suatu kawasan. Konflik pangan telah terjadi di banyak negara dan diperkirakan akan terus meluas jika harga dan suplai bahan pangan terus bergejolak. Untuk mengantisipasi masalah ini, sektor pertanian merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari suatu negara, bahkan kelangsungan hidup hampir seluruh negara di dunia ini perlu ditopang oleh sektor pertanian.

# DAFTAR PUSTAKA

1. Koulouri C. (Editor). The Second World War. Second Edition. Thessaloniki: Kresimir Erdelja Series, 2009.
2. Todd A. The cold war. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
3. Jihui Q, Tissue T, Volkoff A. Atoms for peace, targeting technical cooperation for result. IAEA Bulletin; 2000; 42(1): 20-24.
4. Barretto P, Rogov A. Pillars for development, technology transfer facts & trends. IAEA Bulletin; 2000; 42(1): 30-35.
5. Parangtopo. Berfikir jernih membangun pondasi ilmu dan teknologi. Jakarta: Penerbit PT Elex Media Komputindo, 1994.
6. Wospakrik HJ. Dari atomos hingga quark. Jakarta 12210: Penerbit Universitas Atma Jaya/Kepustakaan Populer Gramedia, Mei 2005.
7. Young HD, Freedman RA. University physics. 9<sup>th</sup> edition. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1998.
8. Taylor JR, Zafiratos CD. Modern physics for scientist and engineers. New Jersey 07632: Prentice Hall, 1991.
9. Krane KS. Fisika modern (Terjemahan oleh: Hans J. Wospakirk dan Sofia Niksolihin). Cetakan I. Jakarta 10430: Penerbit Universitas Indonesia, 1992.
10. Sudjadi U. Peran dan penggunaan bahan semikonduktor silikon dalam industri nuklir di Indonesia. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Iradiasi Silikon Doping (Teknik Bahan). Jakarta: Badan tenaga Nuklir Nasional, 19 November 2009.
11. Budiarto. Pengembangan teknologi bahan semikonduktor dengan teknik nuklir. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang

- Metalurgi dan Bahan Industri. Jakarta: Badan tenaga Nuklir Nasional, 2008.
12. Anonim. Pengantar elektronika dan mikroprosesor. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 9. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; 1997; hal. 237-246.
  13. Wilopo AC. (Editor). Seabad pemenang hadiah Nobel Fisika. Jakarta: Abdi Tandur, 2002.
  14. Alexander GS. Komputer Pribadi. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 9. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; 1997; hal. 247-250.
  15. Akhadi M. Nobel Fisika 2000 untuk perintis rangkaian terpadu dan opto elektronika. Elektro Indonesia; Badan Kejuruan Elektro Persatuan Insinyur Indonesia; Januari/Pebruari 2001; Th. VII; No. 35: 35-37.
  16. Santoso B. Peranan fisika dalam penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia. Pidato Pengukuhan Ahli Peneliti Utama. Jakarta 12043: Badan Tenaga Atom Nasional, Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir, 1991.
  17. Darsono. Peran dan perkembangan teknologi akselerator untuk industri dan lingkungan. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Fisika Nuklir. Yogyakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2006.
  18. Akhadi M. Sentuhan teknik nuklir dalam produk elektronika. Elektro Indonesia; Badan Kejuruan Elektro Persatuan Insinyur Indonesia; Juli/Agustus 2000; Th. VII; No. 32: 32-34.
  19. Sprowls, RC., Komputer. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; 1997; hal.. 180-192.
  20. Akhadi M. Elektronika: dari mikro ke nano. Elektro Indonesia; Badan Kejuruan Elektro Persatuan Insinyur Indonesia; Mei/Juni 2000; Th. VII; No. 31: 5-6
  21. Erlangga AM. Sejarah & kebudayaan dunia. Yogyakarta: Familia; 2013.

- Pengukuhan Jabatan Ahli Peneliti Utama Bidang Pertanian. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional, Puslitbang Teknologi Isotop dan Radiasi ; 28 Desember 2004.
42. Hilmy N. Manfaat radiasi untuk meningkatkan mutu higiena alat kesehatan, bahan baku dan sediaan obat, komoditi makanan serta lingkungan. Pidato diucapkan pada Upacara Pengukuhan Jabatan Ahli Peneliti Utama Bidang Farmasi. Jakarta: Badan tenaga Atom Nasional; Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi; 1997.
  43. Loaharanu P. Rising calls for food safety, radiation technology becomes a timely answer. IAEA Bulletin; 2001; 43(2): 37-42.
  44. Irawati Z. Iradiasi pangan untuk pengawetan dan memperkuat ketahanan pangan nasional. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Ilmu Pangan dan Gizi. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional; Pusat Aplikasi Ternologi Isotop dan Radiasi; 2013.
  45. Anonim. Nuclear strategies in food and agriculture, 25 years of progress (1964-1989). Vienna: IAEA; Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Technologies in Food and Agriculture.
  46. Badan POM. Cara iradiasi yang baik untuk menghambat pertunasan pada umbi lapis dan umbi akar. Jakarta Pusat 10560: Direktorat Standardisasi Produk Pangan; Deputi Bidang Pengawasan Keamanan Pangan dan Bahan Berbahaya; Badan Pengawas Obat dan Makanan RI; 2004.
  47. Badan POM. Cara iradiasi yang baik untuk memperpanjang masa simpan pisang, mangga dan papaya. Jakarta Pusat 10560: Direktorat Standardisasi Produk Pangan; Deputi Bidang Pengawasan Keamanan Pangan dan Bahan Berbahaya; Badan Pengawas Obat dan Makanan RI; 2004.
  48. Effendi H. Telaah kualitas air bagi pengelolaan sumber daya dan lingkungan perairan. Yogyakarta 55281: Penerbit Kanisius, 2003.
  49. Suripin. Pelestarian sumber daya tanah dan air. Yogyakarta: Penerbit Andi, Juli 2002.
  50. Kodoatie RJ, Suharyanto, Sangkawati S, Edhison S. Pengelolaan sumber daya air dan otonomi daerah. Yogyakarta: Penerbit Andi, 2002.

73. Fowler E. Radioisotop. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 5. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; 1997; hal. 131-135.
74. Aliyanti B. Penentuan arah dan gerakan sedimen di pelabuhan. Prosiding Seminar Pendayagunaan Hasil Litbang BATAN. Jakarta; 2 September 1999; hal. 72-77.
75. Soetarno D, Widodo M, Rusmadi, Gunawan A, Subardjo, dkk. Pemanfaatan teknik nuklir untuk pelacakan air tanah dalam di Kabupaten Pamekasan, Madura, Jawa Timur. Lokakarya Pemanfaatan Hasil Litbang Iptek Nuklir. Yogyakarta; 28 November-1 Desember 2004; hal. 216-233.
76. Syafalni. Teknik hidroisotop dalam pengelolaan sumber daya air tanah. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Hidrologi. Jakarta: Badan tenaga Nuklir Nasional, Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, 2006.
77. Sukandarrumidi, Batubara dan gambut. Yogyakarta 55281: Gadjah Mada University Press, September 2004.
78. Sukandarrumidi. Batubara dan pemanfaatannya, pengantar teknologi batubara menuju lingkungan bersih. Yogyakarta 55281: Gadjah Mada University Press, Mei 2006.
79. Akhadi M. Ekologi energi, mengenali dampak lingkungan dalam pemanfaatan sumber-sumber energi. Yogyakarta 55511: Graha Ilmu; 2009.
80. Anonim. Pelajaran berharga dari padamnya listrik di sebagian Amerika dan London, Listrik Watch Journal; September-Oktober 2003; 1(4): 12-20.
81. Flavin C, Lenssen N. Gelombang revolusi energi, sebuah buku pengantar untuk mengantisipasi revolusi energi (penerjemah: Nicolas Hasibuan dan S. Maimoen), Jakarta: Yayasan Obor Indonesia; 1995.
82. Lansford H. Pencemaran lingkungan. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 4. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara; 1997; Hal. 52-68.

83. Soedomo M. Pencemaran udara (kumpulan karya ilmiah). Bandung: Penerbit ITB, 1999.
84. Larasati TRD. Penggunaan teknologi radiasi dalam pengendalian polusi gas buang. Warta BPPT; 1991; Tahun IV(9): 18-21.
85. Anonim, Desulfurization system: technology that prevents air pollution. Kenshu-In; JICA; 1994; No. 74: 6-8.
86. Anonim. Upaya membangun PLTU bebas polusi. Media Kita; 1/VI/2001; hal. 15-17.
87. Anonim. Persistent qQuest, research activity 1997. JAERI, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0011, Japan (1997) pp. 22.
88. Hilmy N. Manfaat radiasi dalam industri, lingkungan, dan kesehatan masyarakat. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN. Yogyakarta; 25-27 April 1995; hal. xvi- xxi.

# INDEKS

## A

ADB, 102  
air permukaan, 102  
air tanah, 97, 102, 175  
akselerator, 13, 37, 38, 39, 51,  
133, 151, 155, 162, 169, 170,  
173, 174  
aktivasi lapisan tipis, 17, 131  
ALT, 131, 132, 133, 134, 135  
anomali air, 99, 100  
asam askorbat, 74  
asam klorogenat, 74  
Aspergillus Flavus, 82  
atom akseptor, 28  
atom donor, 28, 29, 30  
atom pengotor, 27, 28, 29, 36

## B

Badan Tenaga Atom  
International, 12  
bahan isolasi, 15, 48, 52, 55, 56,  
57, 58, 163  
bakteri, 16, 75, 76, 81, 82, 83, 88,  
89, 90, 92  
bakteri patogen, 82, 83, 90, 92  
ban radial, 67

Bank Pembangunan Asia, 102  
berkas elektron, 18, 51, 56, 57,  
61, 62, 66, 89, 151, 152, 153,  
154, 155, 157, 166, 171  
berkas neutron, 14, 17, 39, 126,  
128, 129, 161

## C

CCD, 39, 41  
Clostridium Botulinum, 82  
*crosslinking*, 15, 51

## D

dekontaminasi, 83  
desalinasi, vi, 16, 107, 108, 110,  
164  
detoksifikasi, 74  
disinfestasi, 84  
disinfestasi serangga, 84  
DNA, 90  
dosis serap, 85, 86, 87, 91, 92

## E

ekosistem air, 104, 105  
Embun pagi, 150  
emulsi, 63, 127  
Energi celah, 29

radiografi industri, 17, 124, 127,  
128, 165  
radiografi neutron, 128, 129, 130,  
133  
radioisotop, 124, 130, 132, 136,  
137, 138, 151  
radiotracer, 132, 136  
rangkainan terpadu, 34, 35, 39,  
169  
rantai polimer, 47, 57  
reaksi biokimiawi, 88  
reaktor nuklir, 13, 26, 31, 39,  
109, 110, 130, 132, 133  
reaktor penelitian, 39, 40, 128

## S

semikonduktor ekstrinsik, 28  
semikonduktor intrinsik, 27  
semikonduktor tipe-n, 28, 31  
semikonduktor tipe-p, 28, 29  
sinar gamma, 13, 17, 57, 89, 124,  
125, 126, 127, 128  
sinar-X, 13, 17, 89, 124, 125, 126,  
127, 128, 129  
standar Codex, 89  
sterilisasi, 16, 83, 89, 92, 164  
sterilisasi dingin, 89  
sumber daya air, 94, 95, 97, 100,  
101, 103, 164, 172, 175  
sungai internasional, 103  
susut kuantitatif, 76

## T

tabung hampa, 32, 33

tataguna air, 101  
teflon, 49  
teknologi industri, 80  
teknologi pascapanen, 72, 79, 89,  
164  
termoplastik, 47, 48, 56  
termosetting, 47  
transistor, 14, 31, 32, 33, 34, 36,  
38, 39, 41  
Tribolium castaneum, 83  
turbulensi, 121

## U

Union Carbide, 122  
usia produktif, 123, 165

## V

vulkanisasi, 15, 57, 63, 65, 66, 67,  
163, 170, 171  
vulkanisasi belerang, 65, 67  
vulkanisasi kontinyu, 57

## W

WHO, 70, 82, 91, 102  
World Health Organization, 70  
World Water Forum, 97, 105

# BIODATA PENULIS



Mukhlis Akhadi lahir di Yogyakarta, 17 September 1961. Menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengatahuan Alam - Universitas Indonesia (FMIPA-UI) di Jakarta pada 1980 dan memperoleh gelar sarjana fisika pada 1985. Sejak awal 1986 sampai sekarang, penulis bekerja sebagai peneliti pada Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR - BATAN) di Jakarta. Meraih jabatan fungsional tertinggi sebagai Ahli Peneliti Utama bidang fisika nuklir sejak Desember 2002.

Beberapa pendidikan tambahan/spesialisasi yang pernah diperolehnya adalah: *Radiation Protection Course* di ANSTO (Australia 1989), *Personal Dosimetry* di JAERI (Jepang 1991), *Working Area Monitoring* di JAERI (Jepang 1992), *Workshop on the Application of the ICRP's 1990 Recommendations* di Kualalumpur (Malaysia 1993), *Regional School of Radiation Emergency Management* di Fukushima (Jepang, 2017).

Mewakili BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standards* (BSS) di Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Vienna (Austria 1994). Ditunjuk BATAN menjadi anggota *Radiation Safety Standards Committee* (RASSC) di bawah koordinasi IAEA periode 2005-2007. Mengikuti kegiatan *Forum for Nuclear Cooperation in Asia* (FNCA) on *QA/QC radiation dosimetry for radiotherapeutic of cancer* di Cina tahun 2006. Sebagai partisipan

dalam *Technical Meeting to Develop a Draft Text for the Revision of the BSS* di IAEA (Austria 2007).

Selain sebagai peneliti, penulis juga sering diminta sebagai pengajar pada berbagai jenis diklat yang diselenggarakan oleh BATAN. Pernah menjadi dosen tidak tetap pada jurusan teknik mesin, teknik elektro dan teknik sipil Sekolah Tinggi Teknik (STT)-PLN di Jakarta. Menulis tujuh buku masing-masing dengan judul: (1). Pengantar Teknologi Nuklir (1997), (2). Dasar-dasar Proteksi Radiasi (2000), (3). Ekologi Energi: Mengenali Dampak Lingkungan dari Penggunaan Sumber-Sumber Energi (2009), (4). Isu Lingkungan Hidup: Mewaspada Dampak Kemajuan Teknologi dan Polusi Lingkungan Global yang Mengancam Kehidupan (2014), (5). Penanggulangan Radioaktif: Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi dengan Teknik Nuklir (2017), (6). Jejak Perjalanan Teknologi Nuklir: dari Konsep Atomos hingga Traktat non-Proliferasi (2018) dan (7). Sinar-X untuk Melihat Dunia (2018).

Perkembangan hubungan internasional antar berbagai peradaban dunia telah mempercepat proses industrialisasi di berbagai kawasan. Dengan proses industrialisasi ini, berbagai macam kebutuhan hidup manusia dapat dipenuhi secara cepat. Industrialisasi yang merambah dalam segala sektor kehidupan memegang peran yang strategis dalam kehidupan masyarakat modern. Selain mampu mempercepat proses suplai barang kebutuhan hidup manusia, industrialisasi juga dapat membuka lapangan pekerjaan bagi penduduk bumi yang jumlahnya terus meningkat.

Berbagai produk industri hadir di tengah masyarakat sambil menawarkan berbagai kemudahan dan kenikmatan. Dengan mesin pendingin, manusia dapat mengubah temperatur sekelilingnya sesuai dengan yang diinginkan. Dengan berbagai macam kendaraan transportasi, mobilitas manusia menjadi semakin lancar. Dengan berbagai produk audio visual, informasi dari mancanegara menjadi semakin mudah diperoleh. Dengan berbagai sarana telekomunikasi modern, jarak bukan lagi menjadi penghalang dalam menjalin hubungan sosial di masyarakat. Serta masih banyak lagi kemudahan dan kenyamanan hidup yang dapat dihadirkan oleh produk-produk industri modern.

Buku ini membahas aplikasi teknik nuklir dalam berbagai aktivitas industri. Di dalamnya dibahas aplikasi teknik nuklir dalam industri bahan semikonduktor yang menjadi penopang utama lahirnya teknologi mikroelektronika. Pembahasan berikutnya adalah aplikasi teknik nuklir dalam industri kimia dalam rangka memproduksi polimer unggul untuk bahan isolasi kabel listrik. Dibahas pula aplikasi teknik nuklir dalam industri pangan yang sangat bermanfaat untuk menyelamatkan hasil panen. Bahasan lainnya yang dapat ditemukan dalam buku ini adalah aplikasi teknik nuklir dalam industri desalinasi air laut guna mengantisipasi ancaman krisis air tawar di masa yang akan datang, aplikasi teknik nuklir berupa inspeksi dengan teknik radiografi industri, dan aplikasi teknik nuklir untuk menjinakkan gas-gas polutan penyebab hujan asam. Selesai membaca buku ini diharapkan akan muncul gambaran obyektif mengenai luasnya andil teknik nuklir dalam berbagai aktivitas industri modern.



**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**

Jl. Rajawali, Gang Elang 6 No.3, Drono, Sardoncharjo, Ngaglik, Sleman

Jl. Kaliurang Km 5.3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

cs@deepublish.co.id @penerbitbuku\_deepublish

Penerbit Deepublish www.penerbitbukudeepublish.com

Kategori : Teknik

ISBN 978-623-209-620-6



9 786232 098206