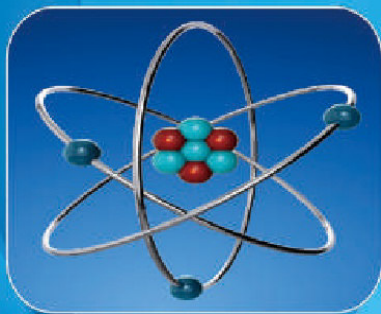


Mukhlis Akhadi

JEJAK PERJALANAN TEKNOLOGI NUKLIR

Dari Konsep Atomos hingga
Traktat non-Proliferasi



JEJAK PERJALANAN TEKNOLOGI NUKLIR

Dari Konsep Atomos Hingga
Traktat non-Proliferasi

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Right Reserved

JEJAK PERJALANAN TEKNOLOGI NUKLIR

**Dari Konsep Atomos Hingga
Traktat non-Proliferasi**

Mukhlis Akhadi

BATAN Press

© 2017 Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Pusat Diseminasi dan Kemitraan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Jejak Perjalanan Teknologi Nuklir: Dari Konsep Atomos Hingga Traktat non-
Proliferasi / Mukhlis Akhadi – Jakarta: BATAN Press, 2017.
xii + 146 hlm; 14,8x21 cm

ISBN 978-979-8500-77-0

1. Teknologi Nuklir-Sejarah
3. Konsep Atomos

2. Jejak Perjalanan

621.480.9

Copyeditor : Heru Santosa
Proofreader : Anhar R. Antariksawan dan Eko Purwito Hidayat
Desainer sampul & isi : Agus Rial dan Aan D'Tech

Cetakan pertama, Januari 2018



Diterbitkan oleh:
BATAN Press, anggota Ikapi
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49
Ged. Perasten Kawasan Nuklir Pasar Jumat
Jakarta Selatan 12440
Telp. : +62 21 7659401
Faks. : +62 21 75913833
E-mail: batanpress@batan.go.id

PENGANTAR PENERBIT

Buku ini diterbitkan untuk dapat menjawab keingintahuan masyarakat tentang nuklir, apa itu atom, nuklir? Bahkan proses para ilmuwan mendorong pemerintah Amerika Serikat (AS) dijelaskan secara gamblang alasan dan tujuannya kenapa AS harus punya senjata atom sebagai pemusnah massal tersebut. Pada surat para ilmuwan seperti Einstein. Para pembaca dapat mengikuti alur buku ini dengan jelas dan mudah dipahami. Dari mana asal mula konsep atom, yang semula tidak terdefinisi pada zaman Yunani maka sejak abad ke-20 menjadi terdefinisi secara logika ilmiah dan laboratorium menjadi terdefinisi dan dapat diterima secara ilmu pengetahuan. Buku ini sangat baik untuk para pelajar dan mahasiswa yang mendalami ilmu eksakta, kimia, fisika, dan biologi serta teknik sebagai dasar untuk pengetahuan dan terapan yang dipelajarinya.

Sejak kejadian bom atom di Nagasaki dan Hiroshima Agustus 1945 umat manusia begitu kaget akan kedahsyatan bom tersebut, dan mulai bertanya-tanya apa itu nuklir? Sebegitu hebatnya dan akibat yang ditimbulkan? Pertanyaan-pertanyaan tersebut menggelitik masyarakat untuk mencari tahu tentang atom dan nuklir. Dari semula anggapan bahwa materi jika dibelah menjadi lebih kecil, sampai akhirnya materi yang terkecil disebut atom. Sejak abad 20 mulai berubah bahwa banyak temuan-temuan baru yang membuat ilmuwan mengoreksi temuan ilmuwan terdahulu. Dengan demikian ditemukan struktur inti penyusun atom, ukuran inti, radioaktivitas, inti yang meluruh, peta nuklida, sumber neutron, susunan berkala unsur-unsur, reaksi fisi, kesetaraan massa dan energi. Project bom atom yang dinamai Manhattan juga diulas dari reaksi berantai terkendali dan tak terkendali serta produk plutonium bahan bom nuklir.

Buku ini menyajikan kepuasan dan keingintahuan tersebut. Bahkan buku ini juga menjelaskan lembaga internasional dan upaya internasional untuk secara bersama-sama mengurangi atau melucuti senjata pemusnah massal ini untuk memupus ancaman perang nuklir.

BATAN Press

KATA PENGANTAR

Manusia menjalani kehidupan di suatu tempat dan bersinggungan secara langsung dengan berbagai jenis materi yang ada di sekitarnya. Itulah sebabnya, sudah sejak lama manusia tertarik dan memiliki rasa ingin tahu terhadap jati diri berbagai jenis materi yang mengelilingi hidupnya. Banyak usaha telah dilakukan umat manusia untuk menggambarkan sekaligus memahami lingkungan hidupnya. Paling tidak sudah sejak 2500 tahun silam upaya itu mulai dilakukan oleh para filosof Yunani Kuno.

Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat adanya konsep dasar tentang atom yang pertama kali dikemukakan oleh Demokritos (460-370 SM). Demokritos membayangkan bagian terkecil dari sebuah materi, karena demikian kecilnya maka materi itu tidak dapat dibagi-bagi lagi. Itulah gambaran hipotetis pertama kali tentang atom. Namun perkembangan pengetahuan manusia terhadap materi ternyata mampu menggugurkan konsep dasar atom yang digagas Demokritos itu.

Para ilmuwan modern mampu membuktikan bahwa atom ternyata bukanlah bagian terkecil dari sebuah materi, karena dari atom itu masih bisa diuraikan lebih lanjut menjadi bagian-bagian yang lebih kecil lagi. Para ilmuwan telah menempuh perjalanan begitu panjang dalam kurun waktu hingga ratusan tahun untuk mendapatkan gambaran yang lebih detil tentang hakekat atom. Sampailah pengetahuan manusia pada tahap dimana keberadaan atom bisa dibuktikan secara ilmiah, meskipun bentuk fisiknya belum bisa ditangkap oleh indera penglihatan manusia. Di dalam atom itu ada bagian sangat kecil yang disebut inti atom (*nuclear* atau nuklir).

Jika tinjauan kita tentang atom langsung loncat ke awal abad 20, maka atom yang semula tidak terdefinisikan secara pasti itu akhirnya melahirkan teknologi nuklir dengan salah satu produk paling awalnya adalah senjata nuklir. Senjata inilah yang menghancurkan kota Hiroshima dan Nagasaki pada bulan Agustus 1945. Atom yang semula ingin diketahui karena merupakan bagian dari kehidupan, akhirnya menghasilkan teknologi yang apabila tidak dikendalikan penggunaannya dapat mengancam kehidupan umat manusia.

Buku yang sedang berada di tangan pembaca ini mengupas jejak awal perjalanan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Disajikan sepenggal kisah awal perjalanan nuklir mulai dari konsep atomos yang sudah digagas oleh Demokritos di Yunani sekitar 2500 tahun silam, hingga traktat non-proliferasi untuk membatasi kepemilikan dan penyebaran senjata nuklir yang diprakarsai oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA). Sepenggal kisah itu hanyalah bagian awal dari sejarah panjang perjalanan yang mengantarkan ke arah perkembangan teknologi nuklir modern dewasa ini.

Dirasa sangat perlu untuk memperkenalkan sejarah perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir secara komprehensif agar kesalahfahaman dan pandangan subyektif masyarakat umum terhadap nuklir itu bisa diluruskan. Pembahasan tentang atom, radioaktivitas, reaksi fisi, senjata nuklir dan traktat non-proliferasi yang terangkum dalam buku ini diharapkan dapat mengeliminir kesalahfahaman dan pandangan subyektif masyarakat awam tentang nuklir.

Disadari sepenuhnya jika pembahasan dalam buku ini masih banyak kekurangan karena terbatasnya pengetahuan dan kemampuan dalam diri penulis. Oleh sebab itu, kritik dan saran dari pembaca dalam rangka perbaikan dan penyempurnaan isi buku ini tetap ditunggu. Semoga kehadiran buku ini dapat memberi pencerahan dan memperkaya khasanah pengetahuan tentang teknologi nuklir masyarakat pada umumnya.

Tangerang Selatan, April 2017

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR PENERBIT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
BAB 2 MENGENAL ATOM	5
2.1. Teori Awal Tentang Atom	7
2.2. Perkembangan Teori Atom	12
2.3. Model Atom Terkini	15
2.4. Model Atom Mekanika Kuantum	20
2.5. Susunan Berkala Unsur-unsur	24
BAB 3 INTI ATOM	31
3.1. Struktur Inti	31
3.2. Ukuran Inti	37
3.3. Radioaktivitas	42
3.4. Peluruhan	50
3.5. Transmutasi Inti	57
3.6. Peta Nuklida	63
BAB 4 MEMASUKI ABAD NUKLIR	71
4.1. Kesetaraan Massa dan Energi	72
4.2. Sumber Neutron	76
4.3. Reaksi Fisi	79
4.4. Menyurati Presiden	85
BAB 5 MENUJU PROYEK MANHATTAN	91
5.1. Fisi Berantai Terkendali	94
5.2. Produksi Plutonium	99
5.3. Fisi Tak Terkendali	102

BAB 6 MEMUPUS ANCAMAN PERANG NUKLIR	109
6.1. Proliferasi Senjata Nuklir	111
6.2. Nuklir untuk Perdamaian	117
6.3. Traktat Non Proliferasi	124
6.4. Pengawasan Internasional	130
BAB 7 PENUTUP	139
DAFTAR PUSTAKA	141
INDEKS	145
BIOGRAFI PENULIS	151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Model atom menurut Joseph J. Thomson	14
Gambar 2.2.	Model atom Rutherford-Bohr	20
Gambar 2.3.	Kondisi atom yang tereksitasi	23
Gambar 2.4.	Susunan berkala unsur-unsur	27
Gambar 3.1.	Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang tersusun atas elektron	36
Gambar 3.2.	Radiasi pengion dapat melepaskan elektron dari ikatan inti atom	49
Gambar 3.3.	Pancaran radiasi oleh inti atom radioaktif	57
Gambar 3.4.	Transmutasi inti atom boron-11 oleh proton	62
Gambar 3.5.	Struktur inti isotop-isotop 1H, 2H dan 3H	64
Gambar 4.1.	Tumbukan elastis untuk menurunkan energi neutron	78
Gambar 4.2.	Proses fisi inti atom ^{235}U	84
Gambar 5.1.	Skema proses fisi berantai	95
Gambar 5.2.	Batang kendali untuk mengontrol proses fisi berantai dalam teras reaktor nuklir	98
Gambar 5.3.	Proses pembiakan plutonium-239	102
Gambar 5.4.	Penggabungan bahan bakar nuklir untuk menghasilkan massa kritis	104

BAB I

PENDAHULUAN

Pada umumnya masyarakat awam mengenal istilah nuklir dari sejarah Perang Dunia II. Pada saat itu, 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 [1]. Arah perkembangan teknologi nuklir tak terlepas dari situasi politik dunia pada era tahun 1940-an. Karena sedang berkecamuk Perang Dunia II, maka perkembangan teknologi nuklir mengarah kepada pembuatan senjata nuklir untuk mendukung kekuatan militer dalam perang [1].

Bagi bangsa Indonesia, peristiwa pemboman dua kota di Jepang tadi juga terkait langsung dengan arah perjalanan sejarah bangsa ini. Dalam kurun waktu yang sangat berdekatan dengan kekalahan tentara Jepang terhadap kekuatan Sekutu pada Perang Dunia II itulah bangsa Indonesia memproklamkan kemerdekaannya pada tanggal 17 Agustus 1945, setelah sebelumnya selama tiga setengah abad dijajah oleh Belanda dan selama tiga setengah tahun dijajah oleh Jepang. Dari cerita sejarah Perang Dunia II inilah pada umumnya orang mendengar dan tahu sedikit tentang teknologi nuklir, terutama kedahsyatan energi yang dapat dihasilkannya.

Apa sebenarnya nuklir itu? Nuklir (dari kata *nuclear* dalam bidang fisika-kimia atau *nucleus* dalam biologi) adalah istilah ilmiah yang tak lain dari sebutan untuk inti atom. Inti atom itu sendiri sebenarnya hanyalah bagian yang sangat kecil dari sebuah atom, sedang atom itu sendiri merupakan bagian yang terkecil dari sebuah materi. Terkait dengan istilah nuklir itu, kita juga mengenal adanya energi nuklir, yaitu energi yang keluar atau dilepaskan dari inti atom. Seding radiasi yang keluar dari inti atom disebut radiasi nuklir, dan reaksi yang terjadi antar inti atom disebut reaksi nuklir.

Meski hanya merupakan bagian yang sangat kecil dari suatu materi, dalam membahas mengenai inti atom ternyata kita harus berhadapan dengan bidang kajian yang sangat luas. Hal ini tentu saja sangat erat kaitannya dengan berbagai macam fenomena fisika beserta informasi lain yang

terkandung di dalam inti atom yang berhasil diungkap oleh manusia. Bahkan hingga kini, banyak informasi tersembunyi yang terkandung di dalam inti atom masih terus dicari dan dipelajari oleh para ilmuwan. Berbagai penelitian dalam skala besar yang melibatkan banyak ilmuwan terus dilakukan dalam rangka memperoleh informasi untuk mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkaitan dengan inti atom. Dalam kehidupan sehari-hari, kajian yang mengkhususkan pada masalah inti atom itu berada pada wilayah fisika nuklir.

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. 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. Inilah kesalahan persepsi masyarakat terhadap teknologi nuklir yang perlu dikoreksi.

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 [2]. 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 menjadi tidak tepat. Ada beberapa manfaat yang dapat dinikmati oleh umat manusia di muka bumi ini jika teknologi nuklir dimanfaatkan secara benar.

Buku yang sedang berada di tangan pembaca ini mengupas sepenggal kisah bagian awal perjalanan teknologi nuklir. Bahan untuk penulisannya digali dari beberapa sumber baik berupa buku ilmiah maupun referensi lain yang memiliki bobot ilmiah tinggi dan berasal dari sumber yang kredibel. Pembahasannya diawali dengan pengenalan atom sebagai pengantar agar

para pembaca mendapatkan gambaran yang lengkap tentang atom, termasuk perjalanan panjang sejarah manusia dalam mengungkap apa sebenarnya atom itu. Setelah mengenal atom, pembaca dibawa ke pembahasan yang lebih dalam mengenai inti atom dan fenomena fisika yang dapat dihasilkannya, yaitu masalah radioaktivitas dan radiasi pengion. Uraian di bagian awal buku ini dimaksudkan untuk meluruskan persepsi sehingga pembaca terhindar dari bayangan menakutkan tentang atom dan radiasi.

Bagian berikutnya membahas informasi penting dari sejarah perkembangan teknologi nuklir, yaitu penemuan reaksi fisi berantai terkendali pertama dalam reaktor nuklir yang dibangun di bawah balkon Stadion Olahraga Stagg Field, Universitas Chicago. Keberhasilan ini sekaligus menandai babak baru abad nuklir. Di tempat inilah untuk pertama kalinya dalam sejarah, manusia berhasil menghadirkan reaksi nuklir berantai yang dapat dikendalikan. Perjalanan berliku yang diwarnai kepentingan politik untuk membawa reaksi fisi menuju proyek Manhattan dikupas secara detil pada bagian tersendiri. Dari sinilah teknologi nuklir itu menghasilkan senjata. Dari sini pula istilah nuklir seringkali diidentikkan dengan bom atom.

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang teknologi nuklir, buku ini juga mengupas upaya masyarakat internasional dalam membatasi kepemilikan dan pengembangan senjata nuklir melalui pemberlakuan perjanjian Traktat Pelarangan Penyebaran Senjata Nuklir atau *Nuclear non-Proliferation Treaty* (NPT). Masalah ini perlu diketahui agar kecemasan publik terhadap ancaman bakal terulangnya kembali perang nuklir pasca tragedi Hiroshima-Nagasaki dapat dieliminir. Beberapa gagasan telah dimunculkan untuk menghapus senjata nuklir dari muka bumi.

Dalam prakteknya, pemanfaatan teknologi nuklir mendapatkan pengawasan internasional yang sangat ketat. Sebagai konsekuensi keikutsertaan suatu negara dalam menandatangani naskah NPT, IAEA selalu melakukan inspeksi untuk meyakinkan bahwa suatu negara tidak akan menggunakan bahan nuklir untuk kegiatan yang menyimpang dari maksud damai. Pembahasan mengenai masalah ini dapat ditemukan pada bagian akhir buku ini.

Badan Tenaga Atom Internasional merupakan suatu organisasi antar pemerintah yang didirikan pada 1957 dan bernaung di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Organisasi itu sendiri dibentuk dalam rangka mempercepat dan memperluas kontribusi tenaga nuklir untuk maksud-maksud damai, kesehatan dan kesejahteraan bangsa-bangsa di seluruh dunia [2]. Dalam kiprahnya, IAEA selalu membantu negara-negara anggota, terutama negara-negara berkembang, dengan memberikan fasilitas dan beasiswa untuk latihan dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Melalui badan ini pula dihimpun dan digalang kerjasama internasional untuk mengembangkan teknologi nuklir bagi kesejahteraan umat manusia. Sejak didirikan, IAEA telah banyak berperan dalam pengembangan dan penyebarluasan program pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan masyarakat dalam berbagai bidang kegiatan, mulai dari pertanian, kesehatan, industri, pelestarian lingkungan dan pembangkitan energi [2].

Tugas utama IAEA adalah mendorong pemanfaatan energi nuklir untuk maksud damai, sekaligus berusaha menjamin bahwa teknologi itu tidak akan dimanfaatkan untuk kepentingan militer. Melalui pengawasan yang ketat, teknologi nuklir tidak akan disalahgunakan untuk maksud-maksud jahat [3]. Teknologi nuklir dikampanyekan oleh IAEA untuk maksud-maksud damai melalui suatu slogan baru *nuke for peace* atau nuklir untuk perdamaian. Dari hasil kampanye itu, kini ada banyak manfaat yang dapat dinikmati oleh penduduk bumi dari aplikasi teknologi nuklir dalam berbagai bidang kehidupan.

Tulisan dalam buku ini mengulas secara komprehensif berbagai informasi seputar atom, inti atom, radioaktivitas, reaksi fisi, senjata nuklir serta traktat non-proliferasi. Pembaca buku ini akan dibawa dan diajak menyusuri jalan untuk napat tilas sejarah awal perjalanan dan perkembangan teknologi nuklir. Selesai membaca buku ini, setiap pembaca diharapkan akan mendapatkan gambaran obyektif tentang teknologi nuklir.

BAB 2

MENGENAL ATOM

Dalam pengertian yang sangat sederhana, materi didefinisikan sebagai sesuatu yang mengisi ruangan. Batu, kayu, besi, air, udara dan sebagainya adalah wujud yang berbeda-beda dari apa yang disebut materi tadi. Dengan berbagai jenis indera yang dimiliki, manusia tidak mengalami kesulitan dalam mengenali berbagai wujud materi. Dalam bentuk padat atau cair, materi dapat dikenali langsung baik dengan cara dilihat maupun diraba. Meski tidak kasat mata, materi dalam bentuk gas seringkali juga bisa dikenali melalui pancaran baunya yang khas untuk materi gas tersebut.

Sudah sejak zaman dahulu manusia tertarik kepada materi yang mengisi jagad raya ini. Paling tidak sudah sejak 2500 tahun silam manusia sudah mulai mempertanyakan tentang sifat materi. Pemrakarsanya adalah para filsuf Yunani Purba di Miletus, kota pelabuhan utama dan pusat perdagangan Ionia. Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat, banyak diantara para filsuf Yunani purba pra-Aristoteles, seperti Thales, Herakleitos, Anaksagoras hingga Demokritos, telah berusaha menerangkan materi yang ada di sekitar mereka [4]. Masalah pokok yang menjadi perhatian para filsuf itu adalah bagaimana memahami keberadaan alam serta perubahan yang terjadi di dalamnya. Metode pendekatan yang mereka gunakan cenderung menjelaskan teka-teki ini dengan bertolak dari penjelasan yang lebih sederhana, dapat dinalar, menggunakan istilah-istilah yang berhubungan dengan alam fisik dan menjauhkan diri dari alam mitos.

Filsuf Yunani pertama yang mencoba menerangkan teka-teki hakekat materi dan keberadaan alam adalah Thales (624-546 SM) di Miletus. Thales berpendapat bahwa semua zat tersusun dari satu unsur, yaitu air. Menurut beliau, air dapat diubah menjadi udara (uap air) dan dibekukan menjadi padat (es). Kesimpulannya, air berperan sebagai asal semua perubahan. Namun pendapat Thales ini tidak mampu bertahan lama karena ditolak oleh Anaksimandros (611-545 SM), yang tak lain adalah muridnya sendiri. Alasan penolakannya, bila air merupakan induk dari segala sesuatu, maka api

dan panas tidak akan pernah hadir, sebab air dapat memadamkan api dan mendinginkan panas [4].

Pandangan baru tentang alam materi dikemukakan oleh Empedokles (500-440 SM) yang hidup di Agrigentum, Sisilia. Di salah satu sekolah filsafat Yunani kuno Empedokles mengajarkan, bahwa ada empat materi dasar penyusun alam, yaitu: tanah, udara, api dan air. Menurut Empedokles, semua materi dibentuk dari keempat unsur tersebut melalui percampuran dalam kadar berbeda menurut daya tarikan dan tolakan. Teori materi yang dikemukakan oleh Empedokles itu memberikan efek sangat besar dalam mengembangkan pemahaman hakekat materi pada jamannya. Apa yang diajarkan oleh Empedocles di atas ternyata disetujui oleh Aristoteles (384-322 SM), seorang filsof Yunani Kuno yang sangat disegani pada saat itu. Persetujuan itu ditunjukkan oleh Aristoteles yang melengkapinya pendapat Empedokles dengan pernyataan bahwa keempat materi dasar penyusun alam semesta itu dapat diubah ke bentuk lainnya. Pendapat Empedokles diterima oleh masyarakat Yunani karena besarnya pengaruh Aristoteles, dimana kondisi masyarakatnya memiliki pemikiran dan kepercayaan bahwa sesuatu yang terfaham haruslah tertangkap secara indrawi [5].

Kini, pemahaman manusia terhadap materi telah mencapai suatu tingkatan jauh di atas pemahaman masyarakat Yunani purba. Suatu benda yang kita temukan di lingkungan bisa jadi tersusun atas banyak jenis materi. Penguraian benda menjadi bahan-bahan penyusunnya, dan bahan-bahan penyusun itu diuraikan lagi menjadi komponen-komponen yang paling kecil, akan didapati bahwa semua materi tersusun oleh banyak sekali zat-zat murni yang tidak dapat diuraikan lagi dengan metode analisis kimia biasa. Komponen terkecil penyusun materi itu disebut unsur yang terdiri atas atom-atom sejenis.

Ilmu pengetahuan modern menyatakan bahwa berbagai unsur yang menyusun materi tersebar di seluruh jagad raya dengan kelimpahan yang berbeda-beda. Di bagian kerak bumi, para ilmuwan telah berhasil mengidentifikasi delapan jenis unsur yang membentuk hampir 99% bagian kerak bumi, yaitu aluminium (8,1%), besi (5,0%), kalium (12,6%), calcium (3,6%), magnesium (2,1%), natrium (2,9%), oksigen (46,6%), silicon

(27,7%) dan unsur kelumit lainnya (1,4%) [6].

Pemburuan unsur-unsur juga dilakukan di ruang angkasa. Para astronom telah berhasil mengenali sejumlah besar unsur yang ada di matahari dan bintang-bintang lainnya. Unsur-unsur itu ternyata diketahui juga ada di bumi. Sejauh ini belum pernah dijumpai adanya unsur di ruang angkasa yang tidak ditemukan di bumi. Analisis terhadap sejumlah meteor yang jatuh di bumi menunjukkan bahwa lebih dari 50 jenis unsur yang dikenal di bumi diketahui terkandung di dalam meteor dari ruang angkasa tersebut [7].

Berbagai disiplin ilmu mengkhususkan diri menelaah materi-materi yang ditemukan dalam berbagai jenis benda yang berbeda-beda. Dalam astronomi dikaji jenis-jenis materi yang ditemukan di bintang, planet, satelit, asteroid, komet, meteor dan nebula. Bidang biologi mengkaji komposisi materi yang menyusun tubuh makhluk hidup. Ilmu kimia mempelajari komposisi dan sifat-sifat materi serta perubahan yang dialaminya. Ahli kimia mampu mengenali dan mengidentifikasi semua zat murni dengan ketelitian tinggi melalui serangkaian uji penelitian.

Para Ilmuwan yang menekuni bidang kimia kini juga telah mampu mengenali secara akurat sifat-sifat dari unsur serta sebab-sebab yang melatarbelakanginya. Mereka mampu menerangkan kenapa ada logam yang sifatnya sangat keras, sementara logam lainnya ada yang lunak. Dengan mengetahui penyebab mengapa suatu materi mempunyai sifat tertentu yang sangat unik, terbuka kemungkinan untuk memproduksi bahan baru dengan sifat-sifat yang diinginkan secara lebih sempurna. Setiap unsur yang ditemukan di alam ini ternyata memiliki sifat-sifat yang berbeda antara satu dengan yang lainnya. Berdasarkan perbedaan sifat-sifat itulah unsur-unsur dikelompokkan.

2.1. Teori Awal Tentang Atom

Banyak usaha telah dilakukan umat manusia untuk menggambarkan sekaligus memahami atom. Selain konsep tentang materi yang diajarkan oleh Empedocles, dari sejarah Yunani kuno kita juga mengenal adanya konsep dasar tentang atom dari Demokritos (460-370 SM). Menurut

Demokritos, jika sebuah benda, misal batu, dibelah dua, kemudian setiap hasil pembelahan tersebut dibelah lagi menjadi dua, demikian seterusnya sehingga benda itu tidak dapat dibelah-belah lagi, maka setiap hasil belahan mempunyai sifat yang sama seperti benda asal. Dari contoh ini Demokritos menggambarkan atom sebagai materi terkecil yang sedemikian kecilnya sehingga tidak dapat dibagi-bagi lagi. Demokritos percaya bahwa atom dari berbagai benda seperti hewan, tumbuhan atau mineral adalah berbeda dalam ukuran, bobot dan bentuknya. Inilah konsep tentang atom pertama yang tercatat oleh sejarah ilmu pengetahuan. Konsep tersebut lahir murni dari hasil pemikiran, dan bukan merupakan hasil percobaan [5].

Istilah atom berasal dari kata *atomos* yang dalam terminologi filsafat Yunani Kuno berarti tidak dapat dibagi-bagi lagi. Dalam perkembangan berikutnya, istilah atom digunakan untuk menerangkan bagian terkecil dari suatu benda, sedemikian kecilnya sehingga benda tersebut tidak dapat dibagi-bagi lagi. Namun pengetahuan manusia mengenai ukuran dan sifat-sifat alamiah dari atom tersebut berkembang sangat lambat selama berabad-abad. Oleh sebab itu, konsep tentang atom tidak terdefiniskan secara pasti. Pada saat itu manusia hanya berspekulasi mengenai keberadaan suatu atom. Teori atom Demokritos masih mendapat perhatian hingga awal abad ke-3 SM berkat dukungan Epikuros (341-270 SM) [5].

Dalam perkembangan berikutnya, apa yang dikemukakan oleh Demokritos tentang atom ternyata tidak sejalan dengan pemikiran filsuf Yunani Kuno Aristoteles dan Plato. Konsep atom itu ditolak karena keberadaan atom pada saat itu masih dianggap khayalan belaka, tidak membumi. Kala itu belum bisa dilakukan uji percobaan maupun uji eksperimental terhadap kebenaran gagasan atom yang abstrak itu. Sedang sesuatu yang terfaham haruslah tertangkap secara indrawi. Dampak dari penolakan itu ternyata cukup fatal. Upaya umat manusia untuk memahami hakekat materi berhenti untuk kurun waktu yang sangat lama. Teori atom Demokritos terabaikan hampir selama 2000 tahun. Teori atom itu juga tidak pernah mendapatkan perhatian dari para pemikir selama abad pertengahan, sehingga hanya memberikan

pengaruh yang sangat sedikit terhadap perkembangan ilmu pengetahuan pada masa itu. Meskipun demikian, beberapa ilmuwan terkemuka di abad ke-17, termasuk di dalamnya adalah Issac Newton, mau menerima pendapat Demokritos tersebut. Namun teori ini tidak pernah digunakan dalam penelitian ilmiah, di samping tidak seorangpun melihat adanya hubungan antara spekulasi filosofis tentang atom dan kejadian-kejadian nyata dalam ilmu kimia [4].

Perkembangan pemikiran manusia tentang atom terus berlanjut, dan hingga kini atom masih tetap menjadi obyek penelitian yang menarik perhatian para ahli fisika. Didukung oleh berbagai hasil penemuan, maka teori tentang atom pun berkembang dari waktu ke waktu. Meski saat ini para ilmuwan telah berhasil menguraikan atom menjadi partikel-partikel penyusun atom yang lebih kecil, namun penguraian itu tidak bisa dilakukan dengan cara kimia biasa. Jadi untuk sementara, pemahaman kita tentang materi terkecil dibatasi sampai pada pemahaman pada level atom saja.

Kelahiran ilmu kimia memiliki andil yang cukup besar dalam mendefinisikan atom. Disini ilmu kimia lebih menfokuskan diri pada mempelajari struktur materi dan perubahannya dengan menerapkan metode ilmiah, memadukan pemikiran yang masuk akal dan bukti ilmiah. Di awal kelahiran ilmu kimia, manusia sudah mulai bisa memodifikasi logam biasa menjadi logam mulia, emas dan perak. Didukung oleh berbagai hasil penemuan dalam bidang kimia, maka teori tentang atom pun berkembang dari waktu ke waktu sehingga mencapai tingkat kesempurnaan untuk kondisi pemahaman manusia tentang atom saat itu.

Pekembangan penelitian ilmiah dalam bidang kimia yang terjadi dalam kurun waktu antara abad ke-16 sampai dengan abad ke-17 telah mendorong manusia untuk mendefinisikan ulang mengenai atom. Dengan bukti-bukti ilmiah yang relatif baru untuk kondisi saat itu, pemahaman manusia mengenai atom terus mengalami peningkatan. Para ahli kimia segera menyadari bahwa semua cairan, gas dan benda padat dapat diuraikan menjadi komponen-komponen penyusunnya yang disebut elemen atau unsur dasar [8].

Dalam menganalisis oksida dari berbagai jenis logam, J.L. Proust (1754-1826) berpendapat bahwa perbandingan bahan-bahan dalam suatu senyawa kimia selalu tetap [4]. John Dalton (1766-1844) yang juga melakukan berbagai analisa sama seperti yang dilakukan Proust berusaha untuk menerangkan proses terjadinya reaksi kimia antara elemen-elemen. Dalton mencoba menerangkan reaksi tersebut dengan cara melakukan percobaan-percobaan yang menunjang pemahaman manusia tentang atom [5].

Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat bahwa teori tentang atom yang didasarkan pada hasil percobaan pertama kali dikemukakan oleh John Dalton pada 1804. Menurut Dalton, atom merupakan partikel terkecil yang tidak dapat dibagi lagi. Atom-atom suatu unsur semuanya serupa dan tidak dapat berubah menjadi unsur lain. Dua atom atau lebih yang berasal dari unsur-unsur berlainan dapat membentuk molekul. Pada suatu reaksi kimia, atom-atom berpisah tetapi kemudian bergabung lagi dengan susunan yang berbeda dari semula, tetapi massa keseluruhannya tetap. Pada reaksi itu atom-atom bergabung menurut perbandingan tertentu [9].

Dalton percaya bahwa reaksi kimia tidak mengubah atomnya sendiri, melainkan hanya mengubah susunannya. Dalton juga percaya bahwa atom-atom dalam suatu unsur itu benar-benar sama, tetapi berbeda dengan setiap atom dari unsur lain. Uraian yang rinci itu dituangkan Dalton dalam bukunya, *A New System of Chemical Philosophy*, yang diterbitkan pada 1808, empat tahun setelah selesai ditulis. Pada saat itu Dalton berhasil menyuguhkan teori atom dengan jernih dan jelas sehingga teorinya dapat digunakan untuk menerangkan kejadian-kejadian kimia dan dapat dibuktikan secara tepat di laboratorium. Hasil kerja para ahli kimia pada abad ke-18 telah melengkapi dasar teori atom Dalton. Teori atom itu selalu dapat digunakan dalam lapangan ilmu kimia, terutama dalam menerangkan kejadian-kejadian reaksi kimia yang baru ditemukan [5]. Friedrich Wohler (1800-1882) misalnya, dapat menerangkan temuannya berupa sintesa urea pada tahun 1828 dengan menggunakan teori atom Dalton ini. Penemuan-penemuan berikutnya dalam bidang kimia pada abad ke-18 telah memperkokoh teori atom

Dalton. Begitu meyakinkan cara Dalton menyuguhkan teori atomnya, sehingga dalam waktu 20 tahun teori tersebut dapat diterima oleh mayoritas ilmuwan. Pada saat itu keberadaan atom dapat dipercayai para ilmuwan, sekalipun mereka belum pernah melihat bentuknya [4].

Untuk mengenali lebih lanjut tentang keberadaan atom dari sudut pandang ilmu kimia, marilah kita mengambil salah satu contoh materi yang paling sederhana dalam kehidupan kita sehari-hari. Jika dalam menjalani kehidupan ini manusia membutuhkan air minum, maka dari air minum itu kita dapat menemukan atom. Dari satu gelas air, kita bisa mengambil setetes air. Dalam setetes air itu terdapat bertrilyun-trilyun molekul air. Molekul adalah bagian terkecil dari suatu materi yang masih memiliki sifat dasar materi. Jika segelas air bersifat cair pada suhu ruangan dan tidak berwarna, maka satu molekul airpun masih memiliki sifat dasar air, yaitu cair dan tidak berwarna.

Dalam ilmu kimia, air memiliki rumus molekul H_2O , yang berarti satu molekul air tersusun atas dua buah atom hidrogen (H) dan satu buah atom oksigen (O). Dalam hal ini atom merupakan bagian terkecil dari suatu materi yang sudah tidak memiliki sifat dasar materi. Atom hidrogen dan oksigen dalam keadaan terpisah (tidak membentuk molekul air) berada dalam bentuk gas pada temperatur ruangan. Dari gambaran sederhana di atas mudalah dimengerti apa sebenarnya atom itu. Atom tidak lain adalah bagian terkecil penyusun alam semesta ini. Materi pengisi jagad raya ini tersusun atas berbagai jenis atom yang saling berikatan sehingga membentuk molekul yang selanjutnya menghasilkan benda-benda seperti batu, kayu, air, udara, besi, tanah, hingga tubuh manusia dan sebagainya. Yang masih terus dipertanyakan oleh para ilmuwan sepanjang zaman adalah seperti apa bentuk atom itu. Berikut ini akan diuraikan perkembangan pemikiran manusia dalam merumuskan atau menggambarkan suatu atom.

2.2. Perkembangan Teori Atom

Penemuan-penemuan baru dalam bidang fisika ternyata mampu membuka cakrawala baru pemahaman atom oleh manusia. Penemuan-penemuan tersebut dimulai dari penemuan sinar katoda, penemuan elektron oleh Joseph J. Thomson dan keberhasilan Robert A. Millikan mengukur muatan elektron. Ketiga penemuan tersebut ternyata sangat membantu dalam memahami sifat-sifat atom serta gejala-gejala yang ditimbulkannya. Tiga penemuan fundamental tersebut telah melahirkan disiplin ilmu baru dalam kerangka fisika-kimia yang memandang atom tidak hanya dari sudut pandang reaksi-reaksi kimia yang dapat dihasilkannya, melainkan juga dari sifat-sifat fisika atom itu sendiri.

Sinar katoda adalah sinar bermuatan listrik negatif yang keluar atau dipancarkan dari katoda. Sinar ini dapat dihasilkan jika di antara dua elektroda (katoda dan anoda) diberi beda potensial listrik. Untuk menghasilkan berkas sinar katoda yang baik, kedua elektroda harus ditempatkan di dalam tabung bertekanan sangat rendah, kemudian salah satu elektroda dihubungkan dengan kutub negatif sumber potensial sangat tinggi sehingga berperan sebagai katoda. Sinar katoda muncul karena adanya lucutan muatan listrik melalui gas dalam sebuah tabung. Peristiwa itu ternyata dapat dipergunakan untuk mempelajari persoalan-persoalan yang berhubungan dengan atom.

Untuk menghasilkan lucutan diperlukan tabung lucutan terdiri atas tabung kaca yang mempunyai elektroda-elektroda pada kedua kutubnya. Kedua elektroda dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi hingga beberapa ribu Volt. Bila pada tabung yang berisi udara dengan tekanan normal satu Atmosfer (Atm) atau 760 mmHg dialiri listrik, ternyata tidak terjadi aliran arus meskipun tegangannya cukup tinggi. Tekanan gas dalam tabung dapat diperkecil dengan cara menyedot udara keluar tabung sehingga tekanannya turun sampai beberapa mmHg saja, jauh di bawah tekanan udara normal. Pada saat tekanan di dalam tabung mencapai 0,01 mmHg, seluruh cahaya dalam tabung akan hilang dan dinding gelap berpendar kehijau-hijauan. Peristiwa-peristiwa yang terjadi di dalam sinar katoda tersebut diselidiki terus oleh beberapa ahli

sekitar tahun 1870. Umumnya mereka percaya bahwa cahaya kehijau-hijauan itu adalah hasil radiasi dari sinar katoda yang bergerak dari katoda menuju anoda [9].

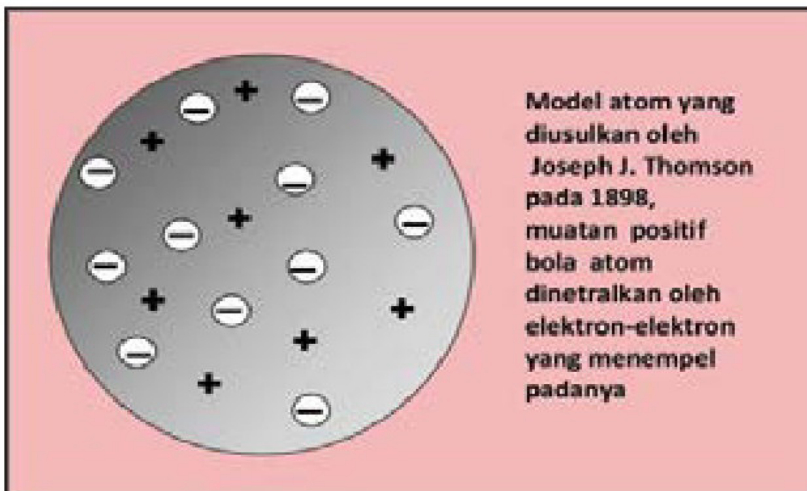
Yang masih menjadi pertanyaan pada saat itu adalah apakah sinar katoda ini merupakan cahaya atau partikel. William Crookes (1832-1919) melakukan percobaan lebih lanjut untuk memperjelas permasalahan yang ditemukan di laboratorium. Dengan menggunakan sebuah tabung yang selanjutnya disebut tabung Crookes, ia memberi rintangan bertanda silang antara katoda dan dinding tabung. Crookes mengamati adanya bayangan silang pada dinding tabung yang berpendar itu. Tanda silang dan bayangannya terletak dalam satu garis lurus dengan sumbu katoda. Hal ini menunjukkan bahwa sinar katoda merambat menurut garis lurus. Namun hasil penelitian ini ternyata belum dapat memutuskan apakah sinar katoda dihasilkan oleh partikel atau gelombang [10].

Penyelidikan yang lain berhasil mengungkap bahwa sinar katoda dibelokkan oleh medan magnet di dekatnya. Berkas sinar katoda yang keluar dari celah sempit dapat dilihat perjalanannya dengan sebidang tabir yang dilapisi sulfida seng. Tabir yang terkena sinar katoda akan berpendar menghasilkan warna biru. Apabila didekatkan sebuah magnet batang, perjalanan pita cahaya membelok dengan arah tertentu. Dari sini dapat diketahui bahwa sinar katoda terdiri dari suatu aliran partikel-partikel bermuatan negatif. Sinar katoda juga menyimpang di dalam medan listrik, hal ini diperlihatkan dengan cara melewatkan sinar tersebut di antara dua bidang kondensator bermuatan listrik.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan akhirnya diketahui bahwa sinar katoda terdiri dari muatan-muatan negatif yang lepas dari katoda menuju anoda. Thomson menyebut partikel-partikel bermuatan negatif tersebut dengan nama elektron. Dengan mempelajari sifat-sifat elektron ternyata Thomson sangat terbantu dalam mengenali sifat-sifat atom atau gejala-gejala yang ditimbulkannya. Dengan ditemukannya elektron itu maka runtuhlah pendapat dan aksioma yang menyatakan bahwa atom adalah unsur terkecil yang tidak dapat berubah dan bersifat kekal [4]. Penemuan elektron oleh Thomson menyebabkan teori yang

menyatakan bahwa atom merupakan materi terkecil yang tidak dapat dibagi-bagi lagi sebagaimana dikemukakan Dalton tidak dapat diterima lagi. Temuan elektron pada 1897 telah memberi landasan yang kuat untuk merekonstruksi model atom dengan melibatkan elektron.

Pada 1904 Thomson mengemukakan teori atom berdasarkan hasil temuannya. Dalam teori itu Thomson tetap berpegang pada pendapat bahwa atom takterbelahkan, namun Thomson maju selangkah dengan mencirikan sifat kelistrikan suatu atom. Menurut Thomson, atom mempunyai bentuk seperti bola yang muatan positifnya terbagi rata ke seluruh isi atom. Di dalam bola tersebut tertanam elektron-elektron bermuatan negatif seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Jumlah elektron selalu sama dengan jumlah muatan positif atom, sehingga atom secara keseluruhan berada dalam keadaan netral. Apabila atom itu kehilangan satu atau lebih elektron, atom menjadi bermuatan positif yang disebut ion positif [11].



Gambar 2.1. Model atom menurut Joseph J. Thomson [11]

2.3. Model Atom Terkini

Ernest Rutherford yang saat itu sedang menjabat sebagai gurubesar di Universitas Manchester, Inggris, tertarik pada kesederhanaan model atom yang dikemukakan Thomson. Untuk menguji kebenaran model atom itu, Rutherford pada 1909 dengan dibantu oleh dua asistennya Hans Geiger dan Ernest Marsden melakukan suatu percobaan dengan menembakkan partikel-partikel alfa, yaitu sejenis partikel sub atomik yang dipancarkan oleh inti atom radioaktif alam yang saat itu sudah dikenal luas oleh kalangan ilmuwan. Penembakan partikel alfa itu dilakukan terhadap suatu lempengan emas yang sangat tipis dengan ketebalan 0,01 mm.

Tugas yang diberikan kepada Marsden adalah menyelidiki lebih jauh hamburan partikel alfa yang ditembakkan pada selembar logam emas yang sangat tipis itu. Susunan peralatan percobaannya dibuat sedemikian rupa sehingga berkas partikel alfa menumbuk permukaan lembar emas secara tegak lurus. Asumsi utamanya adalah apabila model atom Thomson itu benar maka gerakan partikel alfa tidak akan dibelokkan sewaktu menumbuk lempengan emas. Partikel alfa dengan energi yang sangat besar dan massa yang jauh lebih besar dari massa elektron itu diharapkan akan bergerak lurus, tidak terganggu oleh elektron dan muatan positif dari atom emas yang menyebar memenuhi permukaan lempeng emas tersebut [12].

Hasil pengamatan oleh Geiger dan Marsden yang dilaporkan kepada Rutherford ternyata sangat jauh berbeda dari harapan semula. Kedua asisten itu melaporkan bahwa mereka menemukan beberapa partikel alfa yang mengalami pemantulan balik. Laporan ini sangat mengejutkan Rutherford karena sebelumnya memperkirakan bahwa simpangan arah gerak partikel alfa yang melewati lembaran logam emas dari arah datangnya semula memiliki sudut pembelokan yang sangat kecil. Landasan fisika yang membuat Rutherford terkejut adalah partikel alfa yang digunakan dalam penelitian itu bergerak dengan kecepatan sangat tinggi, sekitar 160.000 km/detik. Sementara lempengan emas yang sangat tipis seharusnya tidak bisa membangkitkan gaya yang cukup

besar untuk membalikkan arah gerak partikel alfa yang menembaknya. Kedua asistennya juga mengamati adanya partikel alfa yang menumbuk dinding tabung gelas di balik lempengan emas, tepat pada suatu titik dengan arah garis lurus di depan sumber partikel alfa. Jika atom dipandang sebagai bola pejal sebagaimana dikemukakan oleh Thomson, seharusnya atom itu tidak dapat ditembus langsung oleh partikel alfa [12].

Secara keseluruhan, dari hasil percobaan Geiger dan Marsden dilaporkan bahwa partikel alfa yang ditembakkan tidak seluruhnya mampu menembus lempeng emas secara lurus. Beberapa partikel alfa dibelokkan dan sebagian lagi dipantulkan kembali. Laporan hasil pengamatan itu memberi kesan kepada Rutherford, bahwa model atom Thomson tidak dapat diterima. Apa yang dilaporkan oleh Geiger dan Marsden menunjukkan bahwa muatan positif dari atom tidak menyebar, tetapi mengumpul pada suatu tempat di dalam tiap-tiap atom, sehingga muatan positif ini dapat membelokkan dan memantulkan kembali partikel alfa pada saat menumbuk atom tersebut.

Dari hasil percobaan itu akhirnya Rutherford berkesimpulan bahwa sebagian partikel alfa dipantulkan kembali karena bertumbukan dengan bagian yang sangat keras dari atom, yang oleh Rutherford disebut inti atom. Sementara partikel alfa lainnya diteruskan karena melewati ruang kosong antara inti atom dan elektron-elektron, sehingga mudah menembus lempengan emas tanpa halangan. Dengan demikian, model atom Thomson yang menyatakan bahwa massa atom tersebar merata di seluruh isi atom tidak dapat diterima lagi. Dengan gugurnya teori atom Thomson yang secara luas diterima oleh para ahli hingga akhir abad ke-18 itu, maka pada 1911 Rutherford menyusun dan mengusulkan model atom baru sebagai berikut [13]:

- Atom terdiri dari muatan positif dan negatif dimana semua muatan positif dan sebagian besar massa atom terkumpul pada suatu titik di tengah-tengah bola atom yang disebut inti atom.
- Inti atom dikelilingi oleh elektron-elektron bermuatan negatif pada jarak yang relatif jauh, dimana elektron-elektron berputar

pada lintasan-lintasan seperti planet yang bergerak mengelilingi matahari dalam sistem tata surya.

Jika model atom Thomson diuji oleh Rutherford dengan hamburan partikel alfa, maka model atom Rutherford pun harus diuji untuk membuktikan apakah teori itu sesuai dengan kaidah-kaidah fisika yang ada. Dari hasil pengujian terhadap model atom Rutherford ini diketahui bahwa kelemahan utama dari model atomnya terletak pada masalah kestabilan atom. Dalam gerakan mengelilingi inti, elektron akan kehilangan energi terus-menerus. Jika model ini diikuti maka elektron yang bergerak mengelilingi inti atom akan menempuh lintasan dengan jari-jari lintasan elektron yang semakin kecil karena berkurangnya energi elektron, sehingga lama-kelamaan elektron tersebut akan menempel pada permukaan inti atom.

Atom hidrogen merupakan atom paling sederhana dan telah diselidiki oleh para ahli baik secara teori maupun eksperimen. Dengan bantuan peralatan spektroskopi, Balmer pada 1885 mendapatkan hubungan antara nomor gelombang dan garis-garis spektrum tertentu dari atom hidrogen. Spektrum ini terdiri dari deretan garis-garis yang terpisah. Jika hidrogen ditempatkan di dalam tabung lucutan, maka akan terjadi pelucutan muatan karena beda potensial yang tinggi di dalam tabung itu. Gas menjadi bercahaya dan memancarkan cahaya merah kebiru-biruan. Cahaya ini dapat dianalisa memakai alat penganalisa spektrum yang disebut spektrograf [13].

Ada satu hal yang menarik pada model atom Rutherford, yaitu spektrum gelombang elektromagnetik yang dipancarkan elektron berdasarkan perhitungan berada dalam rentang cahaya tampak. Untuk tiap-tiap jari-jari orbit tertentu, panjang gelombang cahaya yang dipancarkannya juga tertentu. Jika jari-jari lintasan elektron mengecil, maka waktu putarnya juga akan mengecil sehingga frekuensi gelombang yang dipancarkannya akan bermacam-macam. Jika jari-jari orbit elektron itu secara kontinu terus mengecil, maka frekuensi gelombang cahaya yang dipancarkannya akan semakin kecil mendekati warna merah dengan pergeseran warna yang terjadi berlangsung secara kontinu pula. Dengan demikian atom

hidrogen tidak akan menunjukkan spektrum garis tertentu, tetapi suatu spektrum yang kontinu. Model atom Rutherford dengan demikian tidaklah stabil. Hal ini ternyata bertentangan dengan hasil pengamatan spektrum hidrogen dengan spektrometer yang menunjukkan spektrum garis tak-kontinu yang khas berupa garis-garis berwarna yang saling terpisah dan dikenal dengan nama deret Balmer [14].

Meski masih ada kelemahan dikaitkan dengan uji spektroskopi warna pancaran cahaya dari atom, keberhasilan model atom Rutherford dalam menjelaskan gejala hamburan partikel alfa menunjukkan bahwa model atom itu tidaklah terlalu keliru. Paling tidak, apa yang telah dikemukakan oleh Rutherford itu sudah mendekati model struktur atom yang memadai, meski masih perlu penyempurnaan. Masalah kestabilan model atom Rutherford akhirnya teratasi dengan sumbangan fisikawan teori Denmark, Niels Henrik Bohr (1885-1962). Kelemahan model atom Rutherford tersebut disempurnakan oleh Bohr dalam teori atomnya yang dikemukakan pada 1913.

Bohr menerapkan teori kuantum dalam studi spektrum atom yang dilakukannya. Meskipun spektroskop telah digunakan dalam analisis kimia sejak tahun 1859, namun tidak seorang pun dapat menjelaskan proses terbentuknya garis spektrum yang mempunyai ciri tersendiri. Bohr mengemukakan teori baru mengenai struktur dan sifat-sifat atom yang merupakan gabungan dari penemuan Ernest Rutherford mengenai struktur atom dan teori kuantum dari Max Planck. Bohr dengan cara yang mengagumkan dengan teori atomnya berusaha untuk memperhitungkan adanya garis yang berbeda-beda dalam spektrum. Dalam hal ini Bohr tidak mengemukakan teori atomnya sendiri, melainkan hanya menambahkan postulat terhadap teori atom Rutherford [15]. Dalam postulatnya Bohr mengatakan bahwa:

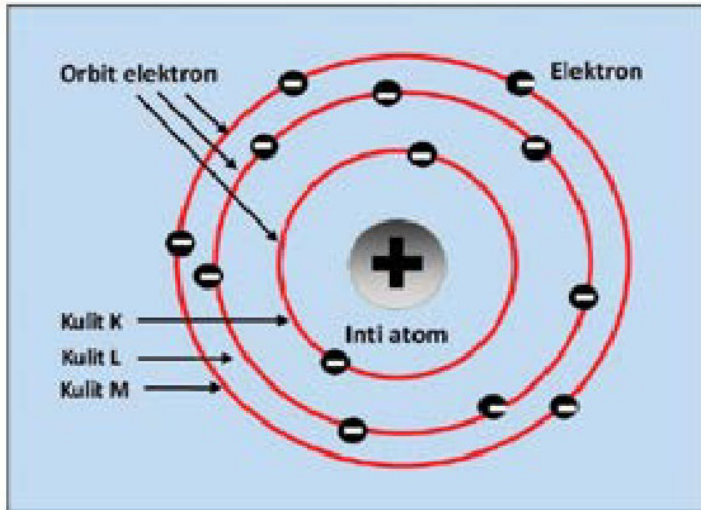
- Elektron tidak dapat berputar mengelilingi inti melalui sembarang lintasan, tetapi hanya dapat melalui lintasan-lintasan tertentu saja tanpa membebaskan energi. Lintasan ini disebut lintasan stasioner dimana elektron-elektron yang berada di dalamnya memiliki energi tertentu.

- Apabila terjadi perpindahan elektron dari lintasan luar menuju ke lintasan lebih dalam maka akan disertai pelepasan energi radiasi elektromagnetik, sebaliknya jika elektron pindah dari lintasan dalam menuju ke lintasan yang lebih luar akan terjadi penyerapan energi elektromagnetik.

Teori atom Bohr memudahkan perhitungan tentang adanya garis dalam spektrum suatu unsur. Apabila suatu unsur dipanasi, elektron bagian dalam orbit atom akan menyerap energi dari luar. Apabila suatu unsur didinginkan, elektron akan kehilangan energi dan kembali lagi ke orbit semula. Jika peristiwa ini terjadi, satu atau lebih kuantum energi akan dilepaskan dalam bentuk cahaya. Panjang gelombang cahaya yang dilepaskan (hal ini tentu saja berkaitan dengan frekuensi cahaya tersebut) bergantung pada kandungan energi dari kuantum yang dilepaskan. Bohr menemukan rumus matematika yang dapat digunakan untuk menghitung panjang gelombang dari semua garis yang muncul dalam spektrum hidrogen. Nilai hasil perhitungannya ternyata sangat cocok dengan nilai yang diperoleh melalui percobaan langsung. Hal ini dipakai sebagai bukti bahwa teori Bohr tentang spektrum atom adalah benar [16].

Model atom Rutherford yang disempurnakan oleh Bohr ini ternyata juga masih memiliki beberapa kelemahan, antara lain [15]:

- Lintasan elektron yang mengelilingi inti ternyata sangat rumit dan tidak berupa lingkaran saja.
- Model atom tersebut hanya dapat menerangkan model atom Hidrogen, sedang untuk atom berelektron banyak mempunyai perhitungan yang rumit sehingga sulit untuk diterangkan.
- Tidak dapat menerangkan pengaruh medan magnet terhadap spektrum atom.
- Tidak dapat menerangkan kejadian-kejadian dalam ikatan kimia dengan baik.



Gambar 2.2. Model atom Rutherford-Bohr [14]

Meskipun teori atom Bohr gagal dalam menerangkan spektrum atom yang lebih rumit, namun teori ini merupakan langkah maju ke depan, dan untuk sumbangan ini Bohr memenangkan Hadiah Nobel Bidang Fisika pada tahun 1922. Meski masih memiliki beberapa kelemahan, namun untuk mendapatkan gambaran secara singkat mengenai atom, model atom Rutherford-Bohr dewasa ini telah diterima secara luas. Dalam model ini digambarkan bahwa atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif dan kulit atom dengan sejumlah elektron bermuatan negatif yang mengitari inti atom melalui lintasan-lintasan tertentu. Oleh Bohr lintasan-lintasan elektron itu dinamai kulit K, kulit L, kulit M dan seterusnya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 [16].

2.4. Model Atom Mekanika Kuantum

Teori atom yang dikemukakan oleh Bohr menyatakan bahwa sebuah elektron menempati orbit yang jelas dan pasti dalam gerakannya mengelilingi inti, seperti orbit planet mengelilingi matahari. Sedang

pada tahun 1927 ahli fisika Jerman Werner Heisenberg membuktikan bahwa tidak mungkin menentukan dengan pasti posisi elektron dan momentumnya. Mekanika kuantum mengajarkan bahwa hal terbaik yang dapat dilakukan adalah menghitung kemungkinan matematis tentang letak elektron dalam daerah tertentu suatu ruangan.

Berdasarkan data-data yang terkumpul dari penemuan sebelumnya, ahli fisika Jerman Edwin Schrodinger mengemukakan model atom yang berbeda dari model-model sebelumnya. Model atom yang dikemukakannya memperhitungkan sifat gelombang dari elektron. Menurut teori atom ini, sebuah atom mempunyai muatan positif yang terletak di bagian tengah, tetapi elektron-elektronnya tidak berada pada orbit yang tetap. Hanya saja kebolehjadian untuk mendapatkan suatu elektron pada jarak tertentu dari inti dapat ditentukan, namun bukan merupakan jarak yang pasti dari inti ke sembarang elektron tertentu [17].

Setiap elektron dalam sebuah atom terikat oleh empat bilangan kuantum. Dua bilangan pertama ditemukan oleh Bohr, akan tetapi Bohr tidak dapat menerangkan mengapa kedua bilangan itu ada. Schrodinger menunjukkan bahwa bilangan itu muncul sebagai tetapan dalam pemecahan persamaan gelombangnya. Kemudian dua bilangan kuantum lainnya ditemukan dan keduanya juga merupakan tetapan yang sama dengan tetapan sebelumnya. Bilangan kuantum menunjukkan keadaan energi sebuah elektron. Bilangan ini juga dapat digunakan untuk menunjukkan daerah ruang atau orbital tempat elektron itu kemungkinan dapat ditemukan [17]. Keempat bilangan kuantum untuk menentukan kedudukan elektron dalam kulit atom tersebut adalah:

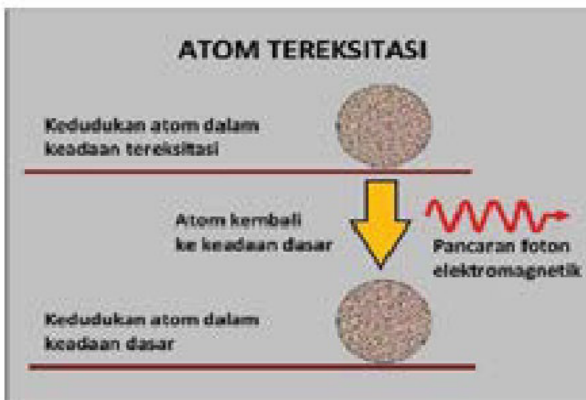
- Bilangan kuantum utama (n) yang menyatakan tingkat energi kulit atom dan mempunyai harga $n = 1, 2, 3$ dan seterusnya. Tingkat energi utama dari kulit atom dengan energi paling rendah adalah kulit yang letaknya paling dekat dengan inti dan mempunyai nilai $n = 1$. Kulit ini dinamai kulit K. Untuk kulit dengan tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu $n = 2, 3, 4$ dan sebagainya dinamai kulit L, M, N dan seterusnya.

- Bilangan kuantum azimutal (l) yang menyatakan banyaknya sub kulit atau sub tingkat energi pada masing-masing kulit atom. Harga l mulai dari 0 sampai dengan $(n-1)$. Sampai saat ini baru dikenal 4 sub kulit, yaitu : sub kulit *sharp* (s) dengan $l = 0$, sub kulit *principle* (p) dengan $l = 1$, sub kulit *diffuse* (d) dengan $l = 2$ dan sub kulit *fundamental* (f) dengan $l = 3$. Dengan demikian, pada kulit K dengan $n = 1$ hanya ada satu sub kulit dengan $l = 0$, pada kulit L ($n = 2$) terdapat 2 sub kulit dengan $l = 0$ dan $l = 1$, pada kulit M ($n = 3$) terdapat 3 sub kulit dengan $l = 0$, $l = 1$ dan $l = 2$ dan sebagainya.
- Bilangan kuantum magnetik (m) yang menyatakan banyaknya orbit elektron pada tiap-tiap sub kulit. Harga m mulai dari $-l$ sampai $+l$. Sub kulit s dengan $l = 0$ hanya mempunyai satu orbit elektron dengan $m = 0$. Sub kulit p dengan $l = 1$ mempunyai 3 orbit elektron dengan $m = -1$, $m = 0$ dan $m = +1$. Dengan cara yang sama sub kulit d mempunyai 5 orbit elektron dan sub kulit f mempunyai 7 orbit elektron.
- Bilangan kuantum spin (s) yang menyatakan perputaran elektron pada porosnya. Harga s adalah $+\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$. Selain bergerak mengelilingi inti, elektron juga berputar pada porosnya sendiri seperti halnya bumi yang bergerak mengelilingi matahari sambil berputar pada porosnya sendiri. Dari bilangan kuantum spin didapatkan bahwa tiap orbit hanya bisa ditempati 2 buah elektron masing-masing dengan spin $+\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$. Dengan ketentuan ini, maka sub kulit s dengan 1 orbit maksimum berisi 2 elektron, sub kulit p dengan 3 orbit maksimum berisi 6 elektron, sub kulit d dengan 5 orbit maksimum berisi 10 elektron dan sub kulit f dengan 7 orbit maksimum berisi 14 elektron.

Dengan menggunakan keempat bilangan kuantum di atas maka jumlah maksimum elektron pada masing-masing kulit dapat ditentukan, yaitu $2n^2$ dengan n adalah bilangan kuantum utama. Namun ketentuan ini harus didasari oleh asas yang dikemukakan pada tahun 1925 oleh ahli fisika Austria Wolfgang Pauli yang mengatakan bahwa tidak mungkin ada

dua elektron dalam satu atom yang memiliki lintasan dengan keempat bilangan kuantum (n , l , m dan s) tepat sama. Dengan aturan Pauli ini ternyata kulit dengan $n = 1$ sampai dengan $n = 4$ (kulit K, L, M dan N) masih dapat mengikuti aturan maksimum elektron yang diperkenankan, masing berisi 2, 8, 18 dan 32 buah elektron. Sedangkan kulit dengan $n = 5$ sampai dengan $n = 7$ (kulit O, P dan Q) tidak lagi memenuhi aturan $2n^2$, karena masing-masing kulit berturut-turut hanya berisi 32, 18 dan 2 buah elektron.

Sebuah elektron dapat berpindah dari lintasan tertentu ke lintasan lainnya. Lintasan-lintasan yang diperbolehkan akan menentukan tingkat energi elektron dalam lintasan itu. Lintasan yang paling stabil adalah yang paling dekat dengan inti, yaitu lintasan dengan $n = 1$ (kulit K). Dalam lintasan ini elektron mempunyai energi potensial yang paling rendah. Loncatan ke lintasan berikutnya, yaitu $n = 2, 3, 4$ (kulit L, M, N) dan seterusnya berarti elektron berada pada keadaan yang lebih tinggi. Dalam keadaan ini dikatakan bahwa atom berada dalam keadaan tereksitasi sehingga tidak stabil. Pada saat elektron kembali ke kedudukan semula, atom tersebut akan memancarkan energi dalam bentuk foton elektromagnetik dengan proses seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kondisi atom yang tereksitasi [13]

2.5. Susunan Berkala Unsur-unsur

Banyak unsur baru ditemukan dan dipelajari oleh para ilmuwan sejak masa John Dalton dan sesudahnya. Pada 1869, seorang ahli kimia dari Rusia Dmitri Ivanovich Mendeleev menemukan pola alami tertentu dengan keteraturan yang mendasari perbedaan sifat-sifat berbagai unsur kimia. Beliau selanjutnya menerbitkan catatan pendek dengan judul *The Correlation Between Properties of Elements and Their Atomic Weights*. Catatan itu dibuat setelah Mendeleev melakukan pengamatan terhadap 63 unsur kimia yang saat itu sudah dikenali para ilmuwan. Beliau menyimpulkan bahwa sifat-sifat unsur adalah fungsi periodik dari massa atom relatifnya. Artinya, jika unsur-unsur disusun menurut kenaikan massa atom relatifnya, maka sifat tertentu akan berulang secara periodik [18].

Karya yang dihasilkan Mendeleev sangat mendasar baik dalam ilmu kimia maupun ilmu fisika dan memiliki bentuk khusus sehingga sangat mudah disajikan dan difahami. Daftar berkala pertama yang cukup lengkap untuk ukuran saat itu berhasil menemukan pola alami tertentu yang mengungkapkan keteraturan perbedaan sifat berbagai unsur. Bagaimana mengelompokkan unsur-unsur kimia yang jumlahnya cukup banyak itu merupakan tantangan tersendiri yang dihadapi para ilmuwan jauh sebelum Mendeleev. Keberhasilan setahap demi setahap dalam memecahkan masalah itu memiliki arti yang sangat penting bagi perkembangan ilmu pengetahuan modern.

Penyusunan daftar berkala tidak didasarkan pada sekedar adanya kemiripan antara unsur-unsur, tetapi berhubungan erat dengan sifat kimia dan fisika unsur tersebut. Pada mulanya, Mendeleev menyusun unsur-unsur dalam satu baris sesuai dengan urutan berat atomnya, dimulai dari unsur yang paling ringan. Setiap unsur dalam daftar itu diwakili oleh lambang kimianya, seperti hidrogen dengan lambang H, helium dengan lambang He, litium dengan lambang Li dan seterusnya [19].

Mendeleev menempatkan unsur-unsur yang mempunyai kemiripan sifat dalam satu lajur vertikal yang disebut golongan. Lajur-lajur horizontal,

yaitu lajur unsur-unsur berdasarkan kenaikan massa atom relatifnya, disebut periode. Urutan penyusunan unsur-unsur itu selanjutnya dikenal sebagai tabel periodik karena Mendeleev menemukan sifat berulang dari unsur-unsur yang disusun berdasarkan teknik pengelompokan yang telah dilakukannya. Dari penyusunan itu akhirnya dihasilkan kelompok-kelompok unsur yang menempati kolom-kolom vertikal yang berbeda-beda. Unsur-unsur yang menempati kolom yang sama ternyata memiliki sifat-sifat kimia maupun fisika yang mirip antara satu dengan yang lainnya.

Karena belum lengkapnya jumlah unsur kimia yang diketahui pada saat itu, Mendeleev sengaja mengkosongkan beberapa tempat dalam kotak tabel periodiknya. Mendeleev menduga bahwa penyimpangan yang ditemukan dalam susunan berkala unsur-unsur itu karena para ahli kimia belum menemukan beberapa unsur kimia di alam. Dengan susunan berkala itu Mendeleev meramalkan sifat-sifat beberapa unsur kimia yang saat itu belum ditemukan. Ramalan tersebut didasarkan pada sifat unsur lain yang sudah dikenal, yang letaknya berdampingan baik secara mendatar maupun secara tegak. Tidak lama kemudian, unsur-unsur baru seperti gallium (Ga), scandium (Sc) dan germanium (Ge) berhasil ditemukan dengan sifat-sifat kimia yang dimilikinya cocok dengan yang diramalkan Mendeleev sebelumnya [20].

Pasangan unsur-unsur (misal nikel dan cobalt, iodine dan tellurium) yang tidak menunjukkan sifat-sifat yang sama dengan unsur-unsur lain dalam satu kolom dipertukarkan letaknya sehingga menunjukkan kesesuaian sifat-sifat kimianya. Mendeleev beranggapan bahwa ada kesalahan dalam mengukur berat atom dari unsur-unsur tersebut. Secara kebetulan daftar unsur-unsur yang disusun berdasarkan berat atom ternyata cocok dengan daftar yang disusun berdasarkan nomor atom, kecuali beberapa kasus penyimpangan sebagaimana ditemui oleh Mendeleev [21].

Pada 1913, Ahli kimia Inggris Henry Moseley melakukan eksperimen pengukuran panjang gelombang unsur-unsur kimia menggunakan sinar-X. Moseley menyimpulkan bahwa sifat dasar atom bukan didasari

oleh massa atom relatif seperti dugaan Mendeleev sebelumnya, melainkan berdasarkan kenaikan jumlah proton dalam inti atomnya. Moseley mengamati adanya unsur-unsur yang memiliki massa atom berbeda, tetapi memiliki jumlah proton sama atau dalam ilmu kimia lazim disebut isotop. Kenaikan jumlah proton ini mencerminkan kenaikan nomor atom unsur tersebut [22].

Berdasarkan percobaan Moseley para ilmuwan sepakat untuk menyempurnakan sistem periodik Mendeleev sehingga lahirlah sistem periodik modern. Pengelompokan unsur-unsur dalam sistem periodik modern merupakan penyempurnaan dari sistem periodik Mendeleev sebelumnya. Sistem periodik modern yang disebut juga sistem periodik bentuk panjang itu disusun berdasarkan kenaikan nomor atom dan kemiripan sifat-sifat atom seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Kini diketahui bahwa nomor atom merupakan dasar yang tepat untuk menyusun sifat berkala dari unsur-unsur kimia. Lajur-lajur horizontal yang disebut periode disusun berdasarkan kenaikan nomor atom, sedangkan lajur-lajur vertikal yang disebut golongan disusun berdasarkan kemiripan sifat.

Tanpa menyertakan dua unsur teringan (H dan He) yang susunan keduanya dikenal sebagai periode sangat pendek, Mendeleev menyusun delapan unsur urutan ketiga (Li) hingga ke-10 (neon, Ne) yang selanjutnya dikenal sebagai periode pendek pertama. Penyusunan yang sama dilakukan terhadap delapan unsur berikutnya dengan urutan 11 (natrium, Na) hingga 18 (argon, Ar) yang selanjutnya dikenal sebagai periode pendek kedua. Urutan berikutnya dikenal sebagai periode panjang pertama, berisi 18 unsur yang muncul di atas Ar, dimulai dari unsur urutan ke 19 (kalium, K) hingga 36 (Kripton, Kr). Disusul periode panjang kedua yang juga berisi 18 unsur dimulai dari unsur urutan ke 37 (rubidium, Rb) hingga 54 (xenon, Xe).

Berdasarkan urutan hasil penyusunan tersebut, Mendeleev mendapatkan pengelompokan unsur-unsur yang disusun horizontal sehingga menghasilkan satu periode sangat pendek yang terisi dua unsur, dua periode pendek (1 dan 2) yang terisi delapan unsur serta dua periode

panjang (1 dan 2) yang terisi penuh 18 unsur. Secara keseluruhan, kesatuan dari unsur-unsur dalam berbagai periode tersebut menghasilkan tabel periodik unsur-unsur. Untuk sementara, periode panjang ketiga dan keempat dilewatkan terlebih dahulu karena ada pengecualian.

TABEL PERIODIK UNSUR-UNSUR
[Sumber: multiaidnet.com, diunduh: 20 April 2015]

1 1A H																	18 8A He
2 2A Li	Be											13 3A B	14 4A C	15 5A N	16 6A O	17 7A F	18 8A Ne
3 3A Na	4 4A Mg	5 5A Al	6 6A Si	7 7A P	8 8A S	9 9A Cl	10 10A Ar										
4 4A K	5 5A Ca	6 6A Sc	7 7A Ti	8 8A V	9 9A Cr	10 10A Mn	11 11A Fe	12 12A Co	13 13A Ni	14 14A Cu	15 15A Zn	16 16A Ga	17 17A Ge	18 18A As	19 19A Se	20 20A Br	21 21A Kr
5 5A Rb	6 6A Sr	7 7A Y	8 8A Zr	9 9A Nb	10 10A Mo	11 11A Tc	12 12A Ru	13 13A Rh	14 14A Pd	15 15A Ag	16 16A Cd	17 17A In	18 18A Sn	19 19A Sb	20 20A Te	21 21A I	22 22A Xe
6 6A Cs	7 7A Ba	8 8A La-Lu	9 9A Hf	10 10A Ta	11 11A W	12 12A Re	13 13A Os	14 14A Ir	15 15A Pt	16 16A Au	17 17A Hg	18 18A Tl	19 19A Pb	20 20A Bi	21 21A Po	22 22A At	23 23A Rn
7 7A Fr	8 8A Ra	9 9A Ac-Lr	10 10A Rf	11 11A Db	12 12A Sg	13 13A Bh	14 14A Hs	15 15A Mt	16 16A Ds	17 17A Rg	18 18A Cn	19 19A Uut	20 20A Uuq	21 21A Uup	22 22A Uuh	23 23A Uus	24 24A Uuo
LANTHANIDS		58 58A La	59 59A Ce	60 60A Pr	61 61A Nd	62 62A Pm	63 63A Sm	64 64A Eu	65 65A Gd	66 66A Tb	67 67A Dy	68 68A Ho	69 69A Er	70 70A Tm	71 71A Yb	72 72A Lu	
ACTINIDS		88 88A Ac	89 89A Th	90 90A Pa	91 91A U	92 92A Np	93 93A Pu	94 94A Am	95 95A Cm	96 96A Bk	97 97A Cf	98 98A Es	99 99A Fm	100 100A Md	101 101A No	102 102A Lr	

Gambar 2.4. Susunan berkala unsur-unsur [23]

Sistem periodik modern terdiri atas tujuh periode dan dua golongan utama (A dan B). Setiap golongan dibagi lagi menjadi 8 golongan A (IA-VIIIA) dan 8 golongan B (IB-VIIIB). Sedang golongan VIIIB terdiri atas tiga golongan, yaitu golongan 8, 9 dan 10. Dari penyusunan itu akhirnya dihasilkan golongan-golongan unsur yang menempati 18 kolom vertikal berbeda-beda. Unsur-unsur yang menempati kolom sama ternyata memiliki sifat-sifat kimia maupun fisika yang hampir sama. Perhatikan misalnya, pada kolom 17 diisi oleh flour (F), clour (Cl), brom (Br) dan iodine (I) yang semuanya masuk dalam kelompok unsur halogen dengan sifat-sifat kimianya sangat mirip. Sedang pada kolom 18 di bagian paling kanan tabel periodik diisi oleh gas-gas mulia helium (He), neon

(Ne), argon (Ar), kripton (Kr), xenon (Xe) dan radon (Rn) dengan sifat-sifat yang sangat mirip antara satu dengan lainnya. Secara kimiawi, semua gas tersebut tidak reaktif. Dalam kondisi normal, semua gas mulia tidak bisa bereaksi dengan unsur-unsur lainnya. Secara fisika, semuanya berada dalam fasa gas pada suhu kamar. Sifat berulang unsur-unsur dalam tabel periodik terjadi juga pada valensi dan titik lebur unsur [23].

Meski ditemukan kemiripan-kemiripan yang sangat indah antar unsur-unsur yang menempati kolom-kolom yang sama dalam tabel periodik, namun ada juga keruwetan yang ditemui para ilmuwan dalam menyusun unsur-unsur pada periode panjang ketiga dan keempat. Jika periode panjang 1 dan 2 masing-masing berisi tepat 18 unsur, maka periode panjang ketiga yang dimulai dari unsur ke 55 (Cs) dan diakhiri pada unsur ke 86 (Rn), seharusnya periode ini berisikan 32 unsur. Untuk mengatasi keruwetan itu, maka pada bagian bawah tabel periodik selalu ditambahkan daftar unsur yang masuk dalam kelompok deret lantanida, dimulai dari unsur ke-57 (lanthanum, La) diikuti oleh 14 unsur lainnya mulai dari unsur ke-58 (cerium, Ce) dan diakhiri unsur ke-71 (lutetium, Lu). Inilah deret unsur lantanida. Istilah unsur tanah jarang seringkali juga dipakai untuk menamai ke-14 unsur yang mengikuti La dalam tabel periodik [22].

Seperti halnya periode panjang ketiga, penyusunan periode panjang keempat juga mengalami keruwetan yang sama. Periode ini dimulai dari unsur ke 87 (actinium, Ac) dan diakhiri pada unsur ke 103 (lawrencium, Lr) yang berarti periode ini berisikan 32 unsur. Untuk mengatasi masalah itu, maka pada bagian bawah tabel periodik, di bawah deret lantanida, juga selalu disertakan deret lain berisi 14 unsur yang dikenal dengan nama deret aktinida, dimulai dari unsur ke-89 (actinium, Ac) diikuti oleh 14 unsur kimia lainnya sebagai anggota deret aktinida dimulai dari unsur ke-90 (thorium, Th) dan diakhiri unsur ke-103 lawrencium (Lr). Semua unsur anggota deret aktinida itu bersifat radioaktif [23].

Ada perbedaan yang nyata antara deret lantanida dan aktinida. Pada deret lantanida, hampir semua unsur anggota deret itu dapat ditemukan di alam dengan inti stabil (tidak radioaktif), hanya satu unsur yaitu unsur

ke-61 (promethium, Pm) yang bersifat radioaktif. Sedang pada deret aktinida, unsur-unsurnya bersifat radioaktif yang selalu melakukan proses peluruhan. Hanya empat unsur pertama dari anggota deret itu, yaitu unsur ke 89 actinium (Ac), ke 90 thorium (Th), ke 91 (protactinium, Pa) dan ke 92 (uranium, U) yang masih dapat ditemukan di alam, karena meskipun bersifat radioaktif tetapi memiliki umur paro yang sangat panjang, mencapai milyaran tahun dan lebih panjang dari usia bumi, atau unsur tersebut merupakan hasil anak luruh dari unsur radioaktif berwaktu paro sangat panjang. Di alam, unsur U membentuk beberapa jenis isotop dengan umur paronya bervariasi, yang terpanjang dan dapat dinyatakan dalam satuan waktu geologi adalah ^{238}U (4,5 milyar tahun), diikuti ^{235}U (710 juta tahun). Unsur Th juga memiliki beberapa jenis isotop dengan umur paronya juga bervariasi, yang terpanjang adalah ^{232}Th (13,9 milyar tahun) [24].

Dua unsur anggota deret aktinida, yaitu Ac dan Pa, membentuk beberapa isotop yang umumnya berumur paro relatif pendek. Untuk Ac, umur paro terpanjangnya adalah 21,8 tahun (^{227}Ac), sedang untuk Pa umur paro terpanjangnya adalah 32,8 ribu tahun (^{231}Pa). Meski umur paro terpanjang yang dimiliki kedua unsur tadi jauh lebih pendek dari umur bumi, namun secara alamiah kedua unsur itu selalu terbentuk sebagai hasil anak luruh dari deret peluruhan uranium dengan radionuklida induknya ^{238}U (untuk Pa) dan peluruhan thorium dengan radionuklida induknya ^{232}Th (untuk Ac). Karena proses peluruhan kedua radionuklida induk (U dan Th) serta produksi kedua anak luruh (Pa dan Ac) itu sudah berlangsung lama sejak bumi terbentuk, maka kedua anak luruh sudah berada dalam keadaan setimbang dengan induknya masing-masing [6].

Penemuan sifat berkala merupakan penemuan yang paling mendasar baik dalam bidang kimia maupun fisika. Penemuan tabel periodik unsur-unsur itu sangat besar artinya bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Daftar berkala mempunyai bentuk khusus sehingga mudah dikenal oleh setiap ilmuwan. Melalui tabel itu, para ilmuwan dapat mengenali sifat-sifat kimia maupun fisika dari berbagai jenis unsur yang sudah diketahui dengan cara lebih mudah dan sistematis berdasarkan pengelompokan unsur-unsur dalam golongan. Ahli kimia khususnya mengakui bahwa

daftar berkala itu sangat diperlukan karena pengelompokan unsur-unsurnya didasarkan pada sifat-sifat tertentu yang dapat dimanfaatkan sebagai penunjuk jalan untuk meramalkan keberadaan serta sifat-sifat unsur kimia lainnya yang saat itu belum ditemukan [7].

Melalui daftar berkala, para ilmuwan selanjutnya dapat mengklasifikasikan unsur-unsur menjadi kelompok logam, semi logam maupun bukan logam. Pada saat Mendeleev menyusun tabel berkala, baru ada 70 jenis unsur yang dikenal dan memiliki sifat yang berbeda-beda. Perbedaan yang jelas antara unsur-unsur itu adalah bahwa 20 di antaranya dikelompokkan sebagai bukan logam, sebagian besar sisanya adalah logam, sedang sebagian yang lain termasuk dalam keadaan antara logam dan bukan logam yang biasanya disebut sebagai *metalloid*. Unsur bukan logam pada umumnya lebih ringan dibandingkan dengan unsur logam. Pengetahuan mengenai sifat-sifat fisika maupun kimia unsur juga berkaitan langsung dengan kegunaannya.

Kini diketahui bahwa sifat berulang pada tabel Berkala Mendeleev disebabkan oleh jumlah elektron dalam kulit atom. Pada atom yang netral, jumlah elektron diimbangi oleh jumlah proton yang sama di dalam inti atom. Elektron yang berada pada kulit atom terluar disebut sebagai elektron valensi. Valensi adalah kemampuan suatu atom untuk bergabung dengan atom lainnya dalam reaksi kimia. Hanya elektron yang berada dalam kulit terluar yang mengambil bagian pada reaksi kimia ini [18].

BAB 3

INTI ATOM

Diperlukan waktu yang cukup panjang untuk membawa para ilmuwan percaya bahwa atom dapat diuraikan lebih lanjut menjadi kulit atom dan inti atom. Sejak permulaan abad ke-20 telah diketahui bahwa dalam kulit atom terdapat elektron-elektron yang bergerak mengelilingi inti. Namun pada saat itu para ilmuwan belum tahu secara pasti, komponen-komponen apa saja yang menyusun inti atom. Penerimaan model atom seperti yang diusulkan oleh Ernest Rutherford dan Niels Bohr oleh banyak kalangan ilmuwan akhirnya mendorong para fisikawan dan kimiawan untuk menguji lebih lanjut sifat-sifat inti atom. Belakangan diketahui bahwa inti atom sebenarnya hanyalah bagian yang sangat kecil dari sebuah atom, sedang atom itu sendiri merupakan bagian yang terkecil dari sebuah materi.

Dalam membahas mengenai fenomena-fenomena fisika yang dapat terjadi di dalam inti atom, ternyata kita harus berhadapan dengan bidang bahasan yang sangat luas. Hal ini tentu saja sangat erat kaitannya dengan berbagai macam fenomena fisika beserta informasi lain yang terkandung di dalam inti atom tersebut yang telah berhasil dikuak oleh para ilmuwan. Bahkan hingga kini, banyak informasi yang terkandung di dalam inti atom itu masih terus dipelajari oleh para ilmuwan dari berbagai kalangan disiplin ilmu. Berbagai penelitian dalam skala besar yang melibatkan banyak ilmuwan terus dilakukan dalam rangka memperoleh informasi untuk mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkaitan dengan inti atom. Dalam kehidupan sehari-hari, kajian yang mengkhususkan pada masalah inti atom itu berada pada wilayah ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir.

3.1. Struktur Inti

Tujuan utama dari para ilmuwan mempelajari fisika nuklir adalah untuk mendapatkan sekumpulan bukti-bukti eksperimental yang korelasi antara bukti-bukti tersebut akan dikaji dan diuji lebih lanjut untuk

menyusun model sehingga gambaran fisik suatu inti atom menjadi lebih jelas. Sebagian besar penelitian mengenai atom melibatkan analisis partikel bermuatan positif dari bahan-bahan yang berbeda. Penelitian demi penelitian terus dilakukan oleh para fisikawan. Dari semua penelitian itu, diketahui bahwa partikel bermuatan positif yang paling ringan yang pernah ditemukan mempunyai massa sama dengan atom hidrogen (H) [25].

Bermula dari masa purna bhakti Joseph J. Thomson pada 1919, akhirnya Ernest Rutherford dipromosikan menduduki jabatan guru besar fisika eksperimental di Laboratorium Cavendish menggantikan posisi Thomson [5]. Ada satu pekerjaan rumah aneh yang selalu menyita pemikiran Rutherford. Melalui studi dengan spektrograf massa, saat itu para ilmuwan juga sudah mengetahui bahwa massa atau berat semua atom hampir merupakan kelipatan bulat berat satu atom hidrogen [19]. Kenyataan ini memberi kesan bahwa semua jenis atom yang ditemukan di alam ini dibangun dari satu jenis atom saja, yaitu H. Lebih tepatnya, inti atom H berperan sebagai satuan massa. Temuan ini menempatkan inti atom H pada posisi sangat penting, sehingga oleh Rutherford diberi nama proton (p), suatu kosakata Yunani yang berarti “yang pertama”. Proton pertama kali ditemukan secara eksperimen oleh CD. Anderson pada tahun 1932. Dari penelitian itu diketahui bahwa proton merupakan partikel bermuatan listrik positif (+) yang sama besarnya dengan muatan sebuah elektron, hanya tandanya saja yang berbeda [19].

Rutherford merupakan orang pertama yang menduga bahwa inti atom tersusun atas proton dan elektron (e). Hipotesa proton-elektron sebagai penyusun inti dihubungkan dengan sifat-sifat elektron bebas. Diusulkan bahwa elektron diikat oleh partikel bermuatan positif dan tidak memiliki sifat independen di dalam inti. Salah satu kemungkinannya, sebagaimana diusulkan oleh Rutherford di awal tahun 1920, adalah bahwa elektron dan proton mungkin bergabung sangat dekat sehingga membentuk partikel netral. Partikel hipotetis ini selanjutnya diberi nama neutron (n).

Kala itu aluminium merupakan jenis atom yang sudah dikenal luas dan banyak dipelajari oleh para ilmuwan. Dari pengukuran kandungan muatan diketahui bahwa inti atom aluminium bermuatan listrik 13, padahal massanya yang terukur adalah 27 kali massa proton. Artinya, jika asumsi inti atom tersusun atas proton-proton itu benar adanya, seharusnya muatan listrik yang dimiliki oleh inti aluminium tadi adalah juga 27. Karena perbedaan angka itu, maka Rutherford menduga bahwa di dalam inti atom mengandung sejumlah elektron bermuatan negatif yang menetralkan beberapa muatan positif proton [5]. Dalam hal ini di dalam inti atom aluminium mengandung 14 buah elektron yang menetralkan 14 buah proton sehingga muatan intinya tinggal 13. Diasumsikan bahwa elektron dan proton mungkin bergabung sangat dekat sehingga membentuk partikel netral. Partikel hipotetis ini memiliki massa yang hampir sama dengan proton. Keyakinan adanya partikel netral itu dikemukakan juga oleh WD. Harkins dari Amerika Serikat dan O. Masson dari Australia.

Namun studi intensif yang detil tentang garis-garis spektrum dari suatu atom ternyata dapat menggagalkan asumsi tersebut. Selain itu, pada awal abad 20, semua metode untuk mendeteksi partikel seukuran inti didasarkan pada efek muatan listrik partikel tersebut, seperti pembelokan partikel oleh medan magnet atau medan listrik serta proses pengionan. Keberadaan neutron yang tidak memiliki muatan listrik akan sangat sulit untuk dideteksi, sementara beberapa usaha yang telah dilakukan gagal untuk menemukan neutron tersebut [5].

Deretan panjang usaha pencarian neutron akhirnya mulai menampakkan hasil lewat eksperimen dua fisikawan Jerman, Walther Wilhelm Georg Bothe (1891-1957) dan Herbert Becker, pada 1930. Mereka melaporkan, apabila unsur-unsur ringan seperti lithium (Li), Beryllium (Be), dan boron (B) ditembak dengan partikel alfa yang dipancarkan dari unsur polonium (Po), maka teramati adanya pancaran radiasi dengan daya tembus sangat tinggi [6]. Saat itu mereka menduga bahwa radiasi yang dipancarkan itu adalah sinar gamma berenergi tinggi. Penelitian serupa yang dilakukan selang dua tahun kemudian oleh Jean Frederic Joliot (1900-1958) bersama istrinya, Irene Joliot-

Curie (1897-1956) memperlihatkan, apabila radiasi yang diamati oleh kedua ilmuwan Jerman Bothe dan Becker itu dijatuhkan pada selembur layar lilin paraffin yang banyak mengandung atom H, maka radiasi itu dapat mementalkan keluar proton dari paraffin yang bergerak dengan kecepatan tinggi [5].

Percobaan Joliot-Curie akhirnya diulang kembali oleh Sir James Chadwick pada tahun yang sama. Chadwick mengukur secara lebih teliti kecepatan proton yang terpental dan membandingkannya dengan massa partikel alfa yang ditembakkan. Dari sini disimpulkan bahwa radiasi gamma yang diduga oleh Bothe dan Becker ternyata tidak cocok dengan data yang dimiliki Chadwick. Radiasi yang diamati oleh Bothe dan Becker baru cocok apabila radiasi itu dipandang sebagai berkas partikel netral dengan massa yang sama dengan massa proton.

Banyak usaha telah dilakukan Rutherford untuk mengamati proses pembentukan partikel netral yang diasumsikannya. Rutherford bersama muridnya Sir James Chadwick (1891-1974) mencoba menemukan partikel netral itu dengan melakukan penelitian di Laboratorium Cavendish [14]. Penelitiannya dilakukan dengan cara menembaki target aluminium dengan partikel alfa yang dipancarkan dari sumber berupa bahan radioaktif alamiah. Meski tidak menghasilkan temuan apapun, belakangan diketahui bahwa apa yang dilakukan oleh Rutherford dan Chadwick ini sudah berada di jalur yang benar [5].

Melalui metode penelitian yang sama namun mengganti target unsur aluminium dengan unsur berillium, pada 1932, Chadwick mengamati adanya pancaran partikel berdaya tembus tinggi yang belum pernah ditemui sebelumnya. Setelah dilakukan penyelidikan lebih lanjut ternyata partikel tersebut tidak bermuatan listrik atau netral, sehingga partikelnya disebut neutron. Laporan temuan ini dipublikasikan dalam jurnal ilmiah Inggris, *Nature*, pada 1932. Penemuan neutron dinilai sebagai temuan penting karena telah membuka pintu gerbang menuju penelitian dan pengembangan fisika modern lebih lanjut [26].

Partikel neutron ternyata sangat berbeda dengan proton, karena neutron tidak menghasilkan jejak di dalam detektor kamar kabut, juga tidak

menghasilkan pengionan di dalam detektor kamar pengion. Karena tidak menimbulkan efek apapun pada kedua detektor tadi, Chadwick menyimpulkan bahwa muatan partikel neutron yang ditemukannya adalah nol. Di samping itu, Chadwick juga mengamati bahwa massa dari neutron ternyata hampir sama dengan massa proton. Kecocokan antara penjelasan dengan data hasil percobaan akhirnya menempatkan Chadwick sebagai penemu neutron. Sebagai bentuk penghargaan atas hasil jerih payah Chadwick dalam mengungkap jati diri neutron itu, maka panitia Nobel Fisika menganugerahkan hadiah bergengsi dengan menempatkan Chadwick sebagai pemenang Nobel Fisika 1935 [26].

Temuan secara detil karakteristik neutron membuka jalan lebar bagi pengembangan fisika nuklir modern, terutama dalam upaya mendefinisikan inti atom. Para fisikawan teori segera menanggapi temuan neutron secara serius. Penemuan Chadwick telah membuka cakrawala baru untuk penelitian berikutnya. Para ilmuwan mulai mencoba menyusun model inti atom berdasarkan sejumlah pengamatan yang telah mereka lakukan. Penemuan partikel neutron mendorong munculnya hipotesa bahwa setiap inti atom hanya tersusun atas proton dan neutron saja. Sebagai partikel penyusun inti atom, kesatuan dari proton dan neutron ini disebut nukleon. Hipotesa ini digunakan untuk pertama kalinya sebagai dasar teori inti atom yang detil oleh Heisenberg pada 1932 [12].

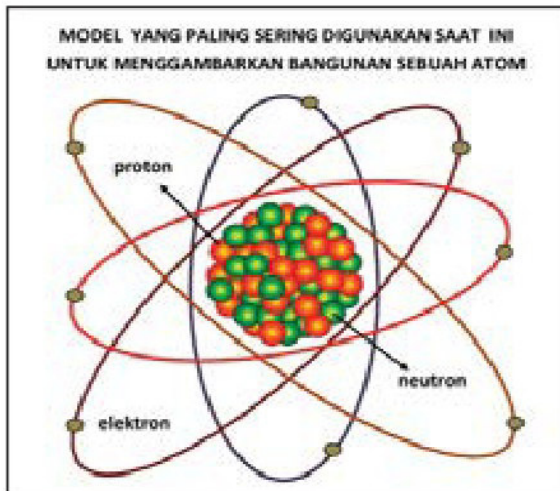
Dari beberapa bukti penemuan yang terkumpul dapat disimpulkan bahwa setiap atom dapat diuraikan menjadi dua bagian utama, yaitu kulit atom dan inti atom. Pada bagian kulit terdapat elektron, sedang pada bagian inti terdapat proton dan neutron seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Jumlah proton dalam inti sama dengan nomor setiap atom, atau sama juga dengan jumlah elektron pada kulit atom, sedang jumlah proton dan neutron sama dengan berat atom yang selanjutnya disebut sebagai nomor massa inti atom.

Dengan diterimanya model inti atom yang dicirikan dengan nomor atom dan nomor massa, maka disepakati suatu aturan penulisan inti atom yang dicirikan dengan keadaan intinya, yaitu jumlah proton dan neutron yang

terkandung di dalamnya. Untuk maksud-maksud tertentu, penulisan suatu atom seringkali menyertakan data nuklir paling sederhana, yaitu nomor atom (Z) dan nomor massa (A) inti atom tersebut. Untuk mempermudah dalam mendapatkan informasi dari suatu atom, baik dalam fisika maupun kimia inti seringkali atom ditulis dengan lambang sebagai berikut:



dengan X menyatakan nama atom, Z menunjukkan jumlah proton dalam inti, sedang A menunjukkan jumlah proton dan neutron dalam inti atom.



Gambar 3.1. Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang tersusun atas elektron [18]

Pada atom yang netral, jumlah elektron pada kulit sama dengan jumlah proton dalam inti, sehingga Z menunjukkan juga jumlah elektron pada kulit. Dengan demikian jumlah neutron (N) dalam inti adalah : $A - Z$. Nama-nama atom dapat dikenali dari simbol kimianya seperti

disajikan pada susunan berkala atom-atom yang disusun oleh Dmitri Ivanovic Mendeleev tahun 1869. Setiap atom memiliki simbol kimia sendiri-sendiri, seperti atom hidrogen mempunyai simbol H, oksigen mempunyai simbol O dan sebagainya.

Untuk mendapatkan gambaran mengenai nomor atom dan nomor massa suatu inti, berikut diberikan contoh atom. Dari susunan berkala atom-atom kita dapat mengetahui bahwa nama atom dengan simbol U adalah uranium dengan $Z = 92$ dan $A = 235$. Dari data tersebut dapat ditentukan jumlah elektron, proton dan neutron dalam atom U sebagai berikut:

- Jumlah elektron (Z) = 92
- Jumlah proton (Z) = 92
- Jumlah neutron (N) = $A - Z = 235 - 92 = 143$

3.2. Ukuran Inti

Untuk melengkapi gambaran tentang atom, perlu juga dibahas mengenai ukuran dan massa atom. Keingintahuan tentang ukuran dan massa dari suatu atom telah menyita perhatian ratusan ilmuwan dalam kurun waktu yang cukup lama. Belum adanya instrumen yang memadai dan teknik pengukuran yang dapat diandalkan menjadi penghalang utama para ilmuwan dalam menemukan jawaban yang memuaskan mengenai ukuran atom tersebut. Namun dengan perkembangan penguasaan ilmu pengetahuan, akhirnya para ilmuwan berhasil melakukan penelitian untuk mendapatkan informasi yang akurat tentang ukuran dan massa dari berbagai jenis atom [19].

Dengan memanfaatkan bilangan Avogadro kita dapat memperkirakan volume suatu molekul, kita ambil molekul air sebagai contoh. Dalam percobaannya Avogadro mendapatkan bahwa di dalam 1 mol gas terdapat $6,02 \times 10^{23}$ buah molekul. Bilangan inilah yang disebut bilangan Avogadro. ($N = 6,02 \times 10^{23}$ atom atau molekul, cara mendapatkan bilangan Avogadro tidak dibahas disini). Diasumsikan bahwa molekul-molekul air saling berikatan sangat erat antara satu sama lainnya

sehingga jumlah ruang kosong dapat diabaikan dibandingkan dengan volume molekul itu sendiri [19]. Air sebanyak 1 mol atau 18 gram dengan kerapatan 1 gr/cm^3 menempati volume 18 cm^3 . Dengan demikian dalam 18 cm^3 itu terdapat $6,02 \times 10^{23}$ molekul air. Volume untuk satu buah molekul air dengan asumsi molekul itu berbentuk kubus adalah $3 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$. Namun jika molekul itu diasumsikan berbentuk bola, volumenya kira-kira $2/3$ lebih kecil, yaitu $2 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$.

Jari-jari (r) dari molekul air dapat diperkirakan menggunakan persamaan sebagai berikut²³:

$$V_{\text{bola}} = \pi r^3 = 2 \times 10^{-23} \text{ cm}^3 \quad (3-1)$$

sehingga diperoleh nilai $r = 1,7 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Dengan cara yang sama diperoleh jari-jari sebagian besar unsur-unsur gas dan senyawa kimia lainnya dengan nilai berkisar antara $r = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}$ sampai $r = 3 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Karena jumlah atom untuk setiap jenis molekul bahan-bahan yang diukur relatif sedikit (dalam molekul air dengan rumus kimia H_2O misalnya, terdapat 2 atom H dan 1 atom O), maka angka 10^{-8} cm dapat dipakai untuk menyatakan orde jari-jari suatu atom. Ukuran dari sebuah atom adalah sedemikian kecilnya dimana setetes air dapat mengandung lebih dari satu juta-juta-milyar atom [6]. Untuk menyatakan ukuran atom seringkali digunakan satuan panjang dalam *Angstrom* (\AA), dimana $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$.

Perkiraan jari-jari atom pada unsur-unsur padat dapat dilakukan melalui pengukuran volume atom, yaitu volume mol (gram-atom) dari unsur yang bersangkutan pada titik lebur. Dalam fasa padat pada titik lebur ini atom-atom berkumpul pada jarak yang sangat dekat sehingga jarak antar atom-atom itu tidak jauh lebih besar dibandingkan dengan ukuran atau dimensi atomnya sendiri. Timbal padat pada kondisi titik lebur mempunyai kerapatan 11 gr/cm^3 dan volume 1 mol pada kondisi itu adalah $18,9 \text{ cm}^3$. Dengan demikian volume per atomnya adalah $3,15 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$. Jika atom timbal tadi diasumsikan berbentuk kubus (tidak ada ruang bebas), ukuran atomnya menjadi kira-kira $3,2 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Sedang jika diasumsikan berbentuk bola dan ruangan kosong antar

atom disertakan dalam perhitungan, jari-jari atom timbal kira-kira $1,6 \times 10^{-8}$ cm [19].

Beberapa jenis unsur padat juga telah dihitung jari-jari atomnya, seperti carbon ($0,77 \times 10^{-8}$ cm), aluminium ($1,45 \times 10^{-8}$ cm), sodium ($1,9 \times 10^{-8}$ cm), cesium ($2,6 \times 10^{-8}$ cm), timah ($1,4 \times 10^{-8}$ cm) dan bismuth ($1,5 \times 10^{-8}$ cm). Unsur-unsur padat tersebut mewakili unsur-unsur yang mempunyai massa atom golongan ringan, menengah dan berat. Orde jari-jari unsur-unsur tadi ternyata sama dengan orde jari-jari atom unsur-unsur lainnya yang berbentuk gas. Data tersebut menunjukkan bahwa atom memiliki ukuran dalam orde 10^{-8} cm tanpa menghiraukan massa atomnya. Cesium merupakan atom dengan jari-jari paling besar [19].

Mengingat massa suatu atom, inti atom dan partikel-partikel penyusunnya sangat kecil, maka untuk menyatakan massa tersebut digunakan *satuan massa atom* atau sering disingkat sma (*amu = atomic mass unit*). Nomor massa suatu atom (A) menunjukkan pula massa atom tersebut dalam sma. Misal ^{235}U berarti massa satu atom U adalah 235 sma. Kongres *Tenth General Assembly of the Union of Pure and Applied Physics* pada 1960 telah menetapkan bahwa massa atom carbon-12 (^{12}C) dijadikan standar untuk menentukan massa atom-atom lainnya. Dalam hal ini atom ^{12}C bermassa 12,000,000 sma, sehingga 1 sma = $(1/12) \times$ massa ^{12}C .

Massa dari sebuah atom atau molekul dalam gram dapat dihitung dengan cara membagi massa mol atom atau molekul (m) tersebut dengan bilangan Avogadro (N). Karena penentuan massa suatu atom didasarkan pada massa atom ^{12}C , maka penentuan massa atom dalam gram juga dapat ditentukan melalui penurunan dari atom ^{12}C . Massa 1 mol ^{12}C adalah $m = 12$ gram, karena dalam 1 mol terdapat $N = 6,02 \times 10^{23}$ atom ^{12}C , maka massa untuk 1 atom ^{12}C adalah:

$$w = \frac{m}{N} = \frac{12}{6,02 \times 10^{23}} = 2 \times 10^{-23} \text{ gram} \quad (3-2)$$

Karena massa 1 atom $^{12}\text{C} = 12$ sma, maka $12 \text{ sma} = 2 \times 10^{-23} \text{ gram}$ atau :

$$1 \text{ sma} = 1,666 \times 10^{-24} \text{ gram}$$

Dari perhitungan diperoleh informasi bahwa atom yang paling ringan, yaitu atom hidrogen, mempunyai massa $1,67 \times 10^{-24}$ gram. Atom yang terbentuk secara alamiah dan mempunyai massa paling berat adalah uranium, dengan massa $3,95 \times 10^{-22}$ gram. Sedang massa dari partikel-partikel penyusun atom adalah sebagai berikut [12]:

- massa proton (m_p) = 1,007287 sma atau $1,6725 \times 10^{-24}$ gram
- massa neutron (m_n) = 1,008665 sma atau $1,6748 \times 10^{-24}$ gram
- massa electron (m_e) = 0,000549 sma atau $9,1091 \times 10^{-28}$ gram

Untuk melengkapi pembahasan tentang atom, kita perlu juga menengok ke dalam inti atom itu. Jika kita menganggap inti atom itu bulat, maka kita dapat menyatakan ukuran inti itu dengan jari-jari inti. Tentu saja kita harus menggunakan konsep ini dengan beberapa ketentuan. Hasil penelitian yang diperoleh BD. Hahn dan kawan-kawan menunjukkan bahwa kerapatan suatu inti bervariasi bergantung pada jarak dari titik tengah (pusat) inti itu. Kerapatan inti cukup konstan untuk jarak-jarak tertentu dari titik pusat, dan perlahan-lahan berkurang hingga mendekati nol di dekat permukaan inti atom.

Jari-jari inti atom dapat didefinisikan sebagai jarak dari pusat inti ke suatu titik dimana kerapatan inti turun menjadi setengahnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jari-jari inti proporsional dengan $A^{1/3}$, dengan A adalah nomor massa dari inti. Jari-jari inti, r , dapat dirumuskan dengan [19]:

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (3-3)$$

dengan r_0 adalah tetapan yang harganya sama untuk semua jenis atom. Nilai yang diterima secara luas saat ini adalah $r_0 = 1,4 \times 10^{-13}$ cm.

Volume setiap benda berbentuk bulat adalah $V = \pi r^3$, sehingga volume inti dapat dihitung menggunakan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V &= \frac{3}{4} \pi r^3 = \pi (r_0)^3 A \\ &= 1,12 \times 10^{-39} A \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3-4)$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa volume suatu inti proporsional dengan jumlah proton dan neutron (nukleon), A . Hal ini mengindikasikan bahwa nukleon-nukleon selalu berada pada jarak rata-rata yang tetap, tidak bergantung pada jumlah partikel, sehingga volume per nukleon mempunyai nilai yang tetap dan sama untuk semua jenis atom [18].

Jika dalam pembahasan mengenai atom seringkali digunakan ukuran Angstrom (\AA), maka dalam pembahasan mengenai inti atom satuan yang sering digunakan dalam *Fermi* (Fm), dimana $1 \text{ Fm} = 10^{-13} \text{ cm}$. Hasil penelitian Rutherford dan para pembantunya melalui hamburan partikel alfa menunjukkan bahwa jari-jari sebuah inti atom berkisar dari 0,1 sampai 1 Fm (10^{-13} sampai 10^{-12} cm). Jika diameter atom berorde 10^{-8} cm , maka diameter sebuah inti kira-kira 10^{-5} sampai 10^{-4} kali diameter atom. Dari beberapa perhitungan diketahui bahwa jika inti atom digambarkan sebagai bola yang sangat kecil, maka volume inti atom itu berorde antara 10^{-39} cm^3 sampai 10^{-36} cm^3 .

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas, marilah atom itu kita perbesar hingga 10^{13} (sepuluh trilyun) kali. Dari perbesaran ini akan diperoleh bola atom raksasa dengan jari-jari kulitnya satu kilometer ($10^8 \text{ cm} \times 10^{13} = 10^5 \text{ cm}$ atau 1 km) dan inti atom di dalamnya kira-kira sebesar buah apel (berorde $10^{-12} \text{ cm} \times 10^{13} = 10 \text{ cm}$). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa inti atom hanya menempati ruangan sebesar 2×10^{-10} persen dari volume atom secara keseluruhan. Jadi atom pada prinsipnya hanyalah ruangan kosong yang tidak ada apa-apanya kecuali elektron yang dianggap tidak bermassa. Massa inti meliputi 99,975 persen dari total massa atom [19].

Karena massa dari elektron adalah sedemikian kecilnya dibandingkan dengan massa proton dan neutron (massa elektron = $1/1840$ massa proton), maka dalam pembahasan mengenai atom seringkali elektron dianggap sebagai elemen penyusun atom yang tidak mempunyai massa atau massa dari elektron dianggap nol. Sedang proton dan neutron masing-masing bermassa satu sma. Oleh sebab itu, massa suatu atom hanya terpusatkan pada bagian inti atomnya saja. Suatu inti dengan nomor massa A mempunyai massa kira-kira $m = 1,66 \times 10^{-24} A$ gram,

sehingga kerapatan rata-rata inti adalah [19]:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,66 \times 10^{-24} \text{ A}}{1,22 \times 10^{-39} \text{ A}} \quad (3-5)$$

$$\rho = 1,49 \times 10^{15} \text{ gram/cm}^3$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa kerapatan inti tidak bergantung pada A. Jika dibandingkan dengan kerapatan materi dalam bentuk serbuk dengan kerapatan sekitar $1,5 \text{ gram/cm}^3$, maka kerapatan materi inti atom adalah 10^{15} (seribu trilyun) kali lebih besar. Angka tersebut memberikan gambaran kepada kita tentang mampatnya nukleon-nukleon dalam inti. Ini berarti bahwa jika materi dengan volume 1 cm^3 (setara dengan satu sendok teh atau seukuran kelereng kecil) yang tersusun dari partikel-partikel inti saja seperti proton dan neutron, maka massa materi tersebut berorde ribuan trilyun kilogram. Materi seberat itu dapat kita temui misal pada materi penyusun bintang neutron. Hal tersebut tentu sangat sulit kita bayangkan karena dalam kehidupan sehari-hari kita selalu berhubungan dengan materi yang tersusun atas atom-atom yang sebagian besar isinya hanyalah ruang hampa yang tak bermassa.

3.3. Radioaktivitas

Dilihat dari kemampuannya dalam memancarkan radiasi pengion, atom-atom penyusun alam semesta ini dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu atom yang tidak mampu memancarkan radiasi dan atom yang mampu memancarkan radiasi. Untuk selanjutnya, atom yang mampu memancarkan sinar-sinar radioaktif atau radiasi ini sering disebut sebagai atom radioaktif, sedang fenomena fisika yang ditunjukkannya dikenal sebagai gejala radioaktivitas.

Awal pengenalan manusia dengan gejala keradioaktifan suatu bahan dimulai ketika fisikawan Perancis Antoine Henry Becquerel pada 1896 mengamati unsur uranium (U) yang menunjukkan gejala aneh dan belum pernah diketahui sebelumnya. Lahir di Paris tanggal 15 Desember 1852, Becquerel berasal dari keluarga terpelajar dan

ilmuwan terpandang. Memperoleh gelar doktor pada 1888 dan menjadi guru besar fisika di perguruan tinggi politeknik di Paris pada 1895. Ayahnya, Alexander Edmond Becquerel, adalah seorang professor fisika terapan dengan kepakaran di bidang radiasi matahari dan *fosforesensi*. Mewarisi kepakaran ayahnya, Becquerel banyak melakukan pengamatan mengenai masalah *fosforesensi* dan *fluoresensi* bahan-bahan, salah satunya adalah garam uranium yang menunjukkan gejala *fosforesensi* ketika mendapat sorotan cahaya. *Fluoresensi* adalah sifat dari bahan yang berpendar ketika disinari, sedang *fosforesensi* adalah sifat dari bahan yang dapat berpendar terus meskipun tidak disinari, karena bahan itu sebelumnya telah menerima energi sinar matahari [26].

Melakukan diskusi secara intensif dengan Henry Poincare mengenai penemuan sinar-X yang diikuti dengan munculnya cahaya fluoresensi warna kehijauan pada tabung sinar katoda, Becquerel memutuskan untuk meneliti apakah ada hubungan antara *fluoresensi* yang terjadi secara alamiah dengan sinar-X yang baru saja ditemukan Roentgen. Sebagai salah satu ilmuwan yang membaca makalah ilmiah dan tertarik dengan temuan Roentgen, Becquerel berfikir apakah sinar-X juga bisa diproduksi dengan melibatkan aktivitas sinar matahari melalui peristiwa *fluoresensi* bahan [5].

Setelah mempelajari tabung sinar katoda secara seksama, Becquerel cenderung percaya bahwa peristiwa *fluoresenlah* penyebab pancaran sinar-X. Becquerel bahkan berteori bahwa semua bahan *fluoresens* apabila dipapari sinar matahari, selain memancarkan kembali cahaya yang diterimanya, akan memancarkan pula sinar-X. Di laboratorium, Becquerel kebetulan memiliki satu campuran bahan non-metal berupa krisal garam uranium-natrium-sulfat. Garam uranium itu sendiri diperoleh Becquerel sebagai warisan dari ayahnya. Dengan bahan yang dimiliki inilah Becquerel akhirnya memutuskan suatu penelitian untuk membuktikan apa yang sedang difikirkannya [27].

Langkah pertama yang dilakukan oleh Becquerel adalah membungkus rapat-rapat lembaran film fotografi dengan kertas hitam untuk memastikan agar tidak ada sinar matahari yang dapat masuk dan

menyinari permukaan lembaran film tersebut. Kemudian Becquerel meletakkan film terbungkus itu di bawah bahan fluoresens kristal garam uranium-natrium-sulfat. Garam itu dipilih karena dapat memperlihatkan sifat fluoresens yang sangat kuat apabila terpapari cahaya matahari. Secara teori, pembungkus kertas hitam akan menghalangi masuknya sinar fluoresens dari garam uranium sehingga tidak menyinari permukaan film fotografi. Sedang sinar-X dengan daya tembus tinggi mampu melewati penghalang kertas hitam dan menyinari permukaan film. Langkah selanjutnya Becquerel mencuci lembaran film fotografi beberapa jam kemudian. Dari hasil eksperimennya itu Becquerel mendapatkan bayangan hitam kristal dengan tingkat kerapatan optis tinggi tercetak pada lembaran film fotografi sesuai dengan asumsinya semula [5].

Dari hasil penelitian yang diperoleh, mulanya Becquerel yakin bahwa ia telah berhasil membuktikan asumsinya dan menemukan sumber sinar-X baru berupa bahan fluoresens. Namun ternyata ada saat-saat dimana Becquerel merasa bimbang terhadap hasil eksperimennya. Karena itu, suatu hari di bulan Pebruari 1896, Becquerel bermaksud mengulangi eksperimennya semula. Namun ketika itu ternyata cuaca kurang mendukung, matahari tidak bersinar terang, sehingga rencana diurungkan. Becquerel menyimpan kembali lembaran fotografi terbungkus kertas hitam yang belum digunakan di dalam laci lemari yang terlindung rapat dari paparan sinar matahari. Secara kebetulan pula Becquerel meletakkan kristal garam uranium-natrium-sulfat di atas film tersebut. Sampai hari ketiga ternyata cuaca belum juga berubah, sehingga pada hari keempat Becquerel memutuskan mencuci film fotografinya dengan harapan akan mendapatkan cetakan bayangan hitam kristal dengan tingkat kerapatan optis rendah, karena kristal garam uranium itu tidak pernah mendapatkan paparan sinar matahari selama disimpan di dalam lemari.

Di luar dugaan ternyata Becquerel mendapatkan bahwa garam uranium menunjukkan gejala radiasi tertentu dengan daya tembus yang sangat kuat sama seperti daya tembus sinar-X. Gejala aneh tersebut tentu ditemukannya dengan tidak sengaja. Bayangan hitam dari kristal yang

tercetak pada permukaan film fotografi itu ternyata tidak beda kerapatan optisnya dengan yang diperoleh dari eksperimennya yang pertama. Becquerel segera menyadari bahwa ada sejenis sinar aneh yang tidak kasat mata telah menyinari film tersebut. Sumbernya tentu bukan peristiwa fluoresens dari garam uranium yang terpapari sinar matahari. Karena itu, Becquerel menduga bahwa satu-satunya sumber sinar aneh pastilah garam uranium-natrium-sulfat itu sendiri [27].

Dengan penelitian lanjutan akhirnya Becquerel mengetahui bahwa sinar aneh yang dipancarkan garam uranium itu memiliki banyak kesamaan dengan sinar-X, salah satunya adalah daya tembusnya tinggi. Hal penting lainnya dari hasil penelitian Becquerel ini adalah bahwa sinar dari garam uranium tidak bergantung sama sekali pada bentuk senyawa kimia bahan. Dalam hal ini Becquerel menyadari bahwa gejala radiasi tersebut tidak berasal dari struktur kimia bahan, melainkan harus berasal dari uranium itu sendiri. Namun karena belum cukupnya pengetahuan tentang sinar ini, maka untuk sementara sinar aneh yang dipancarkan garam uranium tadi diberi nama sinar Becquerel. Penemuan ini merupakan salah satu pondasi untuk melangkah lebih lanjut ke perkembangan fisika modern melalui pemahaman struktur inti atom yang lebih detail. Sebelum 1895, tidak ada pandangan teoritis dari para ilmuwan yang menyatakan bahwa gejala pancaran radiasi secara spontan dari suatu bahan dapat terjadi dan ditemukan di alam. Namun ketika rahasia alam itu terungkap, penemuan-penemuan baru berikutnya di bidang ini menjadi terbuka lebar [28].

Pada 1896, Becquerel menerbitkan beberapa kertas kerja ilmiah tentang fenomena yang ditemukannya. Semula publikasi ilmiah itu ternyata kurang mendapatkan perhatian dari kalangan fisikawan saat itu. Baru kira-kira setahun kemudian, penemuan gejala radiasi dari uranium itu mulai dipelajari secara intensif oleh peneliti lain. Beberapa ilmuwan yang membaca kertas kerja tersebut menjadi tertarik dan melakukan penelitian serupa. Pada akhir 1897, Maria Sklodowska (1867-1934), seorang mahasiswa yang sedang menempuh program doktor dari Polandia, tertarik pada temuan Becquerel ketika sedang mencari topik penelitian untuk menyelesaikan disertasi doktornya di

Universitar Sorbonne, Paris. Maria harus mencari subjek penelitian yang merupakan terobosan dan bisa menjadi pijakan baru dalam dunia ilmu pengetahuan. Mahasiswi itu setelah menikah dengan Pierre Curie dalam perjalanan berikutnya dikenal dengan nama Marie Curie. Bersama dengan suaminya, Marie Curie memutuskan untuk menyelidiki sinar Becquerel dari garam U secara lebih detil. [29].

Langkah pertama yang dilakukan Marie dalam penelitiannya adalah menemukan cara untuk mengukur kekuatan sinar-sinar misterius Becquerel dari garam uranium. Marie mendapatkan sebuah instrumen ukur yang sangat baik untuk melakukan penelitiannya. Jika sebelumnya Becquerel memanfaatkan film fotografi dalam penelitiannya, Marie Curie lebih memilih menggunakan elektroskop untuk menyelidiki sinar-sinar Becquerel yang dipancarkan bahan. Alat yang ditemukan oleh Pierre Curie, yang tak lain adalah suami dari Marie Curie, dan saudaranya Jacques Curie, itu mampu mengukur arus listrik di udara betapapun kecilnya. Jika sebelumnya Becquerel telah berhasil mengungkap bahwa sinar yang dipancarkan garam uranium mampu mengionkan udara yang gejalanya diamati menggunakan elektroskop, cara serupa juga digunakan oleh Marie Curie untuk menyelidiki berbagai jenis bahan yang mampu memancarkan sinar Becquerel [29].

Selain itu, Marie juga tertarik menyelidiki kemungkinan adanya bahan-bahan alamiah lainnya yang dapat menunjukkan gejala sama seperti yang ditunjukkan oleh garam uranium. Dengan bantuan elektroskop, Marie dapat mengetahui kekuatan sinar-sinar Becquerel melalui pengukuran kuat arus listrik yang ditimbulkannya di medium udara. Beliau mengumpulkan semua jenis sampel logam dan mineral sebanyak-banyaknya serta mengujinya. Hasil penting dari kegiatan penelitiannya itu adalah ditemukannya unsur lain, yaitu thorium, yang ternyata juga mampu memancarkan sinar-sinar sama seperti yang dipancarkan uranium. Ketika diukur dengan elektroskop tampak bahwa keduanya memiliki kekuatan yang hampir sama. Marie telah berhasil menjawab pertanyaan dasar paling penting dari para peneliti, yaitu adanya bahan selain uranium yang mampu menunjukkan gejala sama seperti uranium.

Dengan penemuan thorium itu, Marie Curie berfikir tentang perlunya sebutan umum untuk bahan-bahan yang mampu memancarkan sinar-sinar Becquerel. Atas usulan Marie, gejala pemancaran radiasi secara spontan dari bahan semacam itu akhirnya dikenal sebagai gejala radioaktivitas, sedang bahan yang dapat menunjukkan gejala radioaktivitas disebut bahan radioaktif, dan radiasi yang dipancarkannya disebut sinar radioaktif [29]. Jadi bahan radioaktif adalah bahan yang dapat memancarkan sinar-sinar radioaktif secara spontan karena peristiwa yang terjadi dalam inti atom bahan itu. Istilah itu masih tetap dipakai hingga kini.

Baru ditemukan dua jenis bahan radioaktif di alam, yaitu uranium dan thorium. Tantangan berikutnya adalah menjawab pertanyaan, masih adakah bahan radioaktif alamiah selain dua bahan yang sudah ditemukan. Ketika Pasangan Marie Curie dan Pierre Curie (1859-1905) menguji sejenis mineral yang disebut *pitchblende*, bahan itu ternyata empat kali lebih radioaktif dibanding bahan kimia lain yang hanya mengandung uranium dengan jumlah yang sama. Fenomena itu ternyata sangat menarik perhatian bagi pasangan Marie dan Pierre Curie. Persoalan ilmiah muncul untuk menjelaskan fenomena itu. Namun saat itu belum ada satupun teori yang mampu menjelaskan fenomena itu secara fisika. Satu-satunya dugaan yang paling mungkin bisa menjawab masalah itu adalah adanya sesuatu yang lain dalam *pitchblende* yang jauh lebih radioaktif dibanding U dan Th. Dari sini akhirnya pada 1898, yaitu selang dua tahun dari penemuan uranium, pasangan suami-istri ahli kimia berkebangsaan Perancis itu berhasil menemukan dua unsur baru yang dapat menunjukkan gejala-gejala sama seperti uranium. Kedua unsur baru tersebut dinamai Polonium (Po) dalam rangka menghargai tanah air Marie Curie, yaitu Polandia, dan Radium (Ra) [29].

Dalam kurun waktu berikutnya, puluhan bahan lain yang menunjukkan gejala radioaktivitas semacam itu berhasil ditemukan. Unsur-unsur radioaktif baik yang ditemukan oleh Becquerel maupun Curie merupakan unsur radioaktif alam. Unsur-unsur tersebut diduga terbentuk bersamaan dengan proses terbentuknya alam ini. Atas jasanya dalam menemukan dan mengungkap sifat-sifat keradioaktifan suatu bahan, pada 1903

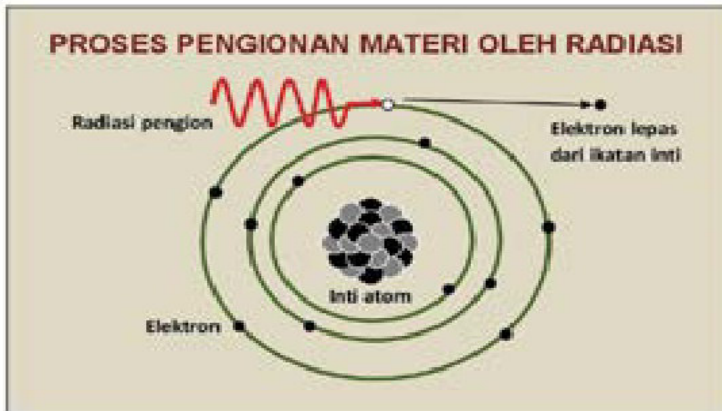
Becquerel dianugerahi hadiah Nobel Fisika bersama-sama Pierre Curie dan Marie Curie [30].

Ummat manusia telah menempuh perjalanan yang begitu panjang untuk memahami gejala radioaktivitas. Pemahaman terhadap gejala itu menjadi semakin baik dengan berkembangnya pengetahuan manusia mengenai struktur inti atom. Penelitian mengenai fenomena radioaktivitas suatu bahan yang telah dilakukan dalam kurun waktu cukup lama akhirnya berhasil mengungkap fenomena fisika yang dapat terjadi dalam level inti atom. Belakangan diketahui bahwa pancaran radiasi secara spontan dari bahan radioaktif itu berhubungan sangat erat dengan peristiwa-peristiwa yang terjadi di dalam inti atom.

Inti suatu atom tersusun atas proton (p) dan neutron (n). Keduanya merupakan partikel nuklir penyusun inti dengan massa yang hampir sama, yaitu 1 satuan massa atom (sma) atau 1 *atomic massa unit* yang lazim ditulis dengan 1u. Bedanya p bermuatan listrik positif, sedang n tidak bermuatan listrik atau netral. Gejala radioaktivitas merupakan manifestasi dari ketidakstabilan inti atom, dimana inti atom yang stabil tidak menunjukkan gejala radioaktivitas, sebaliknya inti atom yang tidak stabil dapat menunjukkan gejala radioaktivitas berupa kemampuan memancarkan radiasi secara spontan dari intinya. Ketidakstabilan inti atom itu sendiri timbul sebagai akibat dari terjadinya penyusunan kembali energi dan konfigurasi nukleon (komposisi jumlah p dan n) dalam inti, sedemikian rupa sehingga dicapai konfigurasi nukleon baru dan inti mencapai keadaan stabil [19].

Inti atom radioaktif memiliki kecenderungan untuk menjadi inti stabil dengan cara melakukan peluruhan sehingga berubah menjadi inti baru sambil melepaskan kelebihan energi intinya dalam bentuk pancaran radiasi inti. Jadi gejala radioaktivitas pada prinsipnya adalah proses peluruhan (*decay*) suatu inti atom yang tidak stabil menjadi inti atom baru yang stabil disertai pemancaran radiasi. Jenis radiasi yang dipancarkannya dipengaruhi oleh komposisi jumlah p dan n dalam inti. Setiap atom radioaktif juga memiliki waktu paro ($T_{1/2}$), yaitu waktu yang diperlukan oleh atom radioaktif untuk meluruh sehingga jumlahnya

menjadi setengah dari jumlah semula. Waktu paro merupakan salah satu jenis data nuklir yang hanya melekat pada atom-atom radioaktif [12].



Gambar 3.2. Radiasi pengion dapat melepaskan elektron dari ikatan inti atom [31]

Dari hasil pengamatan diketahui bahwa radiasi yang dipancarkan dari inti atom radioaktif dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu radiasi partikel bermuatan dan radiasi elektromagnetik. Karena radiasi yang dipancarkannya membawa energi yang cukup tinggi dan bersifat dapat mengionkan materi yang dilewatinya, maka radiasi dari inti radioaktif lazim disebut sebagai radiasi pengion [31]. Proses pengionan materi oleh radiasi berlangsung seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Selain terbentuk secara alamiah, bahan radioaktif dapat juga dibuat oleh manusia dalam suatu reaktor nuklir, akselerator maupun irradiator. Unsur alam dengan massa paling berat dan masih termasuk sebagai unsur stabil adalah ^{208}Bi (Bismut-208), sedang unsur-unsur dengan nomor massa lebih besar dari 208 bersifat radioaktif [6].

3.4. Peluruhan

Untuk memahami lebih lanjut tentang gejala radioaktivitas, berikut ini dibahas mengenai masalah peluruhan inti atom radioaktif. Karena sifatnya tidak stabil, maka inti atom terus-menerus meluruh disertai pemancaran radiasi hingga dicapai suatu keadaan inti baru yang stabil, artinya inti tersebut tidak bersifat radioaktif dan tidak mampu memancarkan radiasi lagi. Pemancaran radiasi secara terus-menerus sepanjang waktu akan mengakibatkan berkurangnya jumlah inti atom radioaktif. Peristiwa penyusutan jumlah inti atom ini disebut peluruhan atau pelapukan. Berkurangnya jumlah inti radioaktif akan disertai dengan berkurangnya jumlah radiasi yang dipancarkan. Laju peluruhan setiap inti radioaktif bergantung pada jenis zat radioaktifnya. Jumlah peluruhan yang terjadi setiap saat juga bergantung pada jumlah atom radioaktif mula-mula.

Meskipun kita hanya dapat menemukan 83 jenis atom di alam dan lebih dari 11 jenis merupakan atom buatan, namun ada sekitar 1440 jenis variasi inti atom (nuklida) yang saat ini dikenal, 340 diantaranya terdapat di alam dan sekitar 1100 diproduksi di laboratorium dan reaktor nuklir. Sebagian besar dari nuklida tersebut bersifat radioaktif yang lazim disebut radionuklida, namun beberapa diantaranya (284 jenis) merupakan nuklida stabil [6].

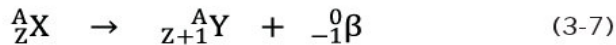
Hasil dari berbagai jenis proses inti yang terjadi pada suatu atom dapat dilihat secara langsung pada peta nuklida. Salah satu jenis proses inti adalah peluruhan inti atom radioaktif. Kestabilan suatu inti atom ditandai dengan perbandingan jumlah n (N) dan jumlah p (Z) yang ada dalam inti atom tersebut. Untuk atom-atom ringan dengan $Z < 20$, jika nilai perbandingan antara $N/Z = 1$, maka inti atom tersebut bersifat stabil, sedang jika nilai N/Z tidak sama dengan satu ($N/Z < 1$ atau $N/Z > 1$), maka ada kemungkinannya inti atomnya tidak stabil atau bersifat radioaktif [19].

Jenis radiasi yang dipancarkan oleh inti radioaktif juga dipengaruhi oleh nilai N/Z dalam intinya. Untuk inti-inti ringan, jika nilai $N/Z > 1$, berarti jumlah n lebih banyak dibandingkan jumlah p . Untuk mencapai

keadaan inti yang stabil, dalam inti atom akan terjadi perubahan n menjadi p disertai pemancaran elektron atau radiasi beta negatif. Dapat juga dikatakan bahwa atom dengan $N/Z > 1$ merupakan atom yang kelebihan elektron (e), sehingga dalam peluruhannya atom jenis ini akan memancarkan e . Neutron merupakan partikel yang tidak bermuatan listrik dan bermassa $1u$, sehingga diberi notasi. Proton merupakan partikel bermuatan listrik $+1e$ (e : muatan elementer) dan bermassa $1u$, sehingga diberi notasi. Elektron atau radiasi beta negatif merupakan partikel bermuatan listrik $-1e$ yang tidak bermassa, sehingga diberi notasi ${}_{-1}^0e$ atau ${}_{-1}^0\beta$. Proses perubahan n menjadi p dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut [19]:



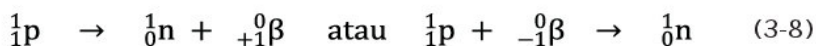
Jika suatu inti memancarkan radiasi ${}_{-1}^0\beta$ maka akan dihasilkan inti baru dengan nomor atom (Z) bertambah satu dan nomor massa (A) tetap. Karena pemancaran radiasi ${}_{-1}^0\beta$ ini tidak lain dari terjadinya perubahan n menjadi p , maka dapat pula dikatakan bahwa inti yang melakukan peluruhan ${}_{-1}^0\beta$ akan mengalami penambahan satu buah p dan pengurangan satu buah n dalam intinya. Mengingat massa n dan p masing-masing adalah $1u$, maka inti yang melakukan peluruhan (induk) dan inti hasil peluruhan (anak) tidak mengalami perubahan massa inti, dalam hal ini keduanya membentuk isobar, yaitu atom-atom dengan A sama. Persamaan untuk menggambarkan inti atom yang melakukan peluruhan ${}_{-1}^0\beta$ adalah sebagai berikut [19]:



Dari persamaan di atas terlihat bahwa inti yang melakukan peluruhan (X) dan inti hasil peluruhan (Y) memiliki massa sama, masing-masing A . Meskipun terjadi pemancaran elektron, namun muatan total setelah proses peluruhan tidak berubah. Total muatan dari inti induk X yang berada di sebelah kiri tanda panah adalah Ze , sedang muatan total seluruh hasil peluruhan yang berada di sebelah kanan tanda panah adalah $(Z+1)e - e = Ze$.

Jika nilai $N/Z < 1$, berarti jumlah n dalam inti atom lebih kecil dibandingkan jumlah p . Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, dalam inti atom akan terjadi perubahan p menjadi n disertai pemancaran positron atau radiasi beta positif (β^+). Pemancaran positron ini hanya dapat berlangsung apabila massa inti induk (inti yang meluruh) lebih besar dibandingkan dengan massa inti turunannya (inti hasil peluruhan), sekurang-kurangnya dengan selisih dua kali massa elektron (e). Jika persyaratan itu tidak terpenuhi, maka yang akan terjadi dalam inti adalah proses penangkapan e . Dalam proses ini, salah satu e orbital ditangkap oleh inti atomnya sendiri. Elektron yang tertangkap adalah e yang berada pada lintasan kulit K, karena e dalam lintasan ini berada sangat dekat dengan inti dan mempunyai peluang paling besar untuk ditangkap inti atom dibandingkan dengan e yang berada di lintasan lainnya. Seringkali proses penangkapan e oleh inti atom ini disebut juga sebagai penangkapan K. Elektron yang ditangkap akan menyatu dengan p dalam inti sehingga membentuk n [12].

Pengertian lain untuk atom dengan nilai $N/Z < 1$ adalah bahwa atom jenis ini mempunyai kelebihan p (bermuatan $+1$), sehingga untuk mencapai kondisi inti yang stabil perlu menyerap e yang bermuatan -1 . Jadi dalam hal ini penyerapan e oleh inti suatu atom akan memberikan hasil yang sama apabila atom tersebut memancarkan positron. Positron atau radiasi beta positif merupakan partikel bermuatan listrik $+1e$ yang tidak bermassa, sehingga diberi notasi 0_1e atau ${}^0_1\beta$. Proses perubahan p menjadi n dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut [25] :

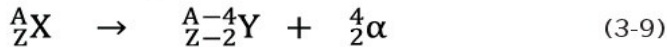


Keberadaan positron pertama kali diramalkan oleh PAM. Dirac pada tahun 1927 dan diamati untuk pertamakalinya dalam sinar kosmis dari angkasa luar oleh C. Anderson pada tahun 1932. Inti yang memancarkan positron akan menghasilkan inti baru dengan Z berkurang satu dan A tetap sehingga antara induk dengan anak membentuk isobar. Persamaan untuk menggambarkan inti atom yang melakukan perluruhan adalah sebagai berikut [6] :



Dari persamaan di atas terlihat bahwa inti yang melakukan peluruhan (X) dan inti hasil peluruhan (Y) memiliki massa sama, masing-masing A. Meskipun terjadi pemancaran positron, namun muatan total setelah proses peluruhan tidak berubah. Total muatan dari inti induk X yang berada di sebelah kiri tanda panah adalah Ze, sedang muatan total seluruh hasil peluruhan yang berada di sebelah kanan tanda panah adalah $(Z-1)e + e = Ze$. Unsur-unsur radioaktif buatan umumnya berperan sebagai pemancar positron.

Inti-inti berat dengan nomor atom tinggi, dimana nilai N/Z lebih besar dari 1,6, maka dalam peluruhannya akan selalu disertai pemancaran radiasi alfa (α). Radiasi α atau inti atom helium (He) merupakan partikel bermuatan listrik $+2e$ dan bermassa 4u, sehingga partikel ini diberi notasi ${}^4_2\text{He}$ atau ${}^4_2\alpha$. Inti radioaktif yang memancarkan partikel α nomor atom atau jumlah protonnya (Z) berkurang dua dan nomor massanya (A) berkurang empat. Proses pemancaran partikel α dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut [19]:



Inti-inti berat bernomor atom tinggi dengan nilai $N/Z > 1,6$ seperti inti-inti yang muncul pada akhir Tabel Periodik, dalam peluruhannya akan selalu disertai pemancaran radiasi α . Sebagian besar inti radioaktif dengan $A > 150$ merupakan pemancar α , namun mayoritas inti radioaktif pemancar α mempunyai $A > 200$. Ada pula inti yang lebih ringan sebagai pemancar α dengan waktu paro yang sangat panjang, namun model peluruhannya sulit untuk diamati. Partikel α ini tidak berada dalam suatu inti atom, namun dapat terbentuk sebagai kesatuan nukleon dalam inti yang tersusun atas 2n dan 2p. Jika kesatuan nukleon itu berada sangat dekat dengan permukaan inti atom, ada kemungkinan satuan nukleon itu lepas dari inti dalam bentuk partikel α yang bermuatan $+2$ yang berasal dari 2p dan bermassa 4 sma karena mengandung 2n dan 2p. Partikel α ini memiliki kestabilan inti yang sangat tinggi sehingga dalam beberapa kasus dapat berperan sebagai partikel tunggal [27].

Jika berkas radiasi yang dipancarkan oleh inti bahan radioaktif alam dilewatkan dalam daerah bermedan listrik atau bermedan magnet, maka dari berkas tersebut akan diperoleh tiga jenis sinar radioaktif seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dengan menganalisa ketiga jenis sinar itu, maka didapatkan sinar-sinar radioaktif dengan karakteristik sebagai berikut [27]:

3.4.1. Sinar Alfa (α)

Sinar ini dibelokkan oleh medan magnet ke arah kutub negatif. Dari hasil percobaan yang dilakukan di dalam medan listrik dan medan magnet diketahui bahwa kecepatan gerak partikel alfa di udara berkisar antara $0,054C$ hingga $0,07C$, dengan C adalah cepat rambat cahaya di dalam medium udara, yang nilainya 300.000 km/detik. Karena massanya yang cukup besar (4 sma), maka jangkauan partikel alfa di udara sangat pendek [31].

Partikel alfa dengan energi tertinggi kemampuan jelajahnya di udara hanya beberapa centimeter saja. Sedang di dalam jaringan seperti tubuh manusia, jangkauannya lebih pendek lagi, yaitu hanya beberapa micron. Pengujian terhadap partikel alfa yang dilakukan oleh Ernest Rutherford dan kawan-kawan menggunakan kamar kabut Wilson menunjukkan bahwa sebagian besar partikel alfa memiliki jangkauan yang sama di dalam medium gas, dan partikel itu bergerak membentuk jejak lurus. Karena mempunyai massa yang relatif besar dibandingkan jenis radiasi lainnya dan bergerak dengan kecepatan relatif tinggi, partikel alfa memiliki energi kinetik yang cukup besar. Partikel alfa yang dipancarkan oleh radionuklida alamiah biasanya memiliki energi antara 4 hingga 9 Mega elektron Volt (MeV) [19].

Daya tembus partikel alfa terhadap materi yang dilaluinya sangat lemah. Kemampuan partikel alfa dalam menembus bahan sangat terbatas. Partikel ini bahkan tidak mampu menembus selembat kertas tipis. Pada tubuh manusia, lapisan kulit mati yang sangat tipis sudah cukup untuk menyerap seluruh partikel alfa yang

dipancarkan dari inti atom radioaktif, berapapun besar energi partikel tersebut [31]. Energi partikel ini akan habis terserap oleh bagian luar kulit tubuh manusia. Dalam udara atau jaringan lunak tubuh manusia, partikel alfa akan kehilangan energi rata-rata sebesar 35 eV untuk setiap pasangan ion yang dihasilkannya. Pengionan spesifik, yaitu banyaknya pasangan ion yang terbentuk persatuan panjang lintasan, dari partikel alfa ini sangat tinggi, berorde puluhan ribu pasangan ion per centimeter lintasan dalam udara. Partikel alfa dengan energi kinetik 3 MeV mempunyai jangkauan dalam udara standar kira-kira 2,8 cm dan membentuk 4.000 pasang ion per milimeter sepanjang jejaknya [31].

3.4.2. Sinar beta (β)

Sinar ini juga dibelokkan oleh medan magnet namun arah pembelokannya berlawanan dengan arah pembelokan sinar alfa, yaitu ke arah kutub positif. Dari hasil penelitian berikutnya diketahui bahwa partikel beta ini tidak lain dari elektron. Kecepatan gerak partikel beta di udara berkisar antara 0,32C hingga 0,7C. Jejak partikel beta di dalam bahan berbelok-belok karena elektron ini mengalami hamburan di dalam atom bahan. Partikel beta akan kehilangan energinya sebesar 34 eV untuk setiap pembentukan satu pasang ion di udara [19].

Kemampuan pengionan sinar beta lebih rendah dibandingkan dengan sinar alfa. Partikel beta dengan energi kinetik 3 MeV mempunyai jangkauan di udara lebih dari 1.000 cm, namun hanya mampu menghasilkan beberapa pasang ion per milimeter sepanjang lintasannya. Pengionan spesifik partikel beta di udara bervariasi dari 60 sampai 7.000 pasang ion per centimeter [31]. Daya tembus partikel beta terhadap materi lebih tinggi dibanding partikel alfa. Energi sinar beta biasanya langsung habis diserap oleh perisai radiasi dari aluminium (Al) dengan ketebalan beberapa milimeter. Di dalam jaringan tubuh manusia, sinar ini mampu menerobos kulit hingga kedalaman beberapa milimeter.

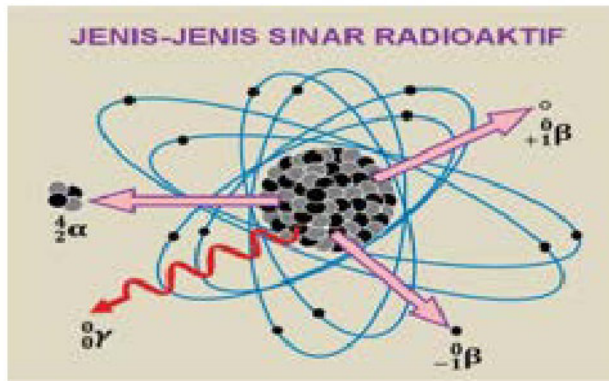
Semula para ilmuwan hanya mengenali adanya sinar beta negatif dari pancaran zat radioaktif alamiah. Namun belakangan para ilmuwan juga menemukan adanya pancaran sinar beta positif, terutama dari unsur-unsur radioaktif buatan. Sinar jenis ini akhirnya diberi nama positron atau elektron yang bermuatan positif. Positron merupakan jenis sinar radioaktif yang dibelokkan oleh medan magnet namun arah pembelokannya menuju kutub negatif, searah dengan pembelokan Sinar- α , dan berlawanan arah dengan pembelokan Sinar- β negatif. Antara elektron dan positron memiliki sifat fisika yang relatif sama, hanya muatan listriknya saja yang berbeda. Positron disebut juga sebagai anti-elektron. Jika kedua partikel itu bertemu maka akan saling melebur dan berubah menjadi gelombang elektromagnetik, yang prosesnya disebut anihilasi.

3.4.3. Sinar gamma (γ)

Sinar ini tidak dibelokkan baik oleh medan listrik maupun medan magnet. Dari penyelidikan diketahui bahwa sinar gamma ini merupakan radiasi elektromagnetik yang tidak bermassa dan tidak bermuatan sehingga diberi lambang γ . Sinar gamma mempunyai sifat yang sama dengan sinar-X, namun panjang gelombangnya lebih pendek dibandingkan sinar-X. Karena sifatnya sebagai gelombang elektromagnetik, sinar gamma bergerak dengan kecepatan sama dengan kecepatan cahaya. Sebagai radiasi elektromagnetik, sinar gamma membawa energi dalam bentuk paket-paket energi yang disebut foton [9]. Oleh sebab itu, radiasi gamma sering juga disebut sebagai radiasi foton.

Daya pengionan sinar ini terhadap materi sangat rendah bila dibandingkan dengan partikel alfa dan partikel beta. Pengionan yang dihasilkan oleh sinar gamma sebagian besar melalui proses pengionan sekunder. Dalam hal ini sinar gamma berinteraksi terlebih dahulu dengan materi dan hanya beberapa pasangan ion primer saja yang terbentuk [13]. Ion-ion primer ini selanjutnya melakukan proses pengionan sekunder sehingga diperoleh

pasangan ion yang lebih banyak dibandingkan dengan yang terbentuk pada proses pengionan primer. Daya pengionan spesifik radiasi gamma menempati posisi paling lemah bila dibandingkan dengan partikel alfa maupun beta, namun daya tembusnya paling kuat dibandingkan dengan jenis radiasi lainnya. Sinar gamma dapat menembus ke kedalaman tubuh manusia, dan hanya dapat ditahan dengan perisai radiasi dari bahan bernomor atom tinggi seperti timbal atau beton dengan ketebalan beberapa centimeter [31].



Gambar 3.3. Pancaran radiasi oleh inti atom radioaktif [31]

3.5. Transmutasi Inti

Meski hanya ada 92 jenis unsur kimia yang dapat ditemukan di alam, namun kini para ilmuwan telah berhasil menghadirkan atom-atom buatan sehingga jumlah atom mencapai lebih dari 100 jenis. Proses-proses nuklir telah dimanfaatkan dalam kerja tersebut, salah satunya adalah transmutasi inti melalui reaksi nuklir. Reaksi nuklir dilangsungkan melalui proses penembakan inti atom target dengan partikel-partikel tertentu yang lebih sering disebut sebagai peluru (*projectile*), seperti neutron (n), proton (p), partikel alfa (α) dan sebagainya [19].

Reaksi nuklir atau reaksi inti pada dasarnya adalah suatu proses yang menyebabkan terjadinya perubahan struktur inti suatu atom. Perubahan itu dapat terjadi secara spontan melalui proses peluruhan seperti yang terjadi pada inti-inti atom radioaktif, atau sebagai hasil dari penembakan inti menggunakan partikel maupun radiasi elektromagnetik. Ada banyak jenis reaksi nuklir yang melibatkan kira-kira 2000 macam isotop yang saat ini sudah ditemukan dan dikenali dengan baik oleh para ilmuwan [6].

Di laboratorium fisika energi tinggi, perubahan atau transmutasi (*transmutation*) inti biasanya dihasilkan melalui penembakan target inti atom (sebut inti A) dengan proyektil berupa partikel nuklir tertentu (sebut partikel a) yang sebelumnya dipercepat di dalam akselerator sehingga memiliki energi yang cukup untuk mengatasi gaya tolak elektrostatis dari inti A. Dari hasil penembakan itu akan dihasilkan inti baru yang berbeda dengan inti asal (sebut inti B) disertai dengan pelepasan partikel baru yang berbeda dengan partikel asal (sebut partikel b). Dalam fisika nuklir, peristiwa transmutasi inti itu biasa ditulis dengan persamaan reaksi inti $A(a,b)B$. Jenis reaksi inti yang terjadi dikenal sebagai reaksi (a,b), dengan a dan b biasanya berupa partikel-partikel ringan seperti neutron, proton, alfa dan sebagainya, atau inti-inti ringan seperti deuterium dan tritium.

Fenomena tentang adanya reaksi nuklir pertama kali ditemukan oleh Ernest Rutherford pada 1919 [5]. Pada saat itu Rutherford mengamati bahwa inti atom nitrogen-14 (^{14}N) dapat memancarkan proton apabila ditembaki dengan partikel alfa yang dipancarkan dari radionuklida alamiah radium-C. Melalui percobaan itu Rutherford menyimpulkan bahwa partikel alfa yang masuk ke dalam inti ^{14}N dapat membentuk sebuah inti gabungan yang sifatnya tidak stabil sehingga segera mengeluarkan proton untuk menjadi inti baru oksigen-17 (^{17}O). Persamaan reaksi nuklir untuk proses transmutasi inti yang pertama kali diamati oleh Rutherford tersebut biasa ditulis dalam bentuk $^{14}\text{N}(\alpha,p)^{17}\text{O}$.

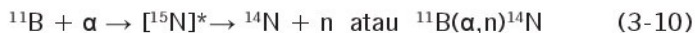
Seringkali dalam proses reaksi nuklir juga dilepaskan partikel yang sama dengan partikel yang ditembakkan, dalam hal ini inti atom target tidak

mengalami transmudasi inti, malainkan hanya berada dalam keadaan tereksitasi. Untuk kasus ini, proses yang terjadi disebut hamburan. Hamburan yang terjadi bisa bersifat elastis juga, dan inti target tidak mengalami perubahan level energi (inti berada pada keadaan yang sama dengan kondisi semula, dengan kata lain inti tidak tereksitasi). Dalam peristiwa hamburan elastis ini tidak terjadi perubahan energi kinetik pada partikel datang. Hamburan yang terjadi bisa pula bersifat inelastis jika inti target mengalami perubahan level energi (inti tereksitasi). Dalam peristiwa hamburan inelastik ini, energi partikel terhambur berbeda dengan energi kinetik yang dimiliki partikel datang [7].

Dalam beberapa kasus reaksi nuklir, proyektil yang ditembakkan ditangkap oleh inti target tanpa terjadi pelepasan partikel baru. Dalam reaksi tangkapan ini akan diikuti oleh pelepasan kelebihan energi inti dalam bentuk pancaran sinar γ , dengan energinya bergantung pada beberapa faktor, seperti level energi inti hasil reaksi, energi ikat inti baru dan energi kinetik partikel yang ditangkap [7]. Sebagai contohnya adalah reaksi penyerapan n oleh inti ^{27}Al dengan persamaan reaksi intinya $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ atau penyerapan n oleh inti ^1H dengan persamaan reaksi intinya $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$. Reaksi kebalikannya juga dapat terjadi, dinamakan inti atom target menyerap energi sinar γ yang cukup untuk mengeluarkan partikel dari dalam inti atom. Reaksi jenis ini disebut sebagai reaksi fotonuklir [7]. Sebagai contohnya adalah penyerapan energi sinar γ oleh inti ^{25}Mg yang disertai pelepasan p dari dalam inti dengan persamaan reaksi intinya $^{25}\text{Mg}(\gamma,p)^{24}\text{Na}$ atau penyerapan energi sinar γ oleh inti ^2H yang disertai pelepasan n dari inti dengan persamaan reaksi intinya $^2\text{H}(\gamma,n)^1\text{H}$.

Pada umumnya, jika energi dari proyektil yang ditembakkan tidak terlalu tinggi, reaksi nuklir yang terjadi berlangsung melalui dua tahap [19]. Tahap pertama, proyektil ditangkap oleh inti target sehingga membentuk inti atom gabungan (*compound nucleus*) yang berada dalam keadaan tereksitasi. Tahap kedua, inti gabungan mengalami proses deeksitasi melalui pancaran partikel atau cara lain. Sebagai contoh untuk reaksi jenis ini adalah penembakan inti ^{11}B dengan partikel α yang menghasilkan inti atom baru ^{14}N disertai pelepasan n , melalui pembentukan inti gabungan

$[^{15}\text{N}]^*$ dengan tanda (*) menunjukkan bahwa inti gabungan itu berada dalam keadaan tereksitasi. Proses penembakan tersebut dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut :

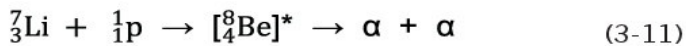


Suatu inti baru dapat terbentuk melalui beberapa proses reaksi inti yang berbeda. Radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida alamiah dapat dimanfaatkan sebagai proyektil, dan partikel α merupakan jenis proyektil yang cukup efektif untuk penembakan inti karena energi dan momentumnya yang relatif tinggi. Dalam transmudasi dengan partikel α ini biasanya hanya digunakan atom-atom ringan untuk mengurangi terjadinya hamburan proyektil sehingga kemungkinan terjadinya transmudasi inti akan lebih besar [7]. Penggunaan target atom ringan dapat mengurangi gaya tolak Coulomb antara inti atom target dan partikel α . Beberapa contoh reaksi nuklir yang dapat dihasilkan dari penembakan partikel α adalah $^{10}\text{Be}(\alpha, p)^{13}\text{C}$, $^{23}\text{Na}(\alpha, p)^{26}\text{Mg}$ dan $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$.

Perkembangan dalam bidang transmudasi inti sangat terbatas karena partikel alfa yang diperoleh dari unsur radioaktif alam hanya menghasilkan berkas dengan intensitas rendah dan transmudasi ini hanya dapat dilakukan terhadap unsur-unsur bermomor atom rendah [25]. Namun dalam perkembangan berikutnya manusia menyadari bahwa partikel-partikel inti lainnya seperti proton, deuteron (d) dan bahkan sinar gamma (γ) ternyata dapat dimanfaatkan sebagai peluru untuk melangsungkan transmudasi inti. Keberhasilan umat manusia dalam melakukan proses transmudasi ini telah menghadirkan banyak unsur baru yang sebelumnya tidak ditemukan di alam [10].

Pemanfaatan proton sebagai proyektil merupakan kasus pertama dalam transmudasi inti yang seluruh prosesnya dilakukan secara buatan. JD Cockcroft dan ETS Walton di Laboratorium Cavendish, menembaki target berupa atom lithium (Li) dengan proyektil proton yang dipercepat hingga berenergi 0,1-0,7 MeV. Pendaratan oleh partikel yang keluar dari target Li diamati menggunakan layar seng sulfide yang ditempatkan tidak jauh di belakang target. Dari hasil pengamatan jejak partikel dalam detektor

kamar kabut diketahui bahwa partikel yang keluar dari reaksi itu ternyata partikel α , yang tak lain adalah inti . Karena itu, reaksi intinya dikenal sebagai reaksi (p,α) . Dari pengamatan di dalam kamar kabut terlihat ada dua partikel alfa meninggalkan titik pusat terjadinya transmudasi dan bergerak dengan energi yang sama dengan arah saling berlawanan. Reaksi inti yang terjadi dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagaiberikut [19] :



Penemuan reaksi tersebut memiliki arti historis yang cukup menarik karena reaksi itu melengkapi bukti-bukti kuantitatif paling awal tentang kebenaran hukum yang menunjukkan hubungan kesetaraan antara massa dan energi sebagaimana pernah dikemukakan oleh Albert Einstein. Reaksi itu juga merupakan jenis reaksi yang cukup bagus untuk pembuktian hukum tersebut karena energi radiasi yang dilepaskan sebagai produk reaksi dapat diukur secara teliti, sedang massa produk reaksi itu sudah diketahui sebelumnya [5]. Sejak 1932, beberapa jenis transmudasi inti telah dipelajari secara detil dan hasilnya sangat bersesuaian dengan hubungan kesetaraan massa-energi yang diturunkan dari persamaan relativitas Einstein.

Beberapa contoh transmudasi inti melalui proses reaksi inti jenis (p,α) lainnya adalah ${}^6\text{Li}(p,\alpha){}^3\text{He}$, ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$, ${}^{19}\text{F}(p,\alpha){}^{16}\text{O}$ dan ${}^{27}\text{Al}(p,\alpha){}^{24}\text{Mg}$. Reaksi (p,α) yang cukup menarik terjadi jika digunakan target ${}^{11}\text{B}$ dengan persamaan reaksi intinya ${}^{11}\text{B}(p,\alpha){}^8\text{Be}$, dimana inti ${}^8\text{Be}$ bersifat sangat tidak stabil sehingga langsung pecah menjadi dua inti ${}^4\text{He}$ yang tak lain adalah partikel α [19]. Jadi hasil akhir dari reaksi (p,α) terhadap target atom ${}^{11}\text{B}$ adalah tiga buah partikel α seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Target atom yang menjalani transmudasi melalui reaksi inti jenis (p,α) akan menghasilkan inti atom baru yang nomor atomnya berkurang satu satuan dan massanya berkurang tiga satuan.



Gambar 3.4. transmutasi inti atom boron-11 oleh proton [19]

Penyerapan partikel α oleh inti atom target tidak selalu membentuk inti atom gabungan yang mengeluarkan p, namun bisa juga partikel yang dikeluarkannya berupa n. Bukti-adanya pancaran n dan pengembangan metode dalam menganalisis reaksi nuklir dimana salah satu produknya adalah n telah mengantarkan manusia ke penemuan reaksi jenis (α, n) lainnya. Contoh dari transmutasi inti yang dihasilkan melalui proses reaksi jenis (α, n) ini adalah ${}^{14}\text{N}(\alpha, n){}^{17}\text{F}$, ${}^{23}\text{Na}(\alpha, n){}^{26}\text{Al}$ dan ${}^{27}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}\text{P}$. Dari beberapa contoh transmutasi inti baik melalui reaksi nuklir jenis (α, p) maupun (α, n) , terlihat bahwa beberapa inti seperti ${}^7\text{N}$, ${}^{23}\text{Na}$ dan ${}^{27}\text{Al}$ dapat memancarkan p atau n apabila ditembaki dengan partikel α [19].

Neutron merupakan partikel nuklir yang sangat efektif untuk menghasilkan berbagai jenis reaksi nuklir. Karena tidak bermuatan listrik, proyektil n tidak akan mengalami gaya tolak Coulomb pada saat mendekati inti target, sehingga kemampuannya dalam menerobos inti lebih besar dibandingkan dengan p, d maupun α . Bukan hanya n berenergi tinggi saja yang dapat memicu terjadinya reaksi nuklir, tetapi n yang berenergi sangat rendah sekalipun (berenergi termik sekitar 0,025 eV) dapat dengan efektif dipakai untuk melangsungkan transmutasi inti. Karena sifat netral pada proyektil n, maka reaksi nuklir yang dihasilkannya lebih banyak dan bervariasi dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh proyektil lainnya [6].

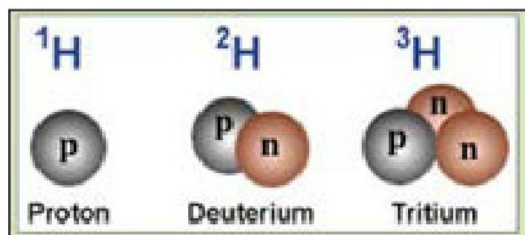
Neutron cepat dari suatu sumber dapat diperlambat gerakannya melalui tumbukan n tersebut dengan bahan yang banyak mengandung atom hidrogen (H) seperti air dan paraffin. Melalui proses tumbukan itu, n akan menyerahkan sebagian besar energinya kepada inti atom H, dan setelah beberapa kali proses tumbukan, energi rata-ratanya berkurang hingga mencapai beberapa eV. Neutron lambat ini ternyata sangat bermanfaat dan reaksi nuklir yang ditimbulkannya cukup menarik perhatian. Reaksi (n,α) pada inti ${}^6\text{Li}$ dengan persamaan reaksi nuklirnya ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ dan pada inti ${}^{10}\text{B}$ dengan persamaan reaksi nuklirnya ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ mempunyai penampang lintang yang cukup tinggi sehingga sering dimanfaatkan untuk pemantauan n. Reaksi (n,α) menghasilkan inti baru dengan nomor atomnya berkurang dua satuan dan massa intinya berkurang tiga satuan. Pada inti atom target ${}^{27}\text{Al}$, reaksi (n,α) menghasilkan inti baru ${}^{24}\text{Na}$.

Perkembangan dalam fisika nuklir telah mengantarkan para ilmuwan mampu menghadirkan unsur-unsur baru melalui proses transmudasi inti atom. Keberhasilan ini sekaligus meneguhkan tingginya keakuratan dalam penyusunan unsur-unsur pada tabel periodik. Beberapa unsur yang telah hilang dari alam karena proses peluruhan dapat dihadirkan kembali sehingga tabel periodik menjadi lebih lengkap. Berlandaskan tabel periodik itu juga, para ilmuwan optimis bahwa suatu ketika mereka dapat menghadirkan unsur-unsur baru dengan sifat-sifatnya sesuai dengan yang diinginkan dan diharapkan akan menjadi fondasi penting bagi perkembangan ilmu pengetahuan dimasa yang akan datang [22].

3.6. Peta Nuklida

Dengan menggunakan spektrograf massa telah ditemukan beberapa unsur kimia yang mempunyai dua atau lebih komponen, masing-masing mempunyai massa yang berbeda. Hal ini disebabkan jumlah neutron di dalam inti atom tidak sama [12]. Atom oksigen misalnya, dapat membentuk tiga jenis inti, yaitu inti dengan delapan, sembilan dan sepuluh buah neutron. Nomer massa dari ketiga jenis inti oksigen tersebut masing-masing 16, 17 dan 18. Tiga jenis inti dari unsur yang sama itu disebut isotop oksigen.

Isotop adalah unsur-unsur dengan nomor atom sama (jumlah proton dalam inti sama) tetapi nomor massanya berbeda. Perbedaan nomor massa ini tidak lain karena perbedaan jumlah neutron dalam inti atom. Misal atom uranium dapat membentuk tiga macam isotop, yaitu ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$ dan ${}^{238}_{92}\text{U}$. Dalam masing-masing inti isotop tersebut terdapat 141, 143 dan 146 buah neutron, sedang jumlah proton dalam inti ketiga isotop tersebut adalah 92. Pada Gambar 3.5 ditampilkan contoh isotop-isotop yang dapat dibentuk oleh inti atom hidrogen (${}^1\text{H}$), yaitu deuterium (${}^2\text{H}$) dan tritium (${}^3\text{H}$). Dalam inti ${}^1\text{H}$ hanya terdapat satu buah proton saja, tanpa adanya neutron. Dalam inti ${}^2\text{H}$ terdapat satu buah proton dan satu buah neutron, sedang dalam inti ${}^3\text{H}$ terdapat satu buah proton dan dua buah neutron.



Gambar 3.5: Struktur inti isotop-isotop ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ dan ${}^3\text{H}$ [15]

Dengan spektrograf massa [19], Walker Aston mampu membuktikan keragu-raguannya tentang atom neon (Ne) yang mempunyai dua isotop dengan massa masing-masing mendekati 20 dan 22. Aston juga mendapatkan bahwa spektrum massa dari atom clour (Cl) tidak ada yang sesuai dengan berat atom clour, yaitu 35,46. Namun dalam analisisnya Aston mendapatkan dua spektrum massa yang terlihat masing-masing sangat dekat dengan massa atom 35 dan 37, di mana yang pertama memberikan garis lebih tebal. Hasil itu menunjukkan bahwa Cl mempunyai dua isotop masing-masing dengan massa atom yang bulat, sedang atom Cl pada umumnya yang ditemukan di alam merupakan campuran antara dua isotop dengan perbandingan sedemikian rupa sehingga membentuk berat atom Cl pecahan sebesar 35,46.

Sebagian besar unsur-unsur kimia yang ada di alam ini dapat membentuk beberapa isotop. Namun isotop ini tidak dapat dibedakan secara kimia karena mereka mempunyai struktur elektron yang sama sehingga mengalami reaksi kimia yang sama pula [19]. Perlu diketahui bahwa tidak semua isotop mempunyai kelimpahan yang sama di alam. Dalam kasus isotop oksigen, 99,975 % atom yang terbentuk secara alamiah adalah ^{16}O , sementara ^{17}O dan ^{18}O hanya terbentuk di alam dengan kelimpahan 0,037% dan 0,204%. Demikian juga hidrogen, sebagian besar di alam ditemukan dalam bentuk ^1H , namun dalam fraksi yang sangat kecil (kira-kira 0,015 %) berada dalam bentuk ^2H (hidrogen berat atau deuterium). Untuk unsur yang lain, distribusi isotopnya mungkin sangat berbeda. Atom Cl misalnya, membentuk dua jenis isotop secara alamiah, yaitu ^{35}Cl dan ^{37}Cl dengan kelimpahan masing-masing 75,4 % dan 24,6 %.

Kelimpahan isotop carbon yang ditemukan dalam batu kapur dalam bentuk rasio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ adalah 89,2, sedang rasionya di dalam batu bara sebesar 91,8. Secara umum kandungan relatif ^{12}C menunjukkan angka yang lebih tinggi di dalam material tanaman dibandingkan dalam batu kapur. Namun secara keseluruhan dari semua carbon yang ada di alam, 98,89 % adalah dalam bentuk ^{12}C . Variasi yang cukup lebar dalam kelimpahan isotop timbal (Pb) juga ditemukan, dan besarnya variasi ini biasanya dihubungkan dengan sumber dari mana sampel tersebut diperoleh. Dalam timbal secara umum, tidak mungkin mendapatkan kelimpahan isotop secara pasti tanpa menentukan sumber bahan tersebut.

Dilihat dari kestabilan inti atomnya, kita dapat menemukan dua jenis inti atom yang membentuk isotop, yaitu isotop yang tidak mampu memancarkan radiasi (tidak radioaktif) dan isotop yang mampu memancarkan radiasi (bersifat radioaktif). Isotop yang mampu memancarkan radiasi ini disebut radioisotop [14]. Sering juga digunakan istilah radionuklida untuk menyatakan nuklida yang bersifat radioaktif [12]. Radioisotop ini dapat terjadi secara alamiah atau sengaja dibuat oleh manusia dalam suatu reaktor nuklir, akselerator maupun irradiator. Nuklida alam dengan massa paling berat dan masih termasuk sebagai

nuklida stabil adalah $^{208}_{83}\text{Bi}$ (Bismut), sedang isotop-isotop dengan nomor massa lebih besar dari unsur ini merupakan isotop radioaktif [6]. Ledakan senjata nuklir yang terjadi di Hirushima dan Nagasaki pada tahun 1945 menghasilkan antara 30-40 radionuklida baru yang semula belum dikenal. Unsur-unsur baru tersebut masih melakukan peluruhan sehingga menghasilkan unsur-unsur lain yang juga bersifat radioaktif, sehingga jumlah unsur yang keluar dari ledakan senjata nuklir dalam bentuk debu-debu radioaktif dapat mencapai sekitar 200 jenis radionuklida [19].

Suatu isotop merupakan satu kelompok dari dua atau lebih nuklida yang mempunyai nomor atom sama. Istilah isotop juga menunjukkan adanya lebih dari satu jenis atom yang menempati posisi yang sama dalam sistem periodik. Sebagian besar nuklida yang ada di alam ini terdapat dalam dua atau lebih isotop dan hanya 20 nuklida alamiah (kira-kira seperempat dari seluruh nuklida) yang memiliki satu bentuk nuklida saja, seperti aluminium (Al), cobalt (Co) dan emas (Eu). Pada nuklida tersebut tidak dikatakan membentuk satu isotop stabil. Dari 20 nuklida tersebut, hanya Be yang memiliki Z genap, sementara 19 nuklida lainnya memiliki Z ganjil [6].

Sebagai informasi tambahan untuk mengenal lebih banyak mengenai isotop ini, perlu juga dikemukakan sebaran isotop di alam berdasarkan jumlah proton dan neutron dalam inti atomnya, yaitu [12]:

1. Unsur-unsur yang nomor atomnya ganjil (jumlah proton ganjil) biasanya hanya mempunyai satu nuklida stabil, sedang unsur dengan nomor atom genap (jumlah proton genap) biasanya mempunyai lebih dari satu isotop stabil. Sebagai contoh adalah $^{12}_6\text{C}$ (Carbon) yang terdapat dalam jumlah banyak dan mudah didapatkan di alam ini. Carbon memiliki nomor atom/jumlah proton genap, yaitu 6.
2. Unsur yang jumlah proton dan neutronnya genap banyak terdapat di alam dan umumnya berada di kulit/kerak bumi. Keberadaan $^{28}_{14}\text{Si}$ dan $^{40}_{20}\text{Ca}$ dapat dipakai sebagai contoh unsur-unsur jenis ini.

3. Unsur dengan jumlah proton ganjil dan jumlah neutron genap atau sebaliknya terdapat di alam dalam jumlah cukup.
4. Unsur-unsur dengan jumlah proton maupun neutron ganjil ditemukan di alam dalam jumlah yang sangat jarang. Contoh dari unsur jenis ini adalah: ${}^2_1\text{H}$ (Deuterium, isotop Hidrogen), ${}^6_3\text{Li}$ (Lithium), ${}^{10}_5\text{B}$ (Boron) dan ${}^{14}_7\text{N}$ (Nitrogen).

Selain istilah isotop, kita juga sering menjumpai istilah isoton dan isobar [19]. Isoton adalah unsur-unsur yang jumlah neutronnya sama tetapi nomor atomnya berbeda, dengan demikian nomor massanya juga berbeda. Oleh sebab itu, isoton terbentuk bukan oleh nuklida-nuklida sejenis, melainkan oleh nuklida-nuklida yang tak sejenis. Sebagai contoh untuk isoton ini adalah ${}^{26}_{12}\text{Mg}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}$ dan ${}^{28}_{14}\text{Si}$, jumlah neutron pada masing-masing unsur tersebut adalah 14 buah. Contoh lainnya adalah ${}^{13}_6\text{C}$ dan ${}^{14}_7\text{N}$ yang keduanya mempunyai neutron di dalam inti masing-masing sebanyak tujuh buah. Sedang yang disebut isobar adalah unsur-unsur dengan nomor massa sama tetapi nomor atomnya berbeda, demikian juga jumlah neutron dalam intinya. Seperti halnya isoton, isobar juga terbentuk oleh nuklida-nuklida yang berlainan. Sebagai contoh untuk isobar ini adalah ${}^{31}_{14}\text{Si}$, ${}^{31}_{15}\text{P}$ dan ${}^{31}_{16}\text{S}$, masing-masing unsur memiliki nomor massa 31. Contoh lainnya adalah ${}^{14}_6\text{C}$ dan ${}^{14}_7\text{N}$, masing-masing mempunyai nomor massa 14.

Sudah sejak lama istilah nuklida (*nuclide*) diterima secara luas untuk menyatakan jenis atom yang dicirikan dengan keadaan intinya, yaitu disertakannya nilai Z dan A pada penulisan atom tersebut [19]. Istilah radionuklida dipakai untuk menyebut nuklida yang bersifat radioaktif. Cara penulisan ini ternyata cukup informatif karena banyak atom-atom yang telah diketahui ternyata dapat membentuk isotop baik secara alamiah maupun setelah melalui proses reaksi nuklir [6]. Dengan penyertaan Z dan A maka antara isotop yang satu dengan isotop yang lain dapat dibedakan. Ambil contoh unsur yang mempunyai isotop sangat banyak, misal timah (Sn). Unsur kimia bernomor atom 50 ini membentuk 10 macam isotop dengan nilai A bervariasi dari 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122 dan 124. Isotop-isotop

Sn tersebut berbeda antara satu dengan lainnya. Meski masing-masing mengandung 50 proton dan 50 elektron, namun masing-masing intinya mengandung jumlah neutron yang berbeda-beda, bervariasi dari 62 sampai 74. Dengan penyertaan penulisan A , kita dapat membedakan ke 10 isotop Sn tersebut berdasarkan perbedaan nomor massanya, yaitu ^{112}Sn , ^{113}Sn dan seterusnya sampai dengan ^{124}Sn . Demikian juga untuk isotop-isotop lainnya.

Peta nuklida menggambarkan distribusi isotop-isotop dalam bentuk grafik Cartesius antara nomor atom atau jumlah proton (Z) sebagai absis (sumbu X) dan jumlah neutron (N) sebagai ordinat (sumbu Y) [6]. Pada peta nuklida, atom-atom yang berada pada satu garis horizontal inti atomnya memiliki N yang sama dengan Z yang berbeda-beda sehingga atom-atom itu membentuk isoton. Atom-atom yang berada pada satu garis vertikal inti atomnya memiliki Z yang sama dengan N yang berbeda-beda sehingga atom-atom itu membentuk isotop. Pada peta nuklida juga disertakan garis-garis diagonal miring ke kiri berupa garis-garis isobar, dimana atom-atom yang berada pada garis itu memiliki nomor massa (A) yang sama. Karena A menunjukkan jumlah proton dan neutron ($N + Z$) dalam inti, maka atom-atom yang berada pada garis isobar yang sama memiliki massa inti yang sama pula. Selain itu, ada pula garis kestabilan inti berupa garis lurus miring ke kanan, dimana atom-atom yang berada pada garis itu memiliki N dan Z yang sama ($N = Z$ atau $N/Z = 1$). Untuk atom-atom ringan, atom-atom yang berada pada garis ini merupakan atom-atom yang stabil.

Informasi lain yang dapat kita peroleh dari peta nuklida adalah mengenai keberadaan atom-atom radioaktif atau radionuklida. Radionuklida pemancar β^- terdistribusi di atas posisi atom-atom stabilnya, sedang radionuklida pemancar β^+ terdistribusi di bawah posisi atom-atom stabilnya. Pada atom-atom ringan dengan nomor atom kurang dari 20 ($Z < 20$), radionuklida pemancar β^- memiliki nilai N yang lebih besar dibanding Z atau nilai $N/Z > 1$. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, dalam inti atom akan terjadi perubahan neutron menjadi proton disertai pemancaran elektron atau radiasi β^- . Sementara itu, radionuklida pemancar β^+ memiliki nilai N yang lebih kecil dibanding Z atau nilai

$N/Z < 1$. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, dalam inti atom akan terjadi perubahan proton menjadi neutron disertai pemancaran positron atau radiasi β^+ . Semakin tinggi nomor atom ($Z > 20$), semua radionuklida memiliki nilai $N/Z > 1$, namun radionuklida pemancar β^- memiliki nilai N/Z yang lebih besar dibandingkan dengan radionuklida pemancar β^+ . Pada peta nuklida juga terlihat bahwa atom-atom berat ($Z > 80$) umumnya merupakan radionuklida pemancar sinar α , baik murni maupun campuran.

Banyak informasi yang dapat diperoleh dari peta nuklida. Peta ini dapat dipakai untuk menggambarkan karakteristik suatu atom maupun keadaan inti atomnya. Banyak peristiwa-peristiwa fisika yang dapat terjadi di dalam inti atom dan peta nuklida dapat memberikan gambaran mengenai peristiwa yang dapat terjadi dalam inti, misal mengenai keradioaktifan inti tersebut. Pada atom radioaktif, peta nuklida dapat dipakai untuk menentukan jenis radiasi yang dipancarkan dari inti atom tersebut. Sebaran isotop-isotop suatu nuklida juga tergambar dengan jelas dalam peta nuklida. Demikian juga keberadaan isoton dan isobar. Oleh sebab itu. Pemahaman yang baik terhadap peta nuklida akan mempermudah seseorang dalam menemukan informasi data mengenai suatu nuklida sekaligus dapat mengenali karakteristik nuklida tersebut.

Penyajian atom-atom pada tabel periodik dapat memudahkan kita dalam mengenali sifat atom-atom tersebut [7]. Namun karena banyak di antara atom-atom itu membentuk isotop, maka keberadaan isotop yang jumlahnya mencapai lebih dari 1000 macam ternyata tidak dapat ditampilkan seluruhnya secara bersamaan di dalam tabel periodik. Karena itu diperlukan cara lain untuk menyajikan berbagai jenis atom beserta isotop-isotopnya dalam satu bentuk sajian yang menyeluruh, sehingga karakteristik dari atom-atom itu dapat ditampilkan dalam satu tampilan yang terpadu. Untuk keperluan tersebut, para ilmuwan telah menghadirkan data atom beserta isotop-isotopnya dalam bentuk peta nuklida [6].

BAB 4

MEMASUKI ABAD NUKLIR

Perjalanan perkembangan dan penguasaan ilmu pengetahuan oleh umat manusia telah berlangsung demikian lama dan panjang, bagaikan tongkat estafet yang selalu berpindah tangan diserahkan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Perjalanan teknologi nuklir pun berlangsung demikian. Penelitian demi penelitian yang saling terkait satu dengan lainnya, berlangsung dari satu generasi ke generasi berikutnya, telah mengantarkan perkembangan menuju teknologi nuklir modern seperti yang dapat kita saksikan dewasa ini. Jika di runut hingga ke akar sejarah paling awal, perkembangan teknologi nuklir inipun sebenarnya tidak akan terlepas dari sejarah perkembangan upaya manusia dalam memahami atom.

Sebagaimana telah diuraikan secara panjang dalam dua topik bahasan sebelumnya, teknologi nuklir mungkin tidak akan lahir jika para ilmuwan tidak tahu kalau di dalam atom masih ada inti atom yang tersusun atas proton dan neutron. Inti atom itu sendiri mungkin tidak akan menjadi perhatian Niels Bohr apabila Ernest Rutherford tidak mengemukakan teori atom versi dirinya. Rutherford mungkin juga tidak akan melakukan penelitian menembaki lempeng emas dengan partikel alfa untuk menguji teori atom Joseph J. Thomson apabila sebelumnya Thomson tidak berhasil menemukan elektron. Demikian seterusnya kita dapat merunut sejarah kelahiran dan perkembangan teknologi nuklir hingga ke para filsuf perintis yang hidup sekitar 2.500 tahun silam di Yunani Purba.

Jika pada bagian ini pembahasan mengenai kelahiran teknologi nuklir dimulai dari penemuan-penemuan yang terjadi di sekitar awal hingga pertengahan abad ke-20, tidak berarti penemuan itu berdiri sendiri dan terputus dari sejarah penemuan-penemuan sebelumnya. Pembahasan mengenai aktor utama dalam teknologi nuklir, yaitu atom, sudah dilakukan pada Bab 2, sedang pembahasan mengenai inti atom beserta beberapa fenomena fisika yang dapat terjadi di dalamnya, seperti gejala radioaktivitas dan transmutasi inti, sudah dilakukan pada Bab 3. Penyingkapan rahasia inti

atom di akhir abad ke-19 itu hanyalah bagian dari deretan panjang perjalanan menuju ke era teknologi nuklir modern saat ini.

Pemilihan tonggak sejarah perkembangan teknologi nuklir yang dimulai dari penemuan-penemuan yang berlangsung pada awal abad ke-20 ini semata-mata dimaksudkan untuk memperpendek lingkup pembahasan. Pemilihan juga didasari atas adanya kenyataan bahwa pada kurun waktu tersebut telah terjadi peristiwa-peristiwa besar yang berkaitan langsung dengan kelahiran teknologi nuklir modern [26].

Banyak ilmuwan yang hasil karyanya membidani penemuan dan pemahaman tentang adanya reaksi nuklir, yaitu jenis reaksi baru yang melibatkan perubahan inti atom. Berbeda dengan reaksi kimia yang saat itu sudah dikenal secara luas, dimana reaksi yang terjadi antara atom hanya menyebabkan perubahan struktur molekul suatu bahan tanpa menyebabkan perubahan inti atom. Peristiwa-peristiwa besar yang dimunculkan oleh ilmuwan-ilmuwan besar itu beberapa diantaranya berhasil menyabet penghargaan ilmiah paling bergengsi berupa penganugerahan Hadiah Nobel Fisika untuk para penemunya [30].

4.1. Kesetaraan Massa dan Energi

Perkembangan penting yang nantinya dapat dipakai untuk menjelaskan tentang kedahsyatan energi yang dihasilkan dari reaksi nuklir adalah lahirnya teori relativitas yang dirumuskan oleh Albert Einstein (1879-1955) [32]. Lahir di kota Ulm, Jerman, Einstein memasuki perguruan tinggi dan menjadi warganegara Swiss tahun 1900. Tepatnya pada 1905, Einstein mendapatkan gelar doktor dari Universitas Zurich. Pada tahun itu juga, Einstein menerbitkan kertas kerjanya yang berisikan tentang teori relativitas khusus. Saat itu Einstein menyerahkan sebuah makalahnya ke jurnal ilmiah prestisius Jerman *Annalen der Physik* (*Annals of Physics*) tentang teori matematis dari relativitas khusus. Jurnal tersebut juga menerbitkan tiga makalah Einstein lainnya pada tahun yang sama, yang sering disebut “tahun keajaiban” Einstein, termasuk satu makalah yang pada akhirnya membuatnya dianugerahi

Hadiah Nobel bidang fisika. Makalah ini sebenarnya hanyalah awal dari serangkaian rumusan yang lebih rinci mengenai teori relativitas [33].

Selama sepuluh tahun berikutnya, Einstein bekerja keras untuk dapat terus mengembangkan teori relativitasnya [32]. Pada 1913 Einstein diangkat sebagai mahaguru di Universitas Berlin dan pada saat yang bersamaan juga menjadi Direktur Lembaga Fisika Kaisar Wilhelm serta menjadi anggota Akademi Ilmu Pengetahuan Prusia. Tidak salah jika pemerintah Jerman memberi begitu banyak kedudukan tinggi dan istimewa kepada Einstein, karena pada 1921 ia berhasil memenangkan hadiah Nobel bidang fisika untuk penemuan efek fotolistrik dan pengabdianya pada fisika teoritis yang makalahnya ditulis pada 1905 [30]. Namun karena situasi politik di Jerman dimana penguasa Nazi mengancam keselamatan jiwanya, maka pada 1933, Einstein beserta keluarganya pindah ke Amerika Serikat dan mengambil posisi sebagai Profesor Fisika Teoritis di Universitas Princeton [32]. Pada 1941 Einstein mengucapkan sumpah sebagai warga negara Amerika Serikat. Sekitar separo terakhir dari masa hidupnya, Einstein menjadi buah bibir dunia, dan hampir dapat dipastikan bahwa dialah ilmuwan termasyhur yang pernah lahir di dunia. Einstein meninggal pada 18 April 1955 di Princeton, New Jersey, pada usia 76 tahun. Pada 1999, Einstein dinobatkan sebagai Tokoh Abad Ini (abad 20) oleh majalah Time. Tahun 2001, nama Einstein dipakai sebagai satuan dalam fotokimia dan nama untuk sebuah asteroid [33].

Pada mulanya selama bertahun-tahun orang menjauhi teori relativitas Einstein karena dianggap tidak punya arti penting terhadap ilmu pengetahuan [34]. Apa yang dikemukakan Einstein itu tak lebih dari sekedar kedahsyatan teori yang saat itu masih sangat sulit untuk dibuktikan, mengundang beda pendapat di kalangan ilmuwan dan dinilai sebagai hasil pemikiran paling meragukan yang pernah dirumuskan manusia. Teori yang dikemukakannya dinilai sangat kontroversial. Belum ada ilmuwan dunia sebelum Einstein kecuali Charles Darwin yang pernah melontarkan suatu teori yang dinilai kontroversial oleh kalangan ilmuwan sezamannya. Tidak jarang Einstein terpaksa harus berhadapan dengan para ilmuwan yang tidak sependapat dengannya [33].

Pada mulanya, teori relativitas Einstein yang baru dan asing agaknya sulit diterima dan tidak mudah dicerna. Namun lambat laun teori itu menjadi semakin difahami, dan dimanfaatkan untuk menghasilkan temuan-temuan menakjubkan tentang alam semesta serta bagaimana cara kerjanya. Temuan Einstein tentang hukum-hukum alam yang sangat mendasar itu secara tidak langsung telah memberikan sumbangan dalam pengembangan teknologi nuklir. Teori itu berhasil menjawab apa yang selama itu dicari oleh banyak ilmuwan, yaitu sebuah hukum baru untuk menggantikan Hukum Newton yang telah digunakan untuk menerangkan banyak masalah penting dalam ilmu fisika. Bagi para ilmuwan lain yang mampu memahami alasan-alasan matematis di balik teori relativitas Einstein, teori itu justru menjadi sebuah alat baru yang luar biasa untuk membantu mengeksplorasi alam, serta untuk menghasilkan temuan-temuan baru yang menakjubkan tentang alam semesta secara keseluruhan [32].

Einstein memang telah menempuh cara berbeda dengan kebanyakan ilmuwan modern yang berpandangan empiris. Salah satu hasil dari pendekatan Einstein adalah bahwa teori relativitas umumnya dianggap sesuatu yang sangat indah dan secara intelektual memuaskan semua teori ilmiah. Di tengah keraguan para ilmuwan terhadap teori relativitas, namun di satu sisi Einstein ternyata dapat sukses bertahan dengan teori relativitasnya setiap kali dilakukan pengujian. Sumbangan pemikiran Einstein di bidang ilmu pengetahuan tidaklah diragukan lagi. Hanya dalam beberapa tahun saja kertas kerja Einstein, terutama yang berhubungan dengan relativitas, telah mengangkatnya menjadi salah seorang ilmuwan paling cemerlang dengan karya paling orisinal di dunia. Teori relativitasnya telah mengubah pemahaman semua orang tentang alam semesta secara keseluruhan. Lebih dari itu, teori Einstein mengajak orang melihat dan menghayati dunia dengan cara yang baru dan berbeda sama sekali dengan kaidah-kaidah fisika sebelumnya [34].

Einstein selalu tampak memiliki pandangan yang jemih terhadap berbagai persoalan fisika dan selalu terdorong untuk mencari jawabannya. Pada 1915 beliau berhasil merumuskan dan menuntaskan versi teori relativitas baru yang hingga saat ini dikenal sebagai teori relativitas umum dan pada

1916 beliau menerbitkan serangkaian makalahnya tentang teori ini. Hampir sebagian besar teori itu tertuang dalam bahasa matematika. Antara 1914 dan 1918 Einstein telah menulis lebih dari 50 makalah dan menyelesaikan penyusunan sebuah buku. Naskah untuk bukunya yang membahas teori relativitas umum telah mendekati penyelesaian. Naskah tulisan dalam bentuk buku itu diterbitkan pada 1920 dengan judul "*Relativity: The Special and The General Theory*". Dalam bukunya ini, Einstein berkeinginan untuk menjelaskan ide rumit tentang relativitas dengan jelas, dan dengan bahasa sehari-hari sehingga orang awampun mampu memahami penjelasan tentang kedua teori tersebut. Hal paling melegakan hatinya adalah bahwa beliau menemukan semakin banyak sesama ilmuwan yang mulai percaya pada gagasan-gagasan barunya. Teori yang semula dianggap kontroversial itu ternyata diakui kebenarannya [34].

Einstein ternyata tidak sekedar mengembangkan wacana secara teoritis, melainkan menuangkannya ke dalam rumusan matematis yang jernih dan jelas sehingga hipotesanya sebenarnya bisa diuji secara ilmiah [33]. Teori Einstein tentang relativitas khusus mensyaratkan bahwa jika sebuah obyek sedang bergerak dengan tingkat kecepatan yang "relativistik", kecepatannya tidak akan terus meningkat walaupun energi obyek itu ditingkatkan. Yang terjadi justru pada saat peningkatan energi, massa obyek harus meningkat. Garis pemikiran ini membawa Einstein pada kesimpulan bahwa energi dan massa adalah manifestasi yang berbeda dari hal yang sama. Jadi kesimpulannya berupa teori relativitas umum yang menyatakan bahwa benda dan energi berada dalam keseimbangan. Hubungan antara keduanya dirumuskan dengan persamaan:

$$E = mC^2 \quad (4-1)$$

dengan E menunjukkan energi yang tersimpan dalam benda (dinyatakan dalam Joule), m adalah massa benda dalam kilogram dan C adalah kecepatan cahaya. Karena nilai C ini sangat besar, yaitu 3×10^8 meter/detik (sama dengan 300.000.000 m/detik atau 300.000 km/detik), maka implikasi dari teori itu adalah bahwa sejumlah besar energi dapat dihasilkan dari sebuah perubahan yang sangat kecil pada massa [19]. Dalam benda yang sangat kecil sekalipun, tersimpan energi yang

luar biasa besarnya. Prinsip inilah yang mendasari reaksi nuklir, yang berhasil diwujudkan pada 1938 oleh ilmuwan Jerman Otto Frisch dan Lise Meitner. Hasil kerja keras Einstein selama sepuluh tahun itu masih sangat penting hingga sekarang. Banyak ilmuwan merasa terdugah oleh perasaan kagum dan takjub pada hukum-hukum alam penuh misteri yang berhasil diungkap Einstein.

Teori relativitas Einstein merupakan salah satu sumbangan penting untuk merumuskan hukum fisika satu-satunya yang diharapkan dapat dipakai untuk menjelaskan alam semesta [34]. Namun Einstein sendiri menyadari ada satu masalah dimana hukum itu tidak sepenuhnya berkesesuaian dengan teori penting lain yang digunakan oleh para fisikawan dalam membantu memahami kejadian-kejadian di alam semesta. Selain teori relativitas, ada teori lain yang dikenal sebagai mekanika kuantum, yang juga banyak dipakai untuk menjelaskan fenomena alam [10]. Mekanika kuantum dapat menjelaskan bagaimana perilaku partikel-partikel elementer subatomik seperti elektron maupun proton. Pemahaman atas perilaku partikel elementer tersebut menghasilkan suatu cakrawala pandangan baru mengenai hukum-hukum fisika berkaitan dengan atom [5].

4.2. Sumber Neutron

Selain berhasil menemukan neutron, metode penelitian yang digunakan Rutherford dan Chadwick, sebagaimana telah dikemukakan pada Bab 3, juga mengantarkan ke arah pemahaman baru di kalangan ilmuwan, yaitu pengetahuan mengenai sumber neutron itu sendiri. Para ilmuwan segera menyadari, bahwa apabila sinar alfa ditembakkan ke target yang dibuat dari atom-atom ringan, yaitu atom dengan nomor atom (Z) rendah seperti lithium ($Z = 3$), berilium ($Z = 4$) dan boron ($Z = 5$), maka dari penembakan itu akan dipancarkan neutron. Saat itu sudah dikenal ada beberapa jenis unsur berat (Z tinggi) di alam yang bersifat radioaktif pemancar sinar alfa. Dengan kombinasi campuran antara unsur berat yang radioaktif pemancar alfa dengan unsur ringan, para ilmuwan berhasil mendapatkan sumber neutron yang cukup efektif untuk melakukan berbagai jenis penelitian [12].

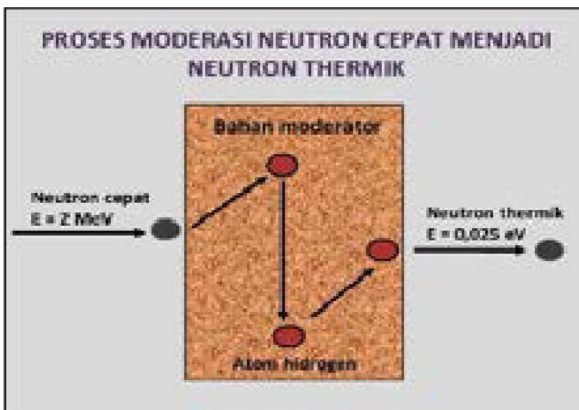
Semula para ilmuwan menggunakan sumber neutron berupa pasangan radium-berilium (Ra-Be). Mereka mendapatkan jumlah neutron yang dipancarkan oleh sumber itu ternyata sangat sedikit. Partikel alfa yang dipancarkan oleh satu gram radium hanya mampu menghasilkan sekitar 10 juta buah neutron per detik dari pelat berilium [16]. Meskipun berkas neutron yang dihasilkan sumber tersebut mampu menembus inti atom, namun jumlahnya dirasa masih terlalu kecil dibanding dengan kebutuhan. Guna meningkatkan jumlah pancaran neutron, pasangan peneliti Irene dan Frederic Joliot-Curie pada 1934 memperkenalkan sumber pemancar sinar alfa dari bahan polonium (Po) yang tingkat keradioaktifannya lebih tinggi dibanding radium [29]. Sumber Po tersebut dicampur dengan unsur ringan seperti boron (B) sehingga dihasilkan sumber Po-B dengan harapan jumlah neutron yang dipancarkan akan meningkat.

Sebagaimana pernah dikemukakan oleh Rutherford dalam kuliahnya pada 1920 di Bakerian Lecture, Royal Society, Inggris, bahwa partikel netral yang kala itu belum berhasil dibuktikan keberadaannya itu akan memiliki sifat istimewa. Karena tidak bermuatan, maka medan listrik luarnya praktis nol, sehingga partikel itu akan bebas bergerak dalam berbagai jenis bahan [5]. Beberapa penelitian yang melibatkan neutron mulai gencar dilakukan. Salah satu penelitian itu dilakukan oleh fisikawan muda Enrico Fermi (1901-1954) yang pada 1930 mulai bekerja di Universitas Roma. Bersama kawan-kawannya seperti Edoardo Amaldi, Franco Rasetti dan Emilio Segre, Fermi merancang penelitian melakukan penembakan neutron terhadap berbagai jenis unsur mulai dari yang ringan hingga yang lebih berat. Penelitian itu dimaksudkan untuk mempelajari hasil reaksi apa saja yang mungkin dapat terjadi, salah satunya adalah untuk mendapatkan unsur radioaktif buatan [35].

Penembakan neutron terhadap unsur-unsur ringan mulai dari hidrogen, lithium, berilium, boron hingga carbon semuanya berakhir tanpa hasil apapun sebagaimana diharapkan semula. Tak ada unsur radioaktif buatan yang diperoleh. Meskipun demikian, kegagalan penelitian itu ternyata mendatangkan hasil samping berupa pemahaman baru terkait interaksi neutron dengan bahan-bahan yang tersusun atas atom-atom ringan seperti air dan paraffin [5]. Mereka mengamati bahwa hasil interaksi

antara neutron dengan atom ringan akan menyebabkan penurunan kecepatan gerak neutron. Interaksi yang berlangsung berulang kali akan menyebabkan neutron cepat (berenergi tinggi) berubah menjadi neutron lambat (berenergi termik).

Penurunan kecepatan gerak neutron sebagaimana diamati Fermi terjadi karena setiap kali terjadi tumbukan antara neutron dengan inti atom bahan, akan disertai dengan pengalihan sebagian energi neutron kepada bahan. Akibatnya, setelah mengalami beberapa kali tumbukan, energi neutron terkuras mendekati habis dan gerakannya menjadi sangat lambat. Neutron ini disebut neutron termik karena energinya sama dengan energi gerak molekul gas hidrogen pada temperatur kamar [16]. Jika energi neutron yang dipancarkan dari sumber semula berorde sekitar 5 Mega elektron Volt (MeV, $1 \text{ MeV} = 1.000.000 \text{ eV}$), setelah menjadi neutron termik energinya tinggal 0,025 elektron Volt (eV). Untuk selanjutnya, bahan-bahan yang dapat dengan efektif memperlambat gerak neutron seperti air dan parafin disebut sebagai bahan moderator. Kedua bahan itu banyak mengandung atom hidrogen yang massa intinya hampir sama dengan massa neutron [36]. Apabila hidrogen berinteraksi dengan neutron, akan terjadi tumbukan elastis yang mampu menyerap sebagian besar energi neutron seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Tumbukan elastis untuk menurunkan energi neutron [32]

Hasil samping dari kerja Fermi dan kawan-kawan tadi justru nantinya memiliki peran penting dalam mengantarkan ke arah penemuan reaksi nuklir jenis pembelahan inti atom [32]. Semula orang beranggapan bahwa dengan energi tinggi, neutron akan lebih mudah menjangkau inti atom, tetapi hasil eksperimen Fermi justru menunjukkan kebalikannya. Neutron menjadi cukup mudah ditangkap oleh inti atom suatu bahan apabila gerakannya sangat lambat [36]. Dalam waktu yang relatif singkat, hampir semua unsur yang saat itu sudah dikenal telah diuji Fermi dan kawan-kawan dengan penembakan neutron termik [5]. Tahun 1927 Fermi menjadi professor fisika teoritis di Universitas Roma. Kerja keras Fermi dengan hasil karyanya di bidang radioaktivitas buatan yang dihasilkan dari penembakan neutron terhadap berbagai jenis bahan mengantarkannya memenangkan hadiah Nobel Fisika pada 1938 [30].

4.3. Reaksi Fisi

Setelah penemuan uranium oleh Becquerel, penemuan neutron oleh Chadwick, dan pengamatan neutron termik oleh Fermi dan kawan-kawan, Otto Hahn (1879-1968) dan Fritz Strassman (1902-1980) pada Desember 1938 menemukan reaksi pembelahan inti atom [32]. Mereka melakukan penelitian di Institut Kaisar Wilhelm, Jerman, dengan cara menembaki unsur uranium dengan partikel neutron termik. Semula mereka mendapatkan hasil yang sangat aneh sekaligus membingungkan.

Ketika dilakukan analisis kimia yang lebih saksama terhadap inti atom hasil penembakan neutron termik terhadap inti atom uranium, mereka mendapati salah satu inti yang dihasilkan ternyata memiliki sifat kimia mirip unsur barium dengan $Z = 56$ dan $A = 137$, lebih kecil dibandingkan uranium dengan $Z = 92$ dan $A = 235$. Kala itu, hasil tersebut tentu sangat membingungkan karena sangat bertentangan dengan anggapan yang sudah mapan, bahwa inti atom tak mungkin pecah menghasilkan inti dengan Z dan A yang jauh lebih rendah dibanding Z dan A inti asal [25].

Merasa tidak puas terhadap hasil penelitiannya, Hahn dan Strassman mengulang kembali penelitian semula dengan menerapkan pengamatan yang tingkat ketelitiannya lebih tinggi. Namun keanehan yang sama dengan penelitian sebelumnya ternyata muncul kembali pada penelitian ulangan [32]. Dari penelitian ini mereka mendapatkan hasil reaksi berupa inti atom lanthanum dengan $Z = 57$ dan $A = 138$. Meski analisis secara kimiawi berhasil mengidentifikasi kemunculan unsur barium dan lanthanum, Hahn dan Strassman belum dapat memberikan penjelasan yang memuaskan dari aspek fisika. Pertanyaan paling mendasar dari hasil eksperimen itu adalah mengapa barium dan lanthanum dengan massa inti ringan dapat terbentuk dari uranium yang massa intinya hampir dua kali lebih berat [5].

Penemuan Hahn dan Strassman akhirnya sampai kepada Otto Robert Frisch (1904-1979) pada bulan Desember 1938. Frisch adalah fisikawan Austria yang saat itu sedang menjadi peneliti di Institut Niels Bohr di Kopenhagen, Denmark. Semula Frisch tidak begitu tertarik terhadap temuan tersebut. Seperti halnya para fisikawan lainnya saat itu, Frisch juga percaya bahwa inti atom uranium terlalu pejal sehingga sulit untuk membelah menjadi inti-inti yang lebih ringan [5]. Hingga suatu ketika Frisch teringat pada teori “model tetes cairan” (*liquid drop model*) yang pernah diusulkan oleh Niels Bohr dan Fritz Kalckar yang didengarnya di suatu seminar di Institut Niels Bohr pada 1936. Menurut teori Bohr dan Kalckar itu, inti atom berat seperti inti atom uranium sejatinya mirip setetes cairan [14]. Kestabilan intinya tercapai karena ada perimbangan antara gaya tolak listrik antar proton dalam inti berjangkauan jauh dan gaya ikat nukleon berjangkauan pendek. Ketika neutron ataupun partikel lain diserap inti atom berat, partikel itu dapat mengganggu kestabilan sehingga inti akan pecah.

Mengenang kembali teori dari Bohr dan Kalckar, Frisch langsung menghubungkan temuan Hahn dan Strassman itu dengan model tetes cairan yang pernah didengarnya. Keseimbangan inti atom berat dinilainya sangat labil, sehingga masuknya partikel lain ke dalam inti cukup untuk mengganggu keseimbangannya [14]. Sebagaimana tetes cairan, terbuka kemungkinan inti berat akan terbelah, seperti dua tetes

cairan, menjadi dua bagian yang ukurannya lebih kecil. Penjelasan seperti itu memang sangat tepat diterapkan pada hasil temuan Hahn dan Strassman, dimana penyerapan neutron termik oleh inti atom uranium akan menyebabkan kestabilan inti atom terganggu sehingga bentuk inti menjadi lonjong dan akhirnya pecah menjadi dua buah inti masing-masing dengan ukuran lebih kecil.

Hasil belahan inti uranium bisa berupa pasangan inti dengan komposisi Z yang cukup variatif, namun jumlahnya selalu 92, karena Z induknya (uranium) adalah 92. Dalam hal ini, pada proses pembelahan inti atom, berlaku hukum kekekalan Z dan A [19]. Beberapa contoh pasangan hasil belah inti uranium adalah pasangan inti zirconium ($Z = 40$) dan tellurium ($Z = 52$), atau pasangan inti barium ($Z = 56$) dan krypton ($Z = 36$), bisa juga pasangan inti rubidium ($Z = 37$) dan cesium ($Z = 55$) dan sebagainya. Dalam perkembangan berikutnya, ditemukan pula inti-inti lain hasil fisi yang lebih beragam, seperti bromium ($Z = 35$), strontium ($Z = 38$), molybdenum ($Z = 42$), iodine ($Z = 53$), xenon ($Z = 54$) dan sebagainya [14].

Otto Frisch dan Lise Meitner di Penghujung 1938 mengulang kembali percobaan Hahn dan Strassman menggunakan detektor jejak nuklir rancangannya. Mereka mengamati masing-masing inti atom pasangan hasil belah terlepas dan bergerak dengan energi tinggi dalam arah saling berlawanan. Hasil perhitungan menggunakan persamaan relativitas umum Einstein, $E = mc^2$, menunjukkan bahwa total energi gerak pasangan hasil belahan inti mencapai sekitar 200 MeV. Hasil percobaan ini akhirnya ditulis dalam bentuk makalah dan dikirim ke redaksi jurnal ilmiah Inggris, *Nature*, pada 16 Januari 1939. Dalam makalah itu Frisch menggunakan istilah fisi (*fission*) untuk menamai reaksi pembelahan yang terjadi pada inti atom berat seukuran uranium [32].

Dalam kesempatan terpisah, Frisch juga mengirimkan makalah lainnya ke jurnal *Nature*, dimana Frisch meramalkan bahwa proses fisi inti uranium akan dibarengi oleh pembebasan 2-3 buah neutron baru dengan energi gerak sekitar 2 MeV, yang setara dengan kecepatan gerak neutron sekitar 10.000 km per detik. Jika ramalan itu benar adanya,

maka neutron baru yang dilepaskan dari proses fisi itu nantinya tentu dapat dimanfaatkan lagi untuk melangsungkan proses fisi berikutnya. Publikasi makalah Frisch itu akhirnya mendorong para fisikawan untuk membuktikan kebenaran ramalannya melalui berbagai eksperimen. Karena setiap proses fisi selalu diikuti oleh pembebasan energi nuklir sebesar 200 MeV, mereka membayangkan akan diperoleh pembebasan energi nuklir dalam jumlah besar yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan hidup umat manusia [37].

Enrico Fermi menjadi Profesor Fisika Teoritis di Universitas Roma, dari 1927 hingga 1938. Menemukan kondisi politik di Italia yang membahayakan kehidupan diri dan keluarganya, setelah melakukan perjalanan dari Roma menuju Stockholm, Swedia, untuk menerima hadiah Nobel Fisika pada 10 Desember 1938, Fermi beserta keluarga melanjutkan perjalanannya bermigrasi menuju Amerika Serikat, dalam rangka menghindari pemimpin fasis Benito Mussolini yang saat itu berkuasa di Italia [35]. Tiba di New York tanggal 2 Januari 1939, Fermi langsung diterima sebagai Profesor Fisika di Universitas Columbia, New York. Dalam perkembangan berikutnya, temuan reaksi fisi uranium oleh Hahn dan Strassman akhirnya sampai juga kepada para fisikawan di Amerika Serikat. Baru dua minggu berada di New York, Fermi juga langsung mendapatkan berita tentang penemuan tersebut. Beberapa fisikawan yang melakukan penelitian di berbagai laboratorium di negara itu segera merancang sistem instrumentasi pengamatan untuk mengkonfirmasi hasil temuan itu.

Fermi bersama koleganya John Ray Dunning dan Herbert Anderson tidak ketinggalan ikut mengulang kembali eksperimen fisi uranium tersebut. Tanggal 25 Januari 1939 mereka berhasil mengkonfirmasi kebenaran adanya fisi uranium seperti yang ditemukan Hahn dan Strassman, sekaligus melaporkan tentang dilepaskannya 2-3 buah neutron dari proses fisi seperti yang diramalkan Frisch dan Meitner sebelumnya [35]. Laporan ini disampaikan Fermi tanpa mengetahui bahwa hal itu sebenarnya telah diramalkan sebelumnya oleh Frisch. Dalam kesempatan yang lain, Fermi juga melakukan penelitian bersama dengan Leo Szilard dan berhasil menemukan bahwa uraniumlah unsur

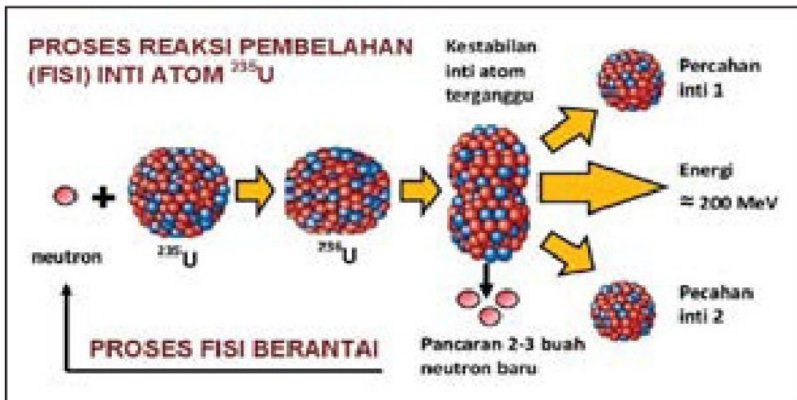
yang paling tepat untuk melangsungkan reaksi nuklir berantai. Mereka juga berhasil membuktikan adanya penggandaan neutron pada uranium yang memiliki potensi untuk pembuatan senjata nuklir [36].

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai kalangan, ternyata semuanya berhasil mengkonfirmasi kebenaran terjadinya reaksi fisi pada atom uranium. Yang menakjubkan, semua pekerjaan itu ternyata berhasil dituntaskan hanya dalam jangka waktu tiga bulan setelah teori fisi atom diumumkan. Pengamatan adanya pelepasan 2-3 buah neutron baru dari proses fisi juga dilaporkan oleh Hans von Halban, Frederic Joliot-Curie, dan Lev Kowarski di Perancis yang mempublikasikan hasil eksperimennya dalam dua jurnal di musim gugur pada 1939. Dari beberapa hasil konfirmasi tersebut para ilmuwan akhirnya mendapatkan suatu kesimpulan bahwa [10]:

- Inti atom uranium pecah menjadi dua inti yang lebih kecil (Z lebih kecil) dan massanya lebih ringan (A lebih ringan) dibandingkan inti uranium,
- Dipancarkan dua hingga tiga buah partikel neutron baru dengan energi kinetiknya sangat tinggi, berkisar antara 2-3 MeV. Karena bergerak sangat cepat dengan energi sangat tinggi, neutron ini disebut neutron cepat.
- Dilepaskan energi inti dalam bentuk panas sebesar kurang lebih 200 MeV.

Reaksi yang ditemukan oleh Hahn dan Strassmann ternyata sangat berlainan dengan reaksi kimia biasa yang sudah dikenal pada saat itu. Reaksi kimia terjadi antar unsur-unsur kimia, dimana unsur-unsur yang bereaksi masih dapat ditemukan dalam senyawa hasil reaksi. Reaksi pembelahan atom uranium tersebut dikatakan reaksi inti, karena setelah terjadi reaksi tidak ditemukan lagi adanya inti atom uranium. Reaksi ini disebut juga reaksi fisi (pembelahan) karena inti uranium pecah menjadi dua inti dengan Z dan A nya lebih kecil seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dari penemuan reaksi nuklir inilah persamaan kesetaraan massa dan energi yang dirumuskan dalam persamaan relativitas umum Einstein, $E = mc^2$, dapat dibuktikan, diakui kebenarannya dan akhirnya diterima

oleh kalangan ilmuwan secara luas [32]. Reaksi fisi adalah reaksi nuklir eksotermis, yaitu reaksi yang selalu diiringi dengan pelepasan sejumlah energi. Semakin banyak inti uranium yang melakukan proses fisi, akan semakin besar energi panas yang dilepaskan. Energi itu sendiri berasal dari konversi sebagian massa inti. Karena itu, total massa inti setelah proses fisi akan selalu lebih kecil dibandingkan total massa inti sebelum proses fisi.



Gambar 4.2. Proses fisi inti atom ^{235}U [32]

Dalam perkembangan berikutnya para ilmuwan mengetahui bahwa selain reaksi fisi uranium, masih banyak unsur lain yang dapat berfisi. Pada dasarnya semua unsur dalam golongan aktinida yang mempunyai jumlah neutron ($N = A - Z$) ganjil pada intinya dapat berfisi [19]. Unsur-unsur tersebut antara lain adalah plutonium-241 ($^{241}_{94}\text{Pu}$, $N = 241 - 94 = 147$), curium-243 ($^{243}_{96}\text{Cm}$, $N = 147$), uranium-233, californium-241 ($^{241}_{98}\text{Cf}$, $N = 143$), americium-242 ($^{242}_{95}\text{Am}$, $N = 147$), californium-251 ($^{251}_{98}\text{Cf}$, $N = 153$), curium-245 ($^{245}_{96}\text{Cm}$, $N = 149$), dan plutonium-239 ($^{239}_{94}\text{Pu}$, $N = 145$). Unsur-unsur yang intinya dapat melakukan fisi itu seringkali disebut sebagai bahan fisil (*fissile material*). Dari sekian banyak bahan fisil, empat bahan fisil yaitu U-233, U-235, Pu-239 dan Pu-241 sudah dimanfaatkan untuk melangsungkan reaksi nuklir.

4.4. Menyurati Presiden

Reaksi nuklir yang pertama kali ditemukan oleh Hahn dan Strassmann hanya terjadi apabila dilakukan penembakan uranium dengan neutron termik. Reaksi ini akan berhenti dengan sendirinya apabila penembakan uranium dihentikan. Namun jika diperhatikan bahwa reaksi nuklir ini juga disertai dengan pemancaran dua hingga tiga buah neutron baru, maka dalam benak para ilmuwan timbul fikiran bahwa neutron tersebut dapat juga dimanfaatkan untuk melangsungkan reaksi nuklir berikutnya, tanpa harus melakukan penembakan uranium lagi. Apabila neutron yang keluar dari reaksi pembelahan tersebut dapat dimanfaatkan, maka reaksi pembelahan dengan sendirinya dapat berlangsung terus selama masih tersedia uranium dalam jumlah yang mencukupi. Jika hal tersebut terjadi, maka reaksinya disebut sebagai reaksi nuklir berantai [32]. Reaksi berantai ini bisa disamakan dengan proses pembakaran yang dapat berlangsung terus selama masih tersedia bahan bakar, ibarat nyala sebatang korek api yang dapat menyulut kebakaran pada padang semak belukar sangat luas yang kering.

Kabar penemuan reaksi nuklir mendapatkan perhatian yang serius dari Enrico Fermi. Bersama beberapa ahli fisika lainnya, Fermi segera melihat dan membayangkan potensi kemiliteran yang bisa dihasilkan oleh reaksi nuklir tersebut [37]. Menjelang bulan Maret 1939, Fermi menghubungi Angkatan Laut Amerika Serikat dan mencoba menarik perhatian mereka dalam hal pembuatan senjata nuklir. Namun usaha Fermi ini ternyata kurang mendapatkan perhatian dari pemerintah Amerika Serikat waktu itu [28]. Usaha pembuatan senjata nuklir baru mendapatkan perhatian dari pemerintah ketika beberapa bulan setelah Fermi menghubungi Angkatan Laut, Einstein atas usulan Szilard menulis surat kepada Presiden AS Franklin D. Roosevelt [38]. Surat ditulis dari hasil konsultasi dengan sesama fisikawan Hungaria, yaitu Edward Teller dan Eugene Wigner.

Isi surat itu menerangkan bahwa temuan-temuan ilmiah mutakhir telah menunjukkan terbukanya kemungkinan pembuatan senjata yang didasarkan pada tenaga nuklir. Dalam surat tersebut berisi saran agar

Amerika Serikat meneliti kekuatan potensial dari bom atom. Einstein dan kawan-kawan menggunakan pengetahuan ilmiahnya dengan segala daya untuk membantu perjuangan melawan kekuatan Nazi di Jerman yang saat itu dinilai sangat membahayakan. Einstein, Szilard, Teller dan Wigner sekaligus menekankan arti penting bagi Amerika Serikat untuk memiliki senjata tersebut, disertai kekhawatiran jika pihak Nazi di Jerman telah mengembangkan senjata tersebut lebih dulu [32]. Surat ditandatangani pada 2 Agustus 1939 dan dititipkan melalui seorang ekonom bernama Alexander Sach. Namun oleh Sach surat tersebut baru sempat disampaikan kepada Presiden Roosevelt pada 11 Oktober 1939.

Setelah mendapat tanggapan dari pemerintah Amerika Serikat, dibentuklah lembaga bernama Komite Penasehat Uranium yang mengadakan pertemuan untuk pertama kalinya pada 21 Oktober 1939. Lembaga tersebut dipimpin oleh Direktur Biro Standar Nasional Amerika Serikat, Lyman James Briggs, sehingga terkenal dengan sebutan *Briggs Committee*. Einstein mengirim lagi dua pucuk surat kepada Roosevelt, pertama pada 7 Maret 1940 dan kedua pada 25 April 1940. Surat berisi permintaan untuk merealisasikan penelitian nuklir. Dalam hal ini fasilitas riset energi nuklir harus segera dibangun oleh pemerintah. Pada 1941 Presiden Roosevelt menugasi kepada para ilmuwan dalam rangka menindaklanjuti saran dari Einstein tersebut. Tugas dari para ilmuwan yang paling utama adalah membangun sebuah prototip fasilitas yang mampu melangsungkan reaksi nuklir untuk mengamati apakah reaksi tersebut dapat berlangsung terus-menerus (reaksi nuklir berantai) dan bisa dikendalikan [39].

Pada saat itu, Enrico Fermi sudah dikenal sebagai seorang ilmuwan berbobot dalam bidang neutron, salah satu partikel terpenting untuk mendapatkan reaksi nuklir. Beliau juga berhasil menggabungkan bakat berteorinya dengan praktek-praktek lapangan secara langsung. Dengan kapasitas inilah Fermi ditunjuk menjadi kepala kelompok dalam pembangunan fasilitas nuklir tersebut. Einstein memang tidak mengambil banyak peran dalam kegiatan tersebut. Dana sebanyak US\$ 6.000 dianggarkan untuk melakukan eksperimen neutron oleh kelompok Fermi. Ketika memimpin proyek itu, Fermi sudah pindah kampus dari Universitas Columbia ke universitas Chicago [35].

Beberapa hambatan untuk mewujudkan impian Einstein dan Roosevelt berhasil diatasi oleh Fermi dan kawan-kawan [39]. Masalah pertama yang dihadapi adalah memilih bahan moderator untuk memperlambat gerak neutron cepat yang keluar dari proses fisi agar berubah menjadi neutron termik dan dapat dipakai untuk melangsungkan proses fisi berikutnya. Jalan keluar dari kesulitan ini akhirnya ditemukan Fermi dan Szilard. Mereka menyarankan bahwa keefektifan bahan moderator dapat ditingkatkan lebih tinggi apabila digunakan butir-butir uranium terpisah yang ditempatkan dalam suatu matriks atau kisi besar dari bahan moderator. Susunan butir uranium yang menyerupai bentuk kisi ini disebut kisi moderator. Teknik penempatan uranium dengan pola kisi moderator tersebut memungkinkan neutron cepat yang keluar dari proses fisi akan melintasi terlebih dahulu jarak tertentu dalam bahan moderator sebelum akhirnya diserap oleh inti uranium lainnya. Karena proses itu, seluruh badan moderator akan terisi oleh neutron termik.

Dengan menggunakan grafit (tersusun atas atom carbon) sebagai bahan moderator dan memilih ukuran butiran uranium yang sesuai, maka dapat dicapai kondisi dimana jumlah neutron termik selalu meningkat [39]. Kisi moderator dengan kondisi ini dapat menghasilkan reaksi fisi berantai yang makin lama makin banyak. Di sisi lain, lepasnya neutron yang berlebihan dari kisi moderator akan menghentikan jalannya reaksi berantai. Karena itu perlu dicari suatu ukuran kritis sistem uranium-moderator, yaitu ukuran dimana jumlah neutron yang dihasilkan dari proses fisi dapat mengimbangi jumlah neutron yang hilang, sehingga populasi neutron di dalam moderator cukup konstan.

Berdasarkan konsep ukuran kritis sistem uranium-moderator tadi, jika ukuran sistem lebih kecil dari ukuran kritisnya (disebut juga subkritis), maka jumlah neutron yang hilang akan lebih banyak dibandingkan dengan jumlah neutron yang dilepaskan proses fisi. Dalam kondisi ini, reaksi fisi berantai tidak dapat dipertahankan dalam waktu lama. Sebaliknya, jika ukuran sistem lebih besar dari ukuran kritisnya (disebut juga superkritis), maka jumlah neutron yang hilang lebih kecil dibandingkan dengan jumlah neutron yang dihasilkan proses fisi, sehingga populasi neutron dalam sistem terus meningkat. Kondisi ini memungkinkan

reaksi fisi berantai dapat berlangsung lama. Namun jika kondisi ini terus dibiarkan, maka reaksinya menjadi tidak terkendali, dilepaskan panas dalam jumlah besar, yang akhirnya justru membahayakan. Jadi masalah terpenting disini adalah bagaimana kondisi tetap kritis (tidak subkritis dan superkritis) itu bisa terus dipertahankan [39].

Setelah memperoleh gambaran yang cukup jelas tentang susunan kisi uranium-grafit yang memungkinkan terjadinya proses fisi berantai, sekitar Juli 1941 tim yang dipimpin Fermi mulai membangun sistem kisi uranium-moderator di Universitas Columbia, New York [40]. Di bawah pengawasan Fermi, sebuah fasilitas untuk melangsungkan reaksi nuklir selesai dibangun. Sistem berbentuk kubus grafit dengan panjang rusuk 2,4 meter itu diisi dengan tujuh ton uranium dengan komposisi diatur sedemikian rupa sehingga tersebar pada jarak yang sama di seluruh badan moderator. Sedang pada bagian bawah kisi dipasang sumber neutron jenis Ra-Be. Pada percobaan pertama, sistem kisi ternyata subkritis. Selang dua bulan kemudian, tepatnya pada September 1941, ditempat yang sama diupayakan sistem kisi dengan ukuran yang lebih besar dari ukuran semula, namun reaksi yang dihasilkannya tetap pada kondisi subkritis. Dari dua kegagalan itu, akhirnya para peneliti menyadari bahwa penyebab utama ketidakkritisan itu adalah karena ketidakmurnian bahan bakar uranium yang digunakan.

Berbekal pengalaman dua kegagalan di Universitas Columbia, para peneliti berusaha meningkatkan kemurnian uranium. Usaha ini berhasil diwujudkan pada akhir 1942, dan Fermi masih tetap pegang peran menentukan dalam proyek itu selaku penasehat ahli yang menonjol [41]. Keberhasilan itu sekaligus memastikan pembangunan sistem kisi uranium-grafit dengan mengambil tempat di Universitas Chicago pada November 1942. Karena ukuran tumpukan grafit itu sangat besar, maka penempatan fasilitas risetnya dilakukan di dalam ruangan lapangan squash yang luas dan saat itu sudah tidak digunakan, berada di bawah balkon sebelah barat Stadion Olahraga Stagg Field, Universitas Chicago.

Reaksi nuklir berantai terkendali pertama kali ditemukan oleh kelompok peneliti yang terdiri dari para fisikawan di Universitas Chicago di bawah

pimpinan Enrico Fermi pada tanggal 2 Desember 1942 jam 14.20 waktu setempat. Uji pertama ini dibiarkan berlangsung selama 28 menit dengan daya terkendali tidak lebih dari setengah Watt. Keberhasilan ini sekaligus menandai babak baru abad nuklir, karena di tempat inilah untuk pertamakalinya dalam sejarah, manusia berhasil menghadirkan reaksi nuklir berantai [39].

Karena peristiwa itu, di dinding bangunan bagian barat stadion olahraga Stagg Field Universitas Chicago, terpampang prasasti bersejarah dari bahan perunggu yang bertuliskan: *“On December 2, 1942 man achieved here the first self-sustaining chain reaction and thereby initiated the controlled release of nuclear energy”*, yang terjemahannya: “Di sini, pada 2 Desember 1942, manusia berhasil mengendalikan reaksi berantai pertama dan dengan demikian memprakarsai usaha pembebasan tenaga nuklir secara terkontrol”. Pernyataan singkat itu mengabadikan keberhasilan kelompok peneliti di Universitas Chicago, bahwa tenaga nuklir dapat dibebaskan secara terkendali [39]. Begitu besar jasa Fermi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, sehingga namanya diabadikan untuk menamai unsur kimia ke-100 dalam Tabel Periodik Unsur-Unsur, fermium (Fm).

Untuk mendapatkan proses fisi nuklir berantai tersebut, kelompok Fermi menggunakan fasilitas yang disebut tumpukan atom yang terdiri dari tumpukan balok-balok grafit. Di dalam balok grafit dipasang batang-batang uranium alam dan beberapa batang kendali yang dibuat dari bahan dasar cadmium (Cd). Penyusunan bahan bakarnya dilakukan sedemikian rupa sehingga reaksi berantai dapat berlangsung terus. Balok grafit berperan sebagai bahan moderator yang berfungsi memperlambat gerakan neutron dari cepat menjadi termik. Batang kendali Cd berperan sebagai penyerap kelebihan neutron dalam tumpukan atom [42].

Dengan mendorong batang Cd dan membenamkannya ke dalam tumpukan atom, maka jumlah neutron yang diserap cukup besar sehingga dapat menghentikan reaksi berantai yang sedang berlangsung di dalam tumpukan. Apabila sebagian batang Cd ditarik keluar dari tumpukan atom, maka proses reaksi berantai dapat ditingkatkan hingga

kondisi maksimum. Jadi kondisi reaksi berantai dapat dikendalikan atau dikontrol dengan cara membenamkan atau mengeluarkan sebagian batang kendali. Pada 12 Desember 1942, daya yang dibangkitkan dalam tumpukan atom ditingkatkan hingga mencapai 200 Watt [5].

Dalam perkembangan berikutnya, istilah tumpukan atom berganti nama dengan reaktor nuklir seperti yang kita kenal hingga saat ini [42]. Reaktor nuklir pada prinsipnya hanyalah tempat dimana reaksi nuklir yang terkendali dapat berlangsung. Dikatakan reaksi terkendali karena jumlah atom uranium yang melakukan proses fisi nuklir dapat dikendalikan dengan cara mengatur jumlah neutron yang ada dalam teras reaktor [43]. Hal ini dapat dilakukan karena dalam reaktor nuklir dilengkapi dengan komponen reaktor yang disebut batang kendali. Jika dalam teras reaktor terjadi kelebihan jumlah neutron, maka batang kendali akan menyerap kelebihan neutron tersebut. Dengan pengaturan jumlah atom yang melakukan reaksi nuklir, maka jumlah panas yang dilepaskan dari reaksi tersebut dapat dibatasi pada tingkat yang tidak membahayakan kelangsungan operasi reaktor itu sendiri.

Tumpukan Fermi dengan demikian menjadi cikal bakal lahirnya reaktor nuklir modern yang berfungsi mengendalikan produksi energi nuklir agar dapat dimanfaatkan dalam kehidupan umat manusia [44]. Tempat dimana reaksi nuklir berantai terkendali pertama berhasil diupayakan oleh para ilmuwan akhirnya dijadikan sebagai monumen sejarah oleh Dewan Kota Chicago pada 27 Oktober 1971. Dalam prasasti monumen itu ditulis: *“Physicist Enrico Fermi and his colleagues established the first self-sustaining controlled nuclear reaction in makeshift laboratories constructed under the groundstands of Stagg Field Stadium on December 2, 1942. The success of this experiment ushered in the atomic age, opening tremendous potential to modern science”*, yang terjemahannya: “Fisikawan Enrico Fermi dan para koleganya melangsungkan reaksi nuklir berantai terkendali pertama di laboratorium sementara yang dibangun di bawah balkon Stadion Olahraga Stagg Field pada 2 Desember 1942. Keberhasilan penelitian ini mengantarkan ke abad atom, membuka potensi luar biasa menuju ilmu pengetahuan modern”.

BAB 5

MENUJU PROYEK MANHATTAN

Memasuki masa awal Perang Dunia II berkecamuk sekitar akhir 1939, Leo Szilard merasakan kegelisahan dan kecemasan yang luar biasa. Kala itu Szilard menerima kabar buruk sangat mengerikan yang belum pasti kebenarannya, bahwa fihak Nazi di Jerman memiliki kemampuan untuk mengembangkan senjata nuklir. Alasan yang mendasari kecemasan Szilard itu tak lain karena ada beberapa ilmuwan Jerman yang menguasai proses fisi uranium. Tidak kuasa menahan rasa gelisah dan cemas, fisikawan yang menggeluti penelitian reaksi nuklir berantai ini akhirnya menyampaikan kegalauan hatinya kepada sahabat karibnya, Albert Einstein [33]. Dalam salah satu kesempatan pertemuan antara dua fisikawan itu, Szilard menyarankan Einstein menulis surat kepada pemerintah Amerika Serikat, saat itu presidennya adalah Franklin D. Roosevelt, yang isinya meminta agar pemerintah mengembangkan senjata nuklir berbasis uranium sebelum pemerintah Nazi di Jerman lebih dahulu membuatnya.

Surat Einstein kepada Roosevelt ditulis pada 2 Agustus 1939. Dalam surat itu Einstein menyinggung situasi perkembangan penelitian di bidang ketenaganukliran yang terjadi selama empat bulan terakhir sebelum surat ditulis. Penemuan penting tentang reaksi nuklir baik oleh Frederick Joliot-Curie di Perancis maupun Enrico Fermi dan Leo Szilard di Amerika Serikat, dinilai Einstein dapat dimanfaatkan untuk melangsungkan reaksi nuklir berantai pada sebuah massa besar uranium dalam waktu tidak lama lagi. Karena dapat melepaskan energi dalam jumlah sangat besar, perkembangan terbaru itu akan mengarah pada pembuatan senjata nuklir [38].

Saat itu Einstein sudah membayangkan, meski belum yakin benar, bahwa bom jenis baru dengan kekuatan maha dahsyat dapat segera diwujudkan. Ditekankan pula dalam suratnya, bom tunggal jenis baru ini apabila dibawa dengan perahu dan diledakkan di sebuah pelabuhan, maka seluruh pelabuhan beserta beberapa wilayah sekitarnya akan hancur. Tidak lupa Einstein mengingatkan pemerintah bahwa uranium sebagai bahan dasar

untuk membuat bom tersebut terlalu berat untuk transportasi melalui udara, sementara Amerika Serikat memiliki tidak banyak bijih uranium dengan kualitas buruk. Ada beberapa bijih uranium dengan kualitas baik dapat diperoleh dari Canada dan bekas Chekoslovakia, sedang sumber uranium yang paling utama adalah Kongo Belgia. Hal lain yang dikemukakan Einstein dalam suratnya adalah bahwa Jerman telah benar-benar menghentikan penjualan uranium dari tambang Chekoslovakia yang telah diambil alih [37].

Einstein juga menekankan perlunya kontak permanen antara bagian Administrasi Kepresidenan dengan kelompok fisikawan yang bekerja pada bagian reaksi nuklir berantai di Amerika Serikat. Karena itu, perlu adanya orang kepercayaan yang dapat menangani segala kebutuhan berkaitan dengan riset reaksi nuklir, dengan salah satu tugasnya adalah memberi perhatian khusus terhadap masalah pengamanan pasokan bijih uranium untuk kepentingan dalam negeri. Sedang untuk mempercepat kegiatan penelitian yang saat itu sedang dilakukan dengan anggaran dana laboratorium universitas yang jumlahnya terbatas, perlu dilakukan penambahan dana dari personil yang bersedia memberikan kontribusinya dalam kegiatan ini. Perlu juga penjajagan kemungkinan kerjasama dengan laboratorium industri yang memiliki peralatan sesuai dengan kebutuhan [38].

Begitu meyakinkan isi surat Einstein, maka dibentuklah Komite Penasehat Uranium yang melakukan pertemuan untuk pertama kalinya pada 21 Oktober 1939. Komite tersebut dipimpin oleh Direktur Biro Standar Nasional Amerika Serikat, Lyman James Briggs, sehingga terkenal dengan sebutan *Briggs Committee*. Sehari sebelum Jepang menyerang pusat angkatan laut Amerika Serikat di Pearl Harbour, Hawaii, pada 6 Desember 1941, Presiden Roosevelt memutuskan untuk memulai proyek pembuatan senjata nuklir pertama di dunia dan menugaskan kepada para ilmuwan untuk mewujudkan proyek tersebut [32].

Dianggap tidak serius dalam melakukan pengembangan senjata nuklir, kegiatan penelitian *Briggs Committee* diambil alih oleh Komite Penelitian Pertahanan Nasional dan Kantor Penelitian dan Pengembangan Ilmiah. Terakhir, kegiatan penelitian tersebut diambil alih oleh *Manhattan Engineering District* (MED) yang dibentuk oleh Presiden Roosevelt pada September 1942.

Proyek ini juga mendapat dukungan dari Inggris dan Canada dalam kurun 1942 sampai dengan 1946, untuk program pengembangan senjata nuklir skala besar di bawah arahan Mayor Jenderal Leslie R. Groves. Kegiatan inilah yang akhirnya melahirkan proyek sangat rahasia dengan kode *Manhattan District* di laboratorium terpencil di Los Alamos, New Mexico. Sebagai penanggungjawab proyek, Jenderal Groves akhirnya menunjuk fisikawan teoritis kenamaan Amerika Serikat, J. Robert Oppenheimer (1904-1967), dari Universitas California, Berkeley, sebagai direkturnya [39].

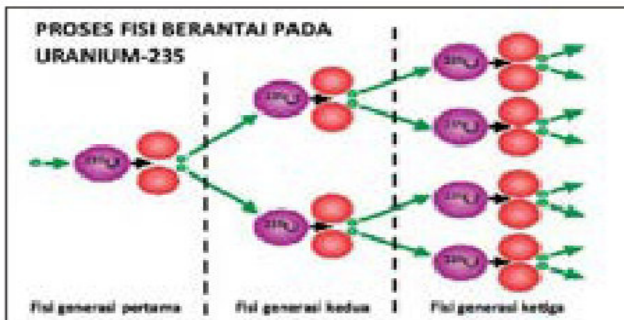
Oppenheimer selanjutnya membentuk suatu tim yang melibatkan fisikawan tangguh seperti Enrico Fermi, Leo Szilard, John Wheeler, Arthur Compton, Walter Zin, Hans Bethe, Eugene Wigner, Edward Teller dan Richard P. Feynman. Belakangan bergabung pula dua fisikawan lain yang sebelumnya bermukim di Inggris dalam rangka menghindari tekanan tentara Nazi-Jerman yang menduduki Denmark pada 1943, yaitu Niels Bohr dan Otto Frisch. Selama empat tahun, tim Oppenheimer bekerja merekayasa senjata nuklir dengan dukungan ribuan karyawan dan dana tak terbatas [39]. Sampai disini, Szilard masih tetap merasakan kegelisahan. Ia tidak tahu siapa yang bakal berhasil menghadirkan senjata nuklir pertama kali di dunia ini, Nazi di Jerman atau Tim Oppenheimer di Amerika Serikat. Hasil akhirnya, ternyata Amerika Serikat lebih dulu berhasil menghadirkan dan memiliki senjata nuklir, sementara Nazi-Jerman ternyata tidak memiliki kemampuan untuk mengembangkan senjata tersebut [33].

Keberhasilan para ilmuwan di Universitas Chicago di bawah kepemimpinan Enrico Fermi dalam menghasilkan reaksi nuklir berantai terkendali pertama di dunia pada 2 Desember 1942 telah memberi harapan besar dalam mewujudkan ambisi pemerintah Amerika Serikat untuk memiliki senjata nuklir. Proyek pembuatan senjata nuklir yang dipimpin oleh Oppenheimer tadi dalam perkembangan berikutnya lebih sering dikenal sebagai Proyek Manhattan. Pada 1943, Presiden Roosevelt menunjuk Einstein sebagai penasihat khusus untuk pembuatan senjata berdaya ledak tinggi di Angkatan Laut Amerika Serikat.

5.1. Fisi Berantai Terkendali

Fenomena reaksi berantai dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada awalnya sebuah neutron menumbuk inti uranium-235 sehingga memicu reaksi yang menghasilkan pasangan produk fisi, pelepasan sejumlah energi serta pancaran 2-3 buah neutron cepat. Reaksi ini dikatakan sebagai reaksi fisi generasi pertama. Salah satu dari neutron hasil reaksi fisi generasi pertama itu kemudian menumbuk inti uranium-235 lainnya dan memicu reaksi fisi berikutnya dengan hasil sama seperti reaksi generasi pertama. Reaksi ini dikatakan sebagai reaksi fisi generasi kedua. Neutron hasil reaksi fisi generasi kedua ini diharapkan akan menimbulkan reaksi fisi berikutnya dengan produk fisinya sama seperti reaksi generasi pertama dan kedua. Reaksi ini dikatakan sebagai reaksi fisi generasi ketiga, demikian seterusnya akan berlangsung reaksi fisi dari generasi ke generasi berikutnya secara kontinu seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1 [41].

Fenomena reaksi fisi berantai terkendali memiliki peran sangat penting dalam mewujudkan pemanfaatan energi nuklir. Terputusnya kontinuitas reaksi fisi akan menyebabkan berhentinya produksi energi, dan ini merupakan suatu kondisi yang tentunya tidak diinginkan. Namun dalam prakteknya, reaksi fisi berantai pada inti atom uranium ternyata tidak akan berlangsung dengan begitu saja. Ada beberapa hambatan dan persyaratan teknis yang harus dipenuhi. Salah satu persyaratan itu adalah kecepatan atau energi kinetik neutron yang menumbuk uranium-235. Neutron dengan kecepatan rendah (energi kinetiknya rendah) mempunyai probabilitas yang lebih tinggi untuk menimbulkan reaksi fisi pada uranium dibandingkan neutron dengan energi kinetik yang lebih tinggi [37].



Gambar 5.1. Skema proses fisi berantai [17]

Masalah utama yang timbul dalam pemanfaatan neutron untuk melangsungkan reaksi nuklir berantai adalah neutron yang dilepaskan dari proses fisi ternyata masih berenergi tinggi. Oleh sebab itu, para ilmuwan berusaha untuk memperlambat gerakan neutron agar berubah menjadi neutron berenergi termik sehingga dapat dipakai untuk melangsungkan reaksi fisi berikutnya. Satu-satunya jalan yang harus ditempuh adalah mengurangi sebagian besar energi neutron cepat (berkisar antara 2-3 MeV) agar berubah menjadi neutron termik dengan energi 0,025 eV. Energi neutron cepat itu dapat dikurangi melalui tumbukan dengan bahan-bahan bernomor atom ringan seperti grafit, berilium atau deuterium. Bahan yang mampu memperlambat gerakan neutron ini disebut sebagai bahan moderator. Neutron yang sudah diperlambat kecepatannya inilah yang dapat digunakan untuk melangsungkan reaksi fisi berantai dari generasi ke generasi berikutnya [39].

Masalah lain yang dihadapi para ilmuwan setelah berhasil mendapatkan reaksi berantai adalah dilepaskannya energi panas dalam jumlah besar. Hal ini dapat terjadi mengingat setiap kali berlangsung proses fisi nuklir selalu dilepaskan dua hingga tiga buah neutron baru yang semuanya bisa dipakai untuk melangsungkan proses fisi nuklir berikutnya. Semakin banyak proses fisi nuklir akan semakin banyak neutron yang dilepaskan sehingga akan semakin banyak pula reaksi nuklir yang terjadi, demikian seterusnya.

Karena setiap proses fisi nuklir selalu disertai pelepasan sejumlah energi dalam bentuk panas, maka semakin banyak reaksi yang terjadi, akan semakin besar pula panas yang dilepaskannya. Jika hal ini terjadi, maka reaksi nuklir jenis ini disebut sebagai reaksi nuklir tak terkendali [35].

Setelah menyadari adanya potensi bahaya dari reaksi berantai tak terkendali tersebut, upaya manusia selanjutnya ditujukan untuk membatasi jumlah reaksi nuklir yang terjadi sehingga tidak menjurus ke arah terjadinya reaksi nuklir yang membahayakan. Satu-satunya cara yang dapat ditempuh adalah dengan menyerap sebagian kelebihan neutron yang dipancarkan dari proses fisi nuklir. Jika setiap proses fisi dilepaskan dua hingga tiga buah neutron baru, sedang neutron yang diperlukan untuk melangsungkan proses fisi berikutnya hanya satu buah, maka ada kelebihan satu hingga dua buah neutron yang harus diserap. Dengan adanya penyerapan kelebihan neutron ini, maka reaksi berantai yang terjadi bersifat terkendali. Satu buah neutron termik dalam reaktor nuklir akan menimbulkan reaksi fisi uranium-235 yang menghasilkan energi panas sekitar 200 MeV (energi ini setara dengan $8,9 \times 10^{-18}$ kWh). Apabila dari generasi ke generasi jumlah neutron termik dapat dikendalikan pada level energi yang dibutuhkan, maka upaya pengendalian reaksi fisi dapat direalisasikan [40].

Empat tahun sebelum reaksi fisi ditemukan, tepatnya pada 1935, kimiawan Kanada Arthur Dempster (1866-1950) ketika bekerja di Universitas Chicago, Amerika Serikat, menemukan bahwa uranium alam ternyata membentuk tiga jenis isotop dengan kelimpahan yang berbeda-beda [19]. Isotop adalah unsur dengan nomor atom (Z) sama namun nomor massa (A) berbeda. Perbedaan massa inti dari isotop tersebut disebabkan karena perbedaan jumlah kandungan neutron ($N = A - Z$) di dalam masing-masing intinya. Ketiga isotop uranium tersebut adalah uranium-238 atau ${}_{92}^{238}\text{U}$ ($N = 146$ dengan kelimpahan 99,28 persen), uranium-235 atau ${}_{92}^{235}\text{U}$ ($N = 143$ dengan kelimpahan 0,714 persen) dan uranium-234 atau ${}_{92}^{234}\text{U}$ ($N = 142$ dengan kelimpahan 0,006 persen). Ini berarti dalam uranium alam dengan jumlah atom 1000 buah, maka hanya terdapat 7 buah bahan fisil U-235 dan selebihnya sebanyak 993 buah atom adalah isotop U-238.

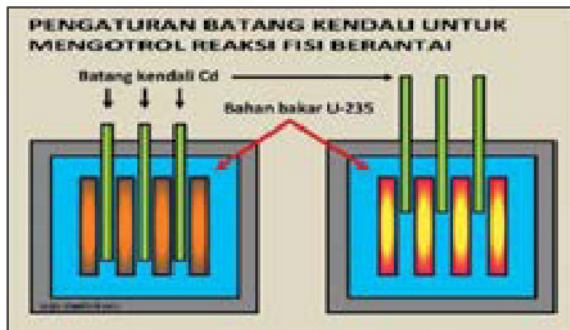
Dalam prakteknya, isotop uranium yang dapat melakukan reaksi fisi hanyalah U-235, sedang keberadaan isotop U-238 yang kadarnya sangat besar itu dapat menangkap atau menyerap neutron [44]. Jika jumlah penyerapan neutron oleh U-238 ternyata lebih besar dibandingkan jumlah neutron yang dilepaskan dari proses fisi U-235, maka keberadaan isotop U-238 dapat mengganggu jalannya reaksi fisi berantai. Di dalam reaktor nuklir, reaksi fisi diharapkan akan berlangsung secara kontinyu dan terkendali. Yang dimaksud dengan terkendali dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan dengan mantap dan stabil sesuai dengan kebutuhan energi. Sesungguhnya, mengupayakan agar reaksi fisi terjadi secara terus-menerus dan berkelanjutan tidaklah mudah. Terutama jika reaksi fisi kontinyu tersebut harus terjadi dalam uranium alam.

Tidak semua neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi dapat mencapai inti U-235 dan menimbulkan reaksi fisi berikutnya. Sebagian besar neutron akan tertangkap U-238 sebelum mencapai inti U-235. Neutron mungkin dapat saja mencapai isotop U-235, tetapi karena tidak melewati proses moderasi, kecepatan atau energi geraknya masih tinggi, sehingga tampang lintang fisinya kecil. Karena itu, probabilitas terjadinya tumbukan yang akan menghasilkan reaksi fisi juga kecil, bahkan mungkin sama sekali tidak menimbulkan reaksi fisi. Untuk menghindari efek penyerapan neutron ini, dalam penggunaan bahan bakar uranium harus dilakukan pengayaan, yaitu peningkatan kadar U-235 dalam bahan bakar hingga mencapai kadar yang lebih tinggi dibandingkan kadarnya dalam uranium alam [44].

Cara yang digunakan untuk mengendalikan reaksi fisi kontinyu pada uranium alam adalah dengan memoderasi neutron hingga kecepatannya sangat rendah. Dengan demikian tampang lintang fisi U-235 mempunyai nilai yang jauh lebih tinggi dari tampang lintang tangkapan U-238. Jika kondisi ini terpenuhi, hampir semua neutron yang ada tidak akan mudah tertangkap oleh U-238, tetapi menunggu kesempatan untuk bertemu dan bertumbukan dengan U-235 untuk menghasilkan reaksi fisi [36]. Metode lain untuk mengendalikan reaksi fisi kontinyu adalah dengan menaikkan kandungan U-235 dalam uranium alam dan memperlambat

gerak neutron pada suatu tingkat kecepatan yang sesuai. Dalam teras reaktor nuklir tipe tertentu, kandungan isotop U-235 diperkaya antara 3% hingga 5% dan sisanya 95% hingga 97% adalah U-238. Struktur geometri dan komposisi bahan bakar serta moderator diatur sedemikian rupa sehingga reaksi fisi berantai dapat berlangsung secara kontinyu.

Setelah persoalan menjaga kontinuitas reaksi fisi dalam teras reaktor nuklir terselesaikan, persoalan berikutnya adalah mengatur agar jumlah energi yang dihasilkan dari reaksi fisi tetap kontinyu. Bertambahnya jumlah reaksi fisi akan menaikkan produksi energi dalam teras reaktor, dan kondisi ini harus bisa dikendalikan agar tidak terjadi kenaikan produksi energi yang liar tak terkendali. Jumlah neutron dalam teras reaktor akan sebanding dengan jumlah reaksi fisi. Sedang jumlah reaksi fisi sebanding dengan jumlah energi yang dihasilkan. Jadi dengan mengendalikan populasi neutron dalam teras reaktor nuklir, maka hal itu sama saja dengan mengendalikan energi atau daya reaktor. Untuk mengendalikan populasi neutron dalam teras reaktor agar jumlahnya sesuai dengan daya yang diinginkan, dapat digunakan material yang mempunyai daya serap neutron tinggi, atau material yang mempunyai tampang lintang serapan neutron tinggi. Dalam teknologi reaktor, komponen penyerap neutron ini disebut batang kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2 [39].



Gambar 5.2. Batang kendali untuk mengontrol proses fisi berantai dalam teras reaktor nuklir [16]

Dengan menempatkan batang kendali di sekitar bahan bakar uranium, maka sebagian neutron akan terserap dan populasi neutron akan turun. Jumlah penyerapan neutron di dalam teras dapat dilakukan dengan meningkatkan volume pemasukan batang kendali. Biasanya bahan yang baik dalam menyerap neutron terbuat dari perak, indium atau cadmium dalam bentuk padat. Dengan memasukkan atau mengeluarkan batang kendali ke dan dari dalam teras, populasi neutron maupun daya reaktor dapat dikendalikan. Bahan yang banyak digunakan untuk pembuatan batang kendalai saat ini adalah cadmium (Cd).

5.2. Produksi Plutonium

Selain mencatat prestasi gemilang karena mampu mengantarkan ke arah tercapainya fisi berantai terkendali pertama di dunia pada 2 Desember 1942, tumpukan atom di Universitas Chicago yang layaknya berperan sebagai reaktor nuklir pertama di dunia, selain menarik secara akademis juga memberikan pengetahuan baru yang sangat berharga [45]. Keberadaan isotop U-238 dalam uranium alam yang dipakai sebagai bahan bakar nuklir pada tumpukan atom tersebut ternyata menghasilkan sesuatu yang sangat penting bagi perkembangan teknologi nuklir berikutnya. Isotop U-238 ternyata tidak dapat berperan sebagai bahan bakar fisi. Apabila menyerap neutron, inti atom U-238 tidak melakukan reaksi belah inti. Neutron yang diserap akan masuk dan tinggal menetap di dalamnya sehingga inti itu berubah menjadi inti atom isotop baru U-239.

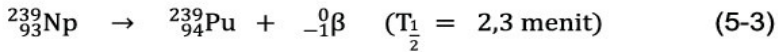
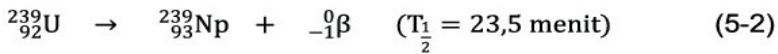
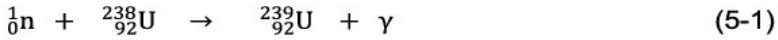
Dalam perjalanan berikutnya, masuknya sebuah neutron ke dalam inti U-238 ternyata dapat mengganggu kestabilan inti atom baru yang dihasilkannya. Semula, U-238 merupakan inti berat yang bersifat radioaktif dengan umur paro 4,5 milyar tahun. Umur paro ($T_{1/2}$) adalah waktu yang diperlukan oleh suatu inti atom radioaktif untuk meluruh (berubah menjadi inti atom lainnya yang lebih stabil) sehingga jumlah intinya tinggal setengah dari jumlah semula. Setelah menyerap neutron dan berubah menjadi inti U-239, umur paro intinya menjadi 23,5 menit. Artinya, inti atom U-239 menjadi jauh lebih aktif melakukan peluruhan dibandingkan inti atom U-238.

Karena bersifat radioaktif dengan waktu paro sangat pendek, inti U-239 segera meluruh menghasilkan inti atom baru berupa neptunium-239 (Np-239) disertai dengan pelepasan satu buah elektron atau pancaran radiasi beta negatif (β^-) dari dalam intinya. Inti baru hasil peluruhan, Np-239, ternyata juga bersifat radioaktif dengan umur paro 2,3 hari. Karena itu, inti Np-239 juga akan meluruh menjadi inti atom baru lainnya berupa plutonium-239 (Pu-239) disertai dengan pemancaran sebuah elektron dari inti. Hasil akhir berupa inti Pu-239 itu memberi manfaat yang sangat besar, karena inti itu ternyata dapat melakukan reaksi belah inti sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar nuklir baru [46].

Terlihat bahwa dari penembakan neutron terhadap inti atom U-238 dihasilkan dua jenis inti atom baru dengan Z lebih besar dari Z uranium. Dalam teknologi nuklir, proses perubahan inti atom U-238 menjadi inti atom Pu-239 itu disebut proses pembiakan. Perubahan inti atom tersebut juga akan disertai perubahan nomor atom (Z), masing-masing 92 untuk inti U-238 dan U-239, menjadi $Z = 93$ untuk Np-239 dan $Z = 94$ untuk Pu-239. Atom-atom dengan Z lebih besar dari 92 ini dikenal sebagai unsur transurium yang kehadirannya sudah diduga sebelumnya oleh Fermi pada 1935 [5]. Penangkapan neutron dan pemancaran radiasi beta negatif dari inti atom juga akan disertai perubahan jumlah neutron (N) di dalam inti, masing-masing adalah $N = 146$ untuk U-238, menjadi $N = 147$ untuk U-239, $N = 146$ untuk Np-239, dan $N = 145$ untuk Pu-239.

Plutonium memiliki nomor atom dan nomor massa yang berbeda dengan uranium. Keduanya juga memiliki sifat fisika dan kimia yang berbeda, sehingga antara keduanya cukup mudah dipisahkan dengan proses kimia biasa. Sebelumnya, para ilmuwan tidak akan pernah dapat menemukan unsur yang bernama plutonium karena unsur itu memang tidak pernah terbentuk secara alamiah. Keberhasilan membiakkan U-238 menjadi Pu-239 itu sekaligus merupakan prestasi besar umat manusia dimana para fisikawan berhasil mewujudkan mimpinya, yaitu menghadirkan unsur baru dengan cara mengubah suatu unsur menjadi unsur lain yang sama sekali berbeda baik sifat fisika maupun kimianya [46]. Karena dapat melakukan proses fisi, maka Pu-239 disebut bahan

fisil, sedang bahan non-fisil yang dapat diubah menjadi bahan fisil seperti U-238 disebut sebagai bahan fertil. Dalam fisika nuklir, proses perubahan U-238 menjadi Pu-239 tadi dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut :

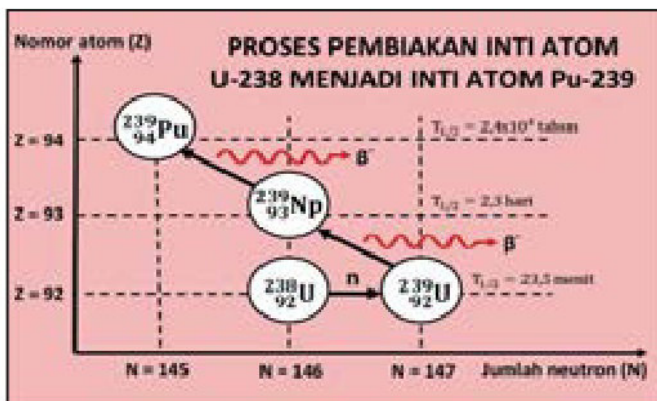


Atom Pu-239 memiliki sifat keradioaktifan yang sama seperti uranium maupun thorium. Perbedaannya, plutonium terbentuk karena adanya intervensi manusia sehingga dikategorikan sebagai unsur radioaktif buatan, sedang uranium dan thorium merupakan dua jenis unsur radioaktif yang mula-mula dikenal manusia dan ditemukan di alam, sehingga dikenal sebagai unsur radioaktif alamiah. Kemampuan Pu-239 dalam menyerap neutron ternyata lebih baik dibandingkan inti U-235, sehingga Pu-239 lebih mudah mengalami proses fisi daripada U-235. Untuk melangsungkan reaksi fisi berantai dengan Pu-239 diperlukan neutron dengan jumlah lebih sedikit. Karena sifatnya itu, dalam perkembangan berikutnya unsur ini lebih disukai dan banyak dipakai sebagai bahan peledak untuk bom nuklir [46]. Peluruhan inti atom Pu-239 melalui pemancaran radiasi alfa akan mengembalikan inti itu ke U-235 dengan persamaan reaksi nuklirnya sebagai berikut :



Setelah para ilmuwan yakin bahwa plutonium dapat dihasilkan pada saat proses fisi yang berlangsung dalam tumpukan grafit seperti yang dilangsungkan di Chicago atau reaktor nuklir pada umumnya, dan bisa dipisahkan dari uranium melalui proses kimia, para fisikawan dengan dukungan penuh pemerintah Amerika Serikat selanjutnya membangun fasilitas reaktor nuklir baru berupa tumpukan uranium-grafit di Clinton, Tennessee [45]. Fasilitas dengan ukuran lebih besar dibandingkan dengan yang pernah dibangun sebelumnya di Chicago ini mulai beroperasi pada November 1943. Fasilitas untuk melangsungkan reaksi

nuklir berantai terkendali itu juga dilengkapi dengan dinding beton tebal untuk melindungi para pekerjanya dari paparan radiasi neutron yang membahayakan kesehatan. Hingga Maret 1944, fasilitas baru itu berhasil memproduksi beberapa gram plutonium murni yang kemudian terus ditingkatkan kapasitas produksinya untuk mendukung program pembuatan bom atom.



Gambar 5.3: Proses pembiakan plutonium-239 [12]

5.3. Fisi Tak Terkendali

Reaksi fisi berantai dapat dilangsungkan dalam waktu sangat cepat dengan pelipat gandaan jumlah inti yang bereaksi sangat tinggi. Melalui cara ini pembangkitan energi meningkat sangat besar dalam waktu sangat singkat. Hasilnya adalah sebuah ledakan nuklir yang maha dahsyat. Jika reaksi jenis ini yang terjadi, maka reaksinya dikategorikan sebagai reaksi fisi berantai tak terkendali. Pada ledakan senjata nuklir, reaksinya memang sengaja tidak dikendalikan. Karena setiap proses fisi diikuti oleh pelepasan sejumlah energi, maka semakin banyak proses fisi yang berlangsung akan semakin besar energi yang dilepaskan sehingga semakin besar pula daya rusak dari senjata nuklir tersebut.

Arah perkembangan teknologi nuklir berikutnya tak terlepas dari situasi politik dunia pada era tahun 1940-an. Terungkapnya rahasia alam dalam bentuk ledakan maha dahsyat yang dapat dihasilkan dari proses fisi nuklir berantai itu ternyata bertepatan waktunya dengan berkecamuknya Perang Dunia II. Kala itu, berbagai negara sedang giat mengembangkan jenis senjata baru dengan daya hancur yang lebih besar. Penemuan reaksi nuklir yang mampu membebaskan energi dalam jumlah sangat besar begitu menarik kalangan militer untuk dimanfaatkan dalam persenjataan. Karena itu, militer Amerika Serikat akhirnya tertarik dengan penemuan dan memberikan perhatian serius pada masalah itu [47].

Mewujudkan suatu ledakan nuklir dengan U-235 tidaklah mudah. Salah satu syaratnya adalah harus dilakukan upaya ketersediaan dan peningkatan jumlah neutron dengan energi kinetik yang cocok dalam jumlah besar dalam waktu sangat singkat. Untuk melangsungkan reaksi nuklir berantai baik dengan U-235 maupun Pu-239 diperlukan suatu jumlah minimal bahan yang dapat melakukan pembelahan inti. Jumlah minimal bahan yang harus tersedia ini disebut massa kritis. Untuk U-235 massa kritisnya kira-kira satu kg. Jadi kalau massa U-235 kurang dari massa kritisnya, maka reaksi berantai tidak akan terjadi. Hal lain yang harus dipenuhi adalah volume bahan bakar harus kompak, artinya memiliki volume maksimum dengan luas permukaan minimum. Namun ketika bom atomnya hendak direkayasa, bentuk ini sulit direalisasikan mengingat perhitungan yang kurang tepat dapat berakibat fatal [45].

Untuk mengatasi masalah teknis itu, para ilmuwan mendapatkan salah satu kemungkinan pemecahannya adalah dengan cara menempatkan dua bagian bahan bakar nuklir U-235 berbentuk setengah bola dalam selubung silinder tebal yang sangat kuat. Kedua bagian bahan bakar nuklir itu didesain masing-masing memiliki massa di bawah massa kritisnya (subkritis). Namun massanya juga harus diperhitungkan sedemikian rupa sehingga apabila kedua bahan bakar nuklir itu menyatu, massa totalnya akan mencapai di atas masa kritis (superkritis) yang memungkinkan berlangsungnya reaksi fisi berantai dengan ledakan besar. Sebelum peledakan, keduanya juga harus dipisahkan dengan

jarak sejauh mungkin agar tidak menyatu yang menyebabkan massa keduanya mencapai superkritis untuk menghindari berlangsungnya reaksi nuklir berantai. Agar terjadi ledakan besar, kedua bahan bakar tadi harus dapat digabungkan dalam waktu yang sangat cepat [45].

Dalam rangka mengembangkan dan menyempurnakan sistem disain senjata nuklir, perlu dilakukan berbagai macam uji coba lapangan untuk mengetahui kelebihan maupun kelemahan dari desain senjata yang telah dibuat. Karena ledakan nuklir tidak mungkin terjadi untuk massa yang lebih kecil dari pada massa kritisnya, maka eksperimen pendahuluan dalam skala kecil tidak mungkin dilakukan [5].

Pada Juli 1945, proyek Manhattan berhasil membuat bom berbahan bakar plutonium (Pu). Uji coba senjata nuklir pertama kali dilakukan oleh Amerika Serikat pada 16 Juli 1945 di gurun pasir Alamogordo, negara bagian New Mexico, dengan nama sandi *Trinity Test*. Titik ledakan dipilih berada di puncak sebuah menara pada ketinggian sekitar 30 meter di atas permukaan tanah, sedangkan para ilmuwan dan pengamat lain dari kalangan politisi dan militer berada pada jarak beberapa kilometer dari menara. Ledakan bom nuklir pertamakali di dunia itu berlangsung pada pukul 5.30 pagi waktu setempat. Daya ledaknya setara dengan 20.000 ton bom TNT (*tri-nitro-toluena*) dengan suhu di pusat ledakan mencapai angka 10 juta derajat Celsius. Kedahsyatan ledakan bom nuklir ini ternyata sangat mengagumkan, tak tertandingi oleh bom apapun yang pernah dibuat manusia sebelumnya [45].



Gambar 5.4: Penggabungan bahan bakar nuklir untuk menghasilkan massa kritis [4]

Untuk meningkatkan unjuk kerja bom nuklir, percobaan-percobaan ledakan lainnya pun segera menyusul setelah sukses uji coba ledakan yang pertama. Salah satu uji coba senjata nuklir yang dilakukan oleh Amerika Serikat mampu menghasilkan semburan bola api dengan diameter lebih dari 4,8 km serta awan cendawan raksasa yang dengan cepatnya naik ke atas mencapai atmosfer tinggi. Beberapa runtuhnya bom nuklir dalam bentuk debu radioaktif teramati jatuh pada perahu nelayan Jepang *Lucky Dragon* yang berada pada jarak 160 km dari tempat percobaan. Sejak saat itu, manusia mulai menyadari kedahsyatan dari senjata nuklir [45].

Keberhasilan uji coba peledakan bom nuklir ini akhirnya mendorong diproduksinya berbagai jenis bom untuk tujuan militer. Setelah Jepang menyerang pusat pangkalan angkatan laut Amerika Serikat di Pearl Harbour pada Desember 1941, Amerika Serikat langsung menyatakan perang dengan Jepang sehingga terlibat langsung dalam Perang Dunia II. Karena sedang berkecamuk Perang Dunia II, perkembangan teknologi nuklir mengarah kepada pembuatan senjata nuklir untuk mendukung kekuatan militer dalam perang. Pihak militer di Amerika Serikat mendorong dan mendukung para fisikawan agar terlibat dalam suatu proyek untuk merealisasikan pembuatan bom atom yang dimulai pada awal 1943. Bagi pihak Amerika Serikat, kepemilikan senjata nuklir sangat diperlukan untuk mematahkan perlawanan tentara Jepang [46].

Dalam upaya mengakhiri Perang Dunia II, Inggris, Republik China dan Amerika Serikat menyerukan Jepang untuk menyerah dalam deklarasi Posdam pada 26 Juli 1945. Namun Jepang ternyata mengabaikan seruan damai tersebut. Sebagai jawaban terhadap penolakan Jepang, Amerika Serikat menjatuhkan bom atom dengan nama sandi *Little Boy* di kota Hiroshima pada 6 Agustus. Diberi nama *Little Boy* atau Si Kecil karena ukuran bom dengan bahan bakar U-235 itu hanya sepanjang tiga meter dengan garis lingkaran 70 cm. Bom dengan berat empat ton itu dibawa dengan pesawat tempur B-29 Enola Gay yang dipiloti oleh Kapten William S. Parson [46].

Selang 43 detik dari saat dilepaskan pesawat tempur, bom meledak dan membakar kota Hiroshima dengan suhu di pusat ledakan mencapai 300.000 derajat Celsius. Hanya dalam waktu 0,1 detik setelah meledak, gelombang panas dengan kecepatan 4,5 km per detik atau setara dengan 16.200 km per jam sudah meluluhlantakkan sebagian besar bangunan beserta penduduk kota Hiroshima. Ledakan bom yang melepaskan energi dalam bentuk panas sebesar 20 trilyun kalori itu menewaskan antara 90 ribu hingga 166 ribu penduduk kota Hiroshima, sekitar 75.000 orang di antaranya tewas seketika, sedang sisanya tewas beberapa saat setelah ledakan dalam hitungan menit, jam, hari, bulan dan tahun [32]. Bom nuklir jenis fisi seperti yang memporakporandakan Hiroshima itu dikenal juga sebagai bom nuklir generasi pertama. Ledakan bom nuklir jenis fisi akan melepaskan energi berupa empasan tekanan tinggi udara (50%), bahang bersuhu tinggi (35%), radiasi gamma dan neutron (5%) serta debu-debu radioaktif yang berbahaya (10%).

Di Hiroshima, terdapat monumen perdamaian Sadako yang tak lain adalah makam bocah perempuan bernama Sadako. Ia meninggal beberapa tahun setelah tragedi Hiroshima pada usia sembilan tahun akibat menderita kanker dari paparan radiasi nuklir. Monumen itu menjadi simbol keganasan radiasi nuklir di Hiroshima yang terus memakan korban jiwa dalam waktu lama. Inilah yang membedakan antara senjata nuklir dengan senjata konvensional lainnya. Senjata nuklir, disamping memusnahkan sasaran pada suatu kawasan sangat luas dalam waktu sekejap, juga meninggalkan residu kontaminasi radioaktif yang memancarkan radiasi dalam jangka waktu sangat lama dan berbahaya bagi kesehatan. Radiasi itu secara pelan tapi pasti akan meminta korban jiwa, baik melalui efek langsung karena korban mendapatkan paparan radiasi dosis tinggi, maupun efek tertunda karena kanker yang diderita seseorang akibat paparan radiasi dosis rendah [31].

Tiga hari setelah tragedi Hiroshima, disusul bom atom berikutnya yang diberi nama sandi *Fat Man* dengan bahan bakar Pu-239 dijatuhkan tentara Amerika Serikat di kota Nagasaki pada 9 Agustus 1945. Seperti halnya kota Hiroshima, kota Nagasaki pun hancur lebur. Akibat pemboman tersebut, 60 ribu hingga 80 ribu penduduk kota Nagasaki

juga tewas. Setengah dari jumlah korban jiwa meninggal pada hari pertama pasca ledakan. Sisanya, kematian penduduk atau warga sipil terjadi pada beberapa bulan paca ledakan karena mengalami luka bakar, efek paparan radiasi dan cedera lainnya. Ledakan dua bom Amerika Serikat di dua kota Jepang tersebut akhirnya mengakhiri berkecamuknya Perang Dunia II, yang menurut EH. Towsend, telah meminta korban kematian sebanyak lebih dari 35,5 juta jiwa dan menelan biaya sekitar 30 juta milyar Poundsterling. Selain meluluhlantakkan mesin perang, tentara Jepang juga kehilangan semangat untuk meneruskan peperangan. Jepang terpaksa menyerah tanpa syarat kepada Sekutu yang diumumkan pada 15 Agustus 1945. Setelah itu, secara resmi Perang Dunia II berakhir [47].

BAB 6

MEMUPUS ANCAMAN PERANG NUKLIR

Albert Einstein merupakan salah satu dari beberapa ilmuwan generasi pertama yang percaya dan menyadari kedahsyatan daya penghancur yang dapat dilepaskan dari pembelahan inti atom. Begitu dahsyatnya ledakan senjata nuklir itu, sehingga dapat memusnahkan segala bentuk kehidupan di muka bumi. Kalau bukan karena kekejaman dan teror kaum Nazi di Jerman, mungkin Einstein tidak akan pernah menyarankan kepada pemerintah Amerika Serikat untuk mengembangkan senjata nuklir. Namun karena keterlanjuran itu, sampai akhir hayat, Einstein harus menjalani hidup dalam penyesalan. Beliau merasa bersalah karena pernah mengusulkan pembuatan senjata nuklir kepada Presiden Amerika Serikat Franklin D. Roosevelt [33].

Belakangan Einstein menyatakan bahwa seandainya beliau tahu fihak Nazi di Jerman tidak mampu membuat senjata nuklir, tentu beliau tidak akan pernah membujuk dan membantu Pemerintah Amerika Serikat untuk mengembangkan senjata tersebut. Einstein memang dikenal sebagai penganut faham pasifisme yang sikapnya cenderung anti perang dan kekerasan. Karena sikapnya itu, pada 1941 fihak *Manhattan Engineering District* menolak keterlibatannya dalam program pengembangan senjata nuklir dengan pertimbangan risiko keamanan. Keberadaan Einstein dalam proyek yang sangat dirahasiakan itu dikhawatirkan dapat mengakses informasi apapun terkait dengan pekerjaan dan pengembangan senjata nuklir [33].

Meskipun Einstein tidak berperan langsung dalam pengambilan keputusan untuk menjatuhkan bom atom di Hiroshima dan Nagasaki pada Agustus 1945, beliau mengaku menyesal karena telah menyurati Presiden Amerika yang berujung pada pengembangan senjata nuklir dan peledakannya terhadap warga sipil [38]. Karena itu, segera setelah Perang Dunia II berakhir, Einstein langsung kembali ke impian semula untuk menciptakan masyarakat dunia yang damai. Dengan gigih beliau melakukan kampanye untuk melucuti seluruh senjata nuklir, di manapun barang itu berada dan diproduksi. Tanpa membebaskan dunia dari senjata nuklir, Einstein takut kalau berakhirnya

Perang Dunia II pasca Agustus 1945 ternyata tidak menciptakan perdamaian dunia yang abadi.

Dua kali pengalaman pahit dirasakan Einstein dalam hidupnya, yaitu ketika menyaksikan berkecamuknya Perang Dunia I dan II dengan kematian dan penderitaan yang mengerikan akibat perang besar-besaran. Karena itu, beliau berharap didirikannya sebuah Pemerintahan Dunia yang dapat mengakhiri sama sekali persaingan di antara bangsa-bangsa di dunia [33]. Menjadi warganegara Amerika pada 1940 dan pensiun dari jabatannya pada 1945 setelah Perang Dunia II, Einstein menjadi tokoh terkemuka di Gerakan Pemerintahan Dunia (*World Government Movement*). Einstein yakin, dengan cara itulah umat manusia beserta peradabannya bisa diselamatkan. Di lain fihak, Einstein berpendirian bahwa energi maha dahsyat yang dihasilkan dari reaksi nuklir tidak boleh dimanfaatkan sebagai alat pemusnah massal. Energi itu harus dimanfaatkan untuk kesejahteraan umat manusia [28].

Penyesalan sama seperti Einstein juga terjadi pada Leo Szilard yang terlibat secara langsung dalam Proyek Manhattan. Szilard dalam penelitian yang dilakukan bersama Enrico Fermi berhasil menemukan karakteristik uranium sebagai unsur yang sangat tepat untuk menjalankan reaksi nuklir berantai, sehingga temuan mereka itu dikembangkan untuk pembuatan senjata nuklir. Szilard dipecat dari Proyek Manhattan oleh kepala militer, Leslie R. Groves, karena pertimbangan risiko keamanan. Beliau dicurigai telah menarik simpati Rusia. Seperti halnya Einstein, keberadaan Szilard dalam proyek itu dikhawatirkan dapat mengakses informasi apapun terkait dengan pekerjaan dan pengembangan senjata nuklir [41].

Jika sebelumnya Szilard gelisah dan meminta Einstein menyurati presiden Roosevelt untuk mengembangkan senjata nuklir, namun ketika Szilard akhirnya tahu bahwa Amerika Serikat berhasil memproduksi senjata nuklir, sementara fihak Nazi-Jerman ternyata tidak memiliki kemampuan untuk mengembangkan senjata pemusnah massal tersebut, maka kegelisahan yang lain mulai menyelimuti Szilard. Bermula dari kegelisahan itu, Szilard akhirnya menyurati presiden dalam rangka memperingatkan bahaya senjata nuklir bagi kemanusiaan. Namun sayang, kegelisahan Szilard akhirnya terbukti dengan dijatuhkannya senjata nuklir oleh Sekutu di kota Hiroshima dan Nagasaki pada Agustus 1945.

Bagi bangsa Indonesia, peristiwa pengeboman dua kota di Jepang tadi juga terkait langsung dengan arah perjalanan bangsa ini. Dalam waktu yang sangat berdekatan dengan kekalahan tentara Jepang terhadap kekuatan Sekutu pada Perang Dunia II itulah bangsa Indonesia memproklamkan kemerdekaannya pada tanggal 17 Agustus 1945, setelah sebelumnya selama tiga setengah abad dijajah oleh Belanda dan selama tiga setengah tahun dijajah oleh Jepang.

Trauma atas kegiatannya terdahulu, Szilard akhirnya tidak melakukan kegiatan apapun berkaitan dengan nuklir. Pada 1959, beliau diberi penghargaan *Atom for Peace Award* dari Pemerintah Amerika Serikat. Selanjutnya, beliau menjadi bagian dari sebuah kelompok ilmuwan yang membentuk *Council for a Livable World*, sebuah perkumpulan yang bertujuan untuk memberi peringatan kepada publik dan pemerintah atas ancaman perang nuklir dan mendesak adanya kontrol terhadap angkatan bersenjata serta pelucutan senjata nuklir [33]. Tragedi di Hiroshima dan Nagasaki tidak boleh berulang kembali di masa-masa yang akan datang. Apa yang ditakutkan Szilard mendapat dukungan publik internasional, mereka sama-sama takut apabila perang nuklir berulang kembali. Perkembangan situasi politik dunia yang tidak menguntungkan menjadi faktor penyebab kekhawatiran timbulnya perang nuklir di kemudian hari [48].

6.1. Proliferasi Senjata Nuklir

Sejak ledakan dua senjata nuklir di penghujung akhir Perang Dunia II, muncul lima negara pemenang Perang Dunia II sekaligus menjadi anggota tetap Dewan Keamanan Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Kelima negara tersebut adalah Amerika Serikat, Uni Sovyet (kini dilanjutkan oleh Rusia), China, Inggris dan Perancis, yang dalam perjalanan waktu berikutnya berhasil mengembangkan dan memiliki senjata nuklir untuk keperluan masing-masing. Pasca Perang Dunia II, perlombaan pembuatan senjata nuklir bukannya berakhir, tapi justru berlanjut. Kemampuan produksi bom nuklir oleh kelima negara tersebut meramaikan uji coba bom nuklir di atmosfer dan perairan internasional [49].

Majalah Time edisi 25 Mei 1998 melaporkan, ada 19 negara yang diyakini mampu memproduksi senjata nuklir. Lima negara masuk dalam katagori *The Nuclear Club*, yaitu: Amerika Serikat, Inggris, Perancis, Rusia dan China. Sisanya sebanyak 14 negara masuk dalam katagori *The Threshold Countries*, yaitu : India, Israel, Pakistan, Iran. Irak, Korea Utara, Libya, Algeria, Argentina, Brazil, Belarus, Kazakhstan, Ukraina dan Afrika Selatan. Dalam waktu relatif singkat, ke-14 negara yang tersebar di sejumlah kawasan itu nantinya akan memiliki kemampuan untuk mengembangkan senjata nuklir seperti kelima negara yang tergabung dalam *The Nuclear Club*. Selain ke-19 negara tersebut, ada beberapa negara yang secara teknologi dinilai sudah memiliki kemampuan untuk memproduksi senjata nuklir, seperti Jepang, Korea Selatan dan Taiwan. Namun karena negara-negara tersebut terikat perjanjian keamanan dengan negara Sekutu, negara itu dilarang untuk memproduksi senjata nuklir. Sebagai konsekuensinya, keamanan negaranya dijamin sepenuhnya oleh Amerika Serikat beserta sekutunya [51].

Sebuah laporan bertema 'Tren Global Tahun 2025 – Transformasi Dunia' dengan tebal 121 halaman yang disusun oleh Dewan Intelijen Nasional Amerika Serikat dan dirilis pada akhir 2008 mengingatkan, penggunaan senjata nuklir akan meluas dan meningkat pada 2025. Dalam laporan itu disebutkan, pada masa mendatang kondisi kemanan dunia akan semakin labil dan penuh ketegangan akibat konflik dan perang. Penggunaan senjata nuklir itu meningkat seiring dengan makin mudah dan terbukanya akses pada teknologi. Dalam waktu yang tidak terlalu lama, dunia akan menjadi subyek konflik yang meningkat gara-gara perebutan berbagai hal, termasuk pangan dan air bersih. Dunia juga akan semakin terancam dengan tindakan sejumlah negara serta kelompok-kelompok teroris yang mempunyai akses mudah ke senjata nuklir. Laporan intelijen itu juga menekankan risiko persaingan senjata nuklir oleh negara-negara di kawasan Timur Tengah. Sejumlah negara di kawasan itu dikhawatirkan ikut berlomba mengembangkan program senjata nuklir dimasa mendatang [51].

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 di bawah pimpinan Rusia. Dari sinilah akhirnya diproduksi persenjataan nuklir yang daya rusaknya jauh semakin hebat dibandingkan dengan bom nuklir yang meledak dalam Perang Dunia II. Menurut Komisi Perdamaian Dunia yang berkedudukan di Jeneva, jumlah hulu ledak nuklir yang dimiliki oleh Amerika Serikat dan Rusia pada era 1970-an baru berjumlah 2.400 – 2.800 buah, meningkat menjadi 12.400 – 13.000 buah di era 1990-an, dan pada perkembangan terakhir dilaporkan mencapai 50.000 buah. Jumlah itu, menurut Willy Brand, mantan kanselir Jerman Barat dalam bukunya *World Armament and World Hunger, A Call for Action*, dapat dipakai untuk menghancurkan delapan planet bumi beserta seluruh isinya. Jumlah tersebut belum termasuk senjata nuklir yang dimiliki oleh Inggris, Perancis dan China [48].

Uji coba senjata nuklir yang berlangsung secara intensif antara periode 1946-1980 telah menimbulkan kekhawatiran internasional akan terulangnya perang nuklir. Bayang-bayang ancaman senjata nuklir masih terus menghantui penduduk dunia, terutama pada saat puncak berlangsungnya era perang dingin. Perundingan perlucutan senjata nuklir yang digalang oleh Amerika Serikat dan Rusia sedikitpun tak mengurangi minat negara-negara tertentu untuk memiliki senjata nuklir sendiri.

Di sisi lain, gerakan anti senjata nuklir semakin besar pengaruhnya dan berhasil menggagal usaha internasional untuk melarang uji coba senjata nuklir. Pada 1963, Amerika Serikat dan Rusia bersepakat untuk menghentikan semua percobaan senjata nuklir, kecuali yang dilakukan di bawah tanah. Perjanjian yang dikenal dengan *Test Ban Treaty* (TBT) itu juga ditandatangani oleh Inggris, namun Cina dan Perancis tidak mau bergabung. Setelah TBT berlaku, frekwensi uji coba senjata nuklir di bawah tanah yang dilakukan oleh dua kelompok negara yang tergabung baik pada Blok Barat maupun Blok Timur terus meningkat dengan tajam [51].

Peluru kendali semacam *Purshing II* yang dikembangkan oleh Amerika Serikat konon dapat melesat dari pangkalannya di Jerman Barat (selama perang dingin berlangsung, Jerman terpecah menjadi dua negara, yaitu Jerman Barat yang pro Blok Barat dan Jerman Timur yang pro Blok Timur) menuju sasarannya di Eropa Timur (misal pusat komando militer di Rusia) hanya dalam tempo tujuh menit. Rudal ini dilengkapi dengan hulu ledak nuklir penembus bumi berkekuatan 250 kilo ton dan mampu menghancurkan sasaran yang berada 30 meter di bawah permukaan tanah. Hulu ledak nuklir dalam sistem persenjataan modern mempunyai kemampuan atau daya rusak yang luar biasa. Rudal berhulu ledak nuklir dengan kekuatan 300 kilo ton misalnya, akan setara dengan 20 kali kekuatan bom nuklir yang meledak di Hiroshima pada 1945. Negara-negara Blok Timur juga memiliki andalan senjata nuklir yang tak kalah dahsyatnya dengan yang dikembangkan oleh Blok Barat. Rudal SS-20 yang dikembangkan Rusia dan mulai digelar tahun 1977 misalnya, memiliki tiga hulu ledak nuklir masing-masing berkekuatan 500 kilo ton [52].

Bom atom pertama yang meledak di Hiroshima pada 1945 berkekuatan 13.000 ton dan bisa langsung membunuh sekitar 200.000 orang yang berada di pusat ledakan, ditambah ratusan ribu lainnya menjadi korban-korban kotaminasi radioaktif dan sebagainya. Dari asumsi ledakan senjata nuklir di Hiroshima tadi, setiap ton daya ledak senjata nuklir bisa langsung mematikan 15 orang, atau untuk membunuh satu orang cukup diperlukan ledakan dengan kekuatan sekitar 0,07 ton.

Pada 1987, *Purshing II* sebanyak 108 unit ditempatkan oleh Amerika Serikat selaku pemimpin Blok Barat yang kapitalis di Jerman Barat, dan *Tomahawk* sebanyak 224 ditempatkan di Jerman Barat, Belgia, Inggris dan Italia. Sementara itu, Rusia selaku pemimpin Blok Timur yang sosialis menggelar SS-20 nya sebanyak 441 buah di berbagai tempat, terutama di negara-negara wilayah Eropa Timur yang tergabung dalam *Sovyet Union*. Pada 1987, di seluruh permukaan bumi bercokol sekitar 50.000 buah hulu ledak nuklir. Dari jumlah itu dapat dihasilkan ledakan dengan kekuatan 20 milyar ton [49]. Jika penduduk dunia pada waktu itu ditaksir sekitar 5 milyar, maka setiap kepala penduduk dunia

saat itu jika dirata-rata akan mendapatkan jatah ledakan bom nuklir masing-masing dengan kekuatan sekitar 4 ton, atau sekitar 60 kali lebih tinggi dibandingkan kekuatan ledakan yang dialami oleh para korban bom atom di Hiroshima dan Nagasaki.

Pada era perang dingin berlangsung, para penyusun strategi perang di Pentagon (AS) dan sekutunya NATO (Eropa Barat) meramalkan, jika pecah serangan terhadap Eropa Barat dari musuhnya di Eropa Timur, maka serangan tersebut akan dilakukan dalam bentuk serangan armada tank lapis baja yang kala itu giat dikembangkan di Uni Sovyet. Tank-tank itu cukup tahan terhadap empasan dan bahang dari ledakan senjata nuklir jenis fisi yang umumnya dimiliki oleh Blok Barat. Maka untuk melumpuhkan armada tank tadi tentunya harus dilakukan peledakan senjata nuklir jenis fisi yang kekuatannya menghasilkan daya rusak yang sangat besar [48].

Namun strategi di atas ternyata dapat menimbulkan kerusakan yang besar pada wilayah Eropa Barat sendiri. Sementara itu, hujan debu radioaktif dari ledakan bom fisi dapat berlangsung dalam waktu yang cukup lama sehingga dapat menghalangi serangan balik oleh pihak Blok Barat. Sementara itu, prinsip perang nuklir taktis (terbatas) seperti yang dibayangkan, justru menghendaki pancaran radiasi mematikan secara langsung dengan daya empasan yang serendah-rendahnya. Jika terjadi perang nuklir antara kedua blok tadi, hendaknya hanya berlangsung di tempat terbatas, yaitu di wilayah Eropa saja. Kendala inilah yang melahirkan pemikiran tentang perlunya pengembangan senjata nuklir yang daya rusaknya terhadap lingkungan fisik tidak terlalu besar, tetapi pancaran radiasi langsungnya sangat tinggi, sehingga mampu menerobos dinding tank lapis baja dan membunuh awak yang ada di dalamnya.

Bom hidrogen mengandalkan daya rusaknya tidak pada empasan dan bahang yang merusak bangunan dan benda-benda fisik lainnya, tetapi pada pancaran radiasi neutron langsung yang mematikan. Neutron bebas berenergi tinggi itu dengan mudahnya dapat menerobos lapisan baja tank-tank dari Blok Timur dan membunuh para awaknya, tanpa merusak tanknya sendiri. Keunggulan lain bom hidrogen adalah ledakannya

hampir tidak menyebabkan hujan debu radioaktif, sehingga wilayah tempat ledakannya dapat segera dilewati tentara untuk melakukan serangan balik. Uji coba bom nuklir jenis fusi mulai dilakukan baik oleh Amerika Serikat, Rusia, Inggris maupun Perancis pada sekitar tahun 1950-an. Ledakan bom hidrogen melepaskan energi dalam bentuk sinar gamma dan neutron cepat secara langsung (80%), serta empanan dan bahang (20 %).

Untuk meningkatkan kemampuan dalam perang nuklir taktis, para ahli strategi perang di Pentagon dan NATO selama era perang dingin masih terus berusaha untuk meningkatkan keandalan senjata nuklir yang dimilikinya. Dari pemikiran ini lahirlah konsep untuk menghadirkan bom yang mampu memancarkan neutron berenergi tinggi dalam jumlah lebih besar, yang dikenal juga sebagai bom neutron. Ide pembuatan bom neutron ini lahir dari Edward Teller akhir tahun 1950-an. Kala itu, AS dipimpin oleh presiden Dwight D. Eisenhower. Edward Teller mewanti-wanti Eisenhower tentang perlunya membuat senjata nuklir taktis yang hanya memancarkan radiasi murni, yang prinsip kerjanya sangat berbeda dengan bom-bom nuklir generasi sebelumnya. Jawabannya ada pada bom neutron [53].

Dalam prakteknya, bom neutron dibuat dengan sistim gabungan antara proses fisi dan fusi. Bahan fisi diselimuti dengan isotop-isotop hidrogen yang berperan sebagai bahan fusi. Jika terjadi reaksi fisi berantai tak terkendali, maka panas yang luar biasa besarnya akan mengakibatkan isotop-isotop hidrogen yang menyelimutinya terpicu untuk melakukan reaksi fusi. Jadi proses fisi disini hanya dipakai sebagai pelatuk untuk merangsang terjadinya fusi nuklir. Ledakan fisi-fusi ini akan melepaskan neutron berenergi tinggi dalam jumlah yang sangat besar disertai pancaran radiasi gamma.

Runtuhnya kekuatan komunis yang ditandai dengan bubar dan terpecah-pecahnya Uni Sovyet menjadi negara-negara kecil yang merdeka dan melepaskan diri dari kekuasaan Rusia, praktis peristiwa itu juga menandai berakhirnya era perang dingin antara kedua blok tadi. Meskipun demikian, bayang-bayang ancaman senjata nuklir belum

juga bisa dihapuskan dari benak masyarakat dunia. Situasi pasca perang dingin pun ternyata tidak banyak membantu meminimalisir kekhawatiran pecahnya perang nuklir. Pasca perang dingin ternyata memicu terjadinya konflik regional sehingga banyak muncul peperangan di berbagai kawasan. Intensitas konflik di kawasan Asia, Afrika, hingga Amerika Latin menjadi semakin tinggi sehingga secara geopolitik kawasan-kawasan tersebut menjadi labil. Sebagai akibatnya, beberapa negara di kawasan tersebut menjadi tertarik dan mulai bersaing dalam mengembangkan senjata nuklir [54]. Bertitik tolak dari bayang-bayang mengerikan senjata nuklir tadi, maka tidak jarang di antara anggota masyarakat menolak teknologi nuklir dalam bentuk apapun, tanpa mau melihat lebih jauh untuk apa teknologi nuklir tersebut.

6.2. Nuklir untuk Perdamaian

Pada umumnya masyarakat awam mengenal istilah nuklir dari sejarah Perang Dunia II. Pada saat itu, dua buah bom nuklir yang dijatuhkan Sekutu (Amerika Serikat) meluluhlantakkan dua kota di Jepang, masing-masing Hiroshima pada 6 Agustus 1945 dan Nagasaki pada 9 Agustus 1945. 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. Bayang-bayang ancaman senjata nuklir belum juga bisa dihapuskan dari benak masyarakat dunia. Bertitik tolak dari bayang-bayang mengerikan senjata nuklir tadi, maka tidak jarang di antara kita menolak teknologi nuklir dalam bentuk apapun tanpa mau melihat lebih jauh untuk tujuan apa teknologi nuklir tersebut.

Gerakan internasional yang semula digalang untuk menentang uji coba dan proliferasi senjata nuklir, akhirnya merebak menjadi gerakan anti dengan segala sesuatu yang berbau nuklir. Tidak jarang masyarakat melakukan demonstrasi menolak rencana pemanfaatan nuklir untuk maksud-maksud damai. 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. Karena itu, kesalahan persepsi masyarakat terhadap teknologi nuklir seperti ini perlu diluruskan dengan memberikan informasi menyeluruh dengan menampilkan wajah damai teknologi nuklir.

Sebenarnya tidak lama setelah tragedi Hiroshima dan Nagasaki, telah tampak usaha-usaha menghindari penggunaan teknologi nuklir untuk senjata pemusnah masal dan memfokuskannya untuk kesejahteraan umat manusia. Hal ini antara lain ditunjukkan oleh pemerintah Amerika Serikat dengan membubarkan Proyek Manhattan yang berada di bawah pengawasan militer pada 1946, dan menggantinya dengan Komisi Tenaga Atom atau *Atomic Energy Commission* (AEC) di bawah pengawasan sipil. Tujuan utama komisi ini adalah mengembangkan pemanfaatan teknologi nuklir untuk tujuan perdamaian dan kemanusiaan. Selanjutnya, Presiden Amerika Serikat, Dwight D. Eisenhower, pada sidang umum Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) 8 Desember 1953 mencanangkan program Atom untuk Perdamaian dan mengusulkan pembentukan Badan Tenaga Atom Internasional atau *International Atomic Energy Agency* (IAEA) [55].

Badan Tenaga Atom Internasional merupakan suatu organisasi antar pemerintah yang didirikan pada 1957 dan bernaung di bawah PBB. Organisasi itu sendiri dibentuk dalam rangka mempercepat dan memperluas kontribusi tenaga nuklir untuk maksud-maksud damai, kesehatan dan kesejahteraan bangsa-bangsa di seluruh dunia. Dalam kiprahnya, IAEA selalu membantu kepada negara-negara anggota, terutama negara-negara berkembang, dengan memberikan fasilitas dan beasiswa untuk latihan dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Melalui badan ini pula dihimpun dan digalang kerjasama internasional untuk mengembangkan teknologi nuklir bagi kesejahteraan

umat manusia. Sejak didirikan, IAEA telah banyak berperan dalam pengembangan dan penyebarluasan program pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan masyarakat dalam berbagai bidang kegiatan, mulai dari pertanian, kesehatan, industri, pelestarian lingkungan dan pembangkitan energi [2].

Tugas utama IAEA adalah mendorong pemanfaatan energi nuklir untuk maksud damai, sekaligus berusaha menjamin bahwa teknologi itu tidak akan dimanfaatkan untuk kepentingan militer. Melalui pengawasan yang ketat, teknologi nuklir tidak akan disalahgunakan untuk maksud-maksud jahat. Sebaliknya, pemanfaatannya secara benar ternyata banyak memberikan manfaat bagi kehidupan. Salah satunya adalah untuk memenuhi kebutuhan energi yang semakin mahal. Pada kenyataannya, dalam waktu yang bersamaan dengan berlangsungnya perlombaan proliferasi senjata nuklir, teknologi nuklir juga dikampanyekan oleh IAEA untuk maksud-maksud damai melalui suatu slogan baru *Nuke for peace* atau nuklir untuk perdamaian. Jadi keberadaan teknologi nuklir bukan semata-mata untuk pembuatan bom nuklir. Ada beberapa manfaat yang dapat dinikmati oleh umat manusia di muka bumi ini jika teknologi nuklir dimanfaatkan secara benar [42].

Terpilihnya IAEA dan Direktur Jendral badan itu, Mohamed El-Baradie, sebagai pemenang Nobel Perdamaian tahun 2005, menunjukkan seriusnya perhatian dunia terhadap pembatasan proliferasi senjata nuklir. Dengan kemenangan ini, persepsi masyarakat terhadap energi nuklir pun diharapkan akan berubah. Terlihat dengan jelas, walaupun pada awal perkembangannya teknologi nuklir tampil dan memperkenalkan diri pada masyarakat luas dengan wajah mengerikan dalam bentuk senjata pemusnah massal, namun di sisi lain ternyata teknologi nuklir juga bisa tampil dengan wajah ramah karena diaplikasikannya teknologi itu untuk berbagai bidang dan memberikan manfaat sangat besar bagi kehidupan umat manusia.

Secara garis besar, pemanfaatan teknologi nuklir dapat dikelompokkan menjadi dua kegiatan utama, yaitu pemanfaatan dalam bidang energi dan pemanfaatan di luar energi. Salah satu pemanfaatan teknologi

nuklir tersebut adalah dengan memanfaatkan panas nuklir yang keluar pada saat terjadi reaksi nuklir terkendali di dalam reaktor nuklir. Panas nuklir ini dapat dikonversikan untuk memproduksi listrik melalui pusat listrik tenaga nuklir (PLTN), dan listrik yang dihasilkannya dapat dipakai untuk memenuhi kebutuhan energi dalam kehidupan sehari-hari umat manusia. Untuk pemanfaatan di luar energi, teknik nuklir telah diaplikasikan dalam berbagai bidang kegiatan, mulai dari pertanian, biologi, kedokteran, penelitian fisika, kimia, metalurgi, studi lingkungan, kegiatan industri dan sebagainya. Pemanfaatan radiasi atau teknik nuklir pada umumnya terus menunjukkan peningkatan dari waktu ke waktu. Kini jenis radiasi yang dimanfaatkan pun berkembang, bukan hanya sinar-X tetapi juga sinar gamma dan partikel nuklir seperti neutron.

Di dalam inti atom bahan bakar nuklir tersimpan tenaga inti yang luar biasa besarnya. Energi ini tentu akan sangat bermanfaat apabila dapat dikonversikan menjadi energi yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Energi yang dikeluarkan dari pembakaran satu kilogram bahan bakar nuklir adalah sebesar 17 milyar kilo kalori atau setara dengan energi yang dikeluarkan dari pembakaran 2,4 juta kilogram bahan bakar fosil (batubara). Melihat besarnya kandungan energi tersebut, maka timbul keinginan dalam diri manusia untuk memanfaatkan energi nuklir untuk maksud-maksud damai [36].

Pada mulanya, pengembangan pemanfaatan energi nuklir masih sangat terbatas, yaitu baru dilakukan di Amerika Serikat dan Jerman. Tidak lama kemudian, Inggris, Perancis, Kanada dan Rusia juga mulai menjalankan program energi nuklimya. Listrik pertama yang dihasilkan dari PLTN ini terjadi di Idaho, Amerika Serikat, pada tahun 1951. Selanjutnya pada tahun 1954 PLTN skala kecil juga mulai dioperasikan di Rusia. PLTN pertama di dunia yang memenuhi syarat komersial dioperasikan pertama kali pada bulan Oktober 1956 di Calder Hall, Cumberland. Sistem PLTN di Calder Hall ini terdiri atas dua reaktor nuklir yang mampu memproduksi sekitar 80 juta Watt tenaga listrik. Sukses pengoperasian PLTN tersebut telah mengilhami munculnya beberapa PLTN dengan model yang sama di berbagai tempat [36].

Kebutuhan sumber energi yang terus meningkat dari waktu ke waktu telah mendorong manusia untuk melakukan diversifikasi dalam memanfaatkan sumber energi lain yang ada di alam. Salah satu sumber energi yang dapat diandalkan untuk pemenuhan kebutuhan energi dunia dalam jumlah besar dan jangka waktu panjang adalah pemanfaatan bahan bakar nuklir. Akibat krisis minyak yang terjadi pada tahun 1972, banyak negara industri di Eropa Barat dan Amerika Utara berusaha mengalihkan kebergantungan energinya dari minyak bumi kepada nuklir [39].

Pada 1961, ketika kampanye pemanfaatan energi nuklir untuk perdamaian baru saja dimulai, baru ada beberapa PLTN yang beroperasi di sejumlah negara. Pada akhir tahun 1980, setelah kampanye berjalan kurang lebih 20 tahun, ada 252 PLTN yang beroperasi di 22 negara anggota IAEA, dan mensuplai sekitar 8 % dari kebutuhan listrik dunia. Energi nuklir memiliki peran yang cukup besar dalam mencukupi kebutuhan energi dunia. Secara umum sejak tahun 1989, sekitar 17 % dari kebutuhan listrik di seluruh dunia dibangkitkan menggunakan energi nuklir⁴². Data awal yang dilaporkan kepada Sistem Informasi Mengenai Reaktor Daya atau PRIS (*Power Reactor Information System*) yang dikelola oleh IAEA, tercatat ada lima negara yang hampir separo atau lebih kebutuhan listrik di dalam negerinya dibangkitkan oleh PLTN. Kelima negara tersebut adalah Perancis (74,6 %), Belgia (60 %), Republik Korea (50,2 %), Hongaria (49,8 %) dan Swedia (45,1 %). Di samping itu juga ada lima negara lain yang menggunakan energi nuklir untuk memenuhi paling tidak sepertiga dari kebutuhan listrik di dalam negerinya, yaitu: Bulgaria (32,9 %), Finlandia (35,5 %), Jepang (27,8 %), Spanyol (38,4 %) dan Switzerland (41,6%).

Terhitung sejak 31 Desember 1993 di seluruh dunia beroperasi 431 PLTN dengan daya total terpasang lebih dari 341 Giga Watt (GW). Selama 1993, PLTN tersebut membangkitkan energi listrik lebih dari 2.200 Teta Watt-jam (TWj). Hal ini berarti dengan pengoperasian sejumlah PLTN tersebut telah terjadi penghematan pemakaian minyak bumi sebesar 490 juta ton. Data yang dikeluarkan oleh IAEA pada tahun 2010 menunjukkan bahwa saat itu di seluruh dunia beroperasi sebanyak

433 PLTN dengan total daya yang dihasilkan sebesar 349.063 MW-listrik. Di samping itu, ada 37 unit PLTN yang sedang dalam proses pembangunan di beberapa negara yang diperkirakan akan memberikan tambahan suplai listrik sebesar 31.128 MW-listrik.

Di kalangan para pakar perancang kebijakan energi, umumnya mereka menyadari bahwa salah satu sumber energi alternatif yang bisa diandalkan untuk mensuplai kebutuhan energi listrik di masa mendatang adalah energi nuklir. Selain aspek ekonomi, energi nuklir juga memiliki daya tarik tersendiri dikaitkan dengan masalah lingkungan global. Dari sekian banyak sumber energi yang telah dimanfaatkan manusia, energi nuklir untuk saat ini merupakan salah satu sumber energi alternatif yang mampu memproduksi energi dalam jumlah yang sangat besar. Energi nuklir akan tersedia selama beberapa abad jika teknologi daur ulang dan pembiakan bahan bakar berhasil dikembangkan. Pemanfaatan energi nuklir sudah cukup lama diperkenalkan sebagai sumber energi alternatif yang dinilai ramah lingkungan, karena dalam memproduksi listrik tidak melepaskan gas-gas rumah kaca maupun gas-gas asam penyebab pemanasan global dan hujan asam, serta senyawa-senyawa lainnya yang dapat merusak lapisan ozon.

Bahan bakar nuklir sangat kompak, sehingga mampu menghasilkan energi dalam jumlah yang sangat besar dengan limbah yang sangat sedikit. Penggunaan energi nuklir pada operasi normal sangat bersih, dan pada kondisi abnormal dapat diatasi dengan berbagai teknik pengamanan. Dikatakan bersih karena pemanfaatan energi nuklir tidak membebaskan asap atau debu sisa pembakaran lewat cerobong, serta tidak membuang abu ke lingkungan. Dalam hal ini, pemanfaatan energi nuklir akan membantu mengurangi hujan asam dan pembatasan emisi gas rumah kaca ke atmosfer.

Perancis yang mengandalkan lebih dari 70% kebutuhan listrik dalam negerinya pada energi nuklir, antara tahun 1980 sampai dengan 1992 berhasil menurunkan emisi CO₂ dari sekitar 60 juta ton pada sebelum tahun 1982 menjadi sekitar di bawah 30 juta ton pada tahun-tahun sesudahnya. Sedang emisi SO₂ turun dari sekitar 1 juta ton pada tahun

1980 menjadi di bawah 0,3 juta ton pada tahun-tahun sesudah 1982. Selama tahun 1995, pemanfaatan energi nuklir telah menghindarkan pembakaran bahan bakar fosil 760 juta ton batubara, 5,5 trilyun kaki kubik gas alam, atau 620 juta barrel minyak bumi. Pemanfaatan energi nuklir tadi telah menghindarkan pelepasan polutan dalam bentuk C/CO₂ sebanyak 482 juta ton, SO₂ sebanyak 15 juta ton, dan NO_x sebanyak 8 juta ton.

Di kalangan praktisi teknologi nuklir sudah sering terdengar ungkapan yang mengatakan bahwa teknologi nuklir laksana pisau bermata dua, yang dimaksudkan untuk menggambarkan potensi manfaat dan bahaya yang ada pada teknologi itu. Ungkapan tersebut memang tepat, karena di satu sisi nuklir dapat memberikan manfaat bagi kehidupan manusia, namun di sisi lain nuklir ternyata mampu juga memberikan ancaman bahaya yang perlu diwaspadai. Dua mata pisau teknologi nuklir tadi selalu hadir bersamaan. Namun dalam prakteknya, mata pisau nuklir yang membahayakan ternyata dapat ditumpulkan, sementara itu mata pisau yang bermanfaat dapat dipertajam. Oleh sebab itu, dalam setiap upaya pemanfaatan teknologi nuklir harus dilakukan dengan perencanaan yang matang dan melibatkan personil yang cakap serta memperhatikan segala aspek yang berhubungan dengan keselamatan kerja terhadap radiasi.

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. Aplikasi teknik nuklir ini 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. Barang-barang dari plastik untuk keperluan rumah tangga dapat dibuat melalui proses iradiasi. Produk berupa pesawat televisi maupun mobil mengandung kabel yang pembungkusnya diperkuat oleh proses iradiasi.

6.3. Traktat Non Proliferasi

Selama 160 juta tahun dinosaurus berhasil mempertahankan eksistensinya di muka bumi. Namun kejayaan dinosaurus itu berakhir karena mengalami kepunahan masal kira-kira 65,5 juta tahun silam. Banyak kalangan ilmuwan yang menduga, bahwa kepunahan itu berhubungan dengan jatuhnya sebuah asteroid di muka bumi yang memicu kebakaran sangat besar, gempa bumi dengan ukuran lebih dari 10 pada skala Richter, dan tanah longsor seluas benua. Asteroid itu diduga telah menghantam Bumi dengan kekuatan satu miliar kali lebih kuat dibandingkan dengan bom atom di Hiroshima. Karena benturan asteroid itu, bahan ledakan beterbangan di atmosfer, menyelimuti planet bumi dalam kegelapan, sehingga memicu musim dingin global dan membunuh banyak spesies yang tak dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan yang berubah drastis. Catatan geologi memperlihatkan peristiwa itulah yang memicu kepunahan dinosaurus. Peter Schulte dari *University of Erlangen* di Jerman, menyatakan bahwa dampak asteroid diduga telah mengeluarkan jauh lebih banyak sulfur, debu dan jelaga dalam waktu lebih singkat dibandingkan dengan ledakan gunung berapi, sehingga mengakibatkan kegelapan dan udara dingin yang sangat ekstrem.

Mirip dengan skenario kepunahan dinosaurus dari muka bumi, kepunahan semacam itu bisa berulang kembali pada umat manusia di abad modern ini jika terjadi perang nuklir. Pada 1980-an, para ilmuwan menyusun sebuah skenario tentang perang nuklir. Dalam skenario itu digambarkan fenomena apa saja yang dapat muncul pada bumi seandainya perang dahsyat itu benar-benar terjadi. Setelah melewati diskusi yang panjang, para ilmuwan akhirnya menyimpulkan bahwa efek dari perang nuklir itu adalah berakhirnya seluruh kehidupan di muka bumi. Menurut mereka, ledakan seluruh bom nuklir yang saat itu sudah berhasil diproduksi di muka bumi akan memunculkan awan dan debu raksasa [54].

Kota-kota yang dibom akan terbakar, demikian pula pabrik-pabrik dan hutan-hutan. Jika ledakan bom nuklir itu terjadi di berbagai penjuru dunia, maka akan tercipta kumpulan awan dan debu yang jumlahnya

luar biasa besar. Cendawan raksasa selanjutnya naik menjulang tinggi ke angkasa yang akhirnya mengungkung atmosfer bumi. Peristiwa itu pasti akan menutupi langit dan menghalangi pancaran sinar matahari ke permukaan bumi. Sebagai akibatnya, suhu di permukaan bumi menurun sehingga muncul musim dingin global. Para ilmuwan menamai fenomena ini sebagai *nuclear winter*. Sebagai dampaknya adalah terhambatnya proses fotosintesa tumbuhan yang harus didukung oleh sinar matahari. Karena itu, produksi rantai makanan di bumi akan terputus dan kepunahan penghuni bumi pun tak bisa dihindari [54].

Mengantisipasi perkembangan politik dunia yang sangat mengkhawatirkan, maka muncullah ide pemberlakuan Traktat Mengenai Pelarangan Penyebaran Senjata Nuklir atau *Nuclear Non-Proliferation Treaty* (NPT), yaitu suatu perjanjian internasional yang bertujuan membatasi kepemilikan dan pengembangan senjata nuklir. Traktat dibahas oleh 16 negara yang tergabung dalam Komite Perlucutan Senjata yang dibentuk oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Traktat itu sendiri semula diusulkan oleh Irlandia dan pertama kali ditandatangani oleh Finlandia melalui Sidang Umum PBB di New York pada 1 Juli 1968. Traktat mulai diberlakukan sejak 5 Maret 1970 setelah diratifikasi oleh Inggris, Rusia, Amerika Serikat, dan 40 negara lainnya [56].

Traktat Non-Proliferasi merupakan tonggak utama bagi pencegahan penggunaan senjata nuklir di dunia. Sejak mulai diberlakukan, NPT dianggap telah berhasil menjadi landasan utama bagi keamanan global, dan hingga kini telah mengikat 189 negara berdaulat menjadi negara pihak yang bersedia meratifikasi NPT. Negara pihak pada NPT dan masyarakat internasional mengharapkan NPT sebagai perjanjian multilateral dapat menjaga stabilitas keamanan internasional dengan cara mencegah penyebaran senjata nuklir, meningkatkan kerjasama multilateral di bidang perlucutan senjata serta meningkatkan kerja sama internasional dalam penggunaan energi nuklir untuk tujuan damai [50].

Negara pihak penandatanganan NPT yang berjumlah 189 itu selanjutnya dibagi menjadi dua kelompok. Pertama adalah kelompok negara-negara nuklir atau *Nuclear Weapon States* (NWS), yaitu negara-negara yang

sudah memiliki kemampuan untuk memproduksi senjata nuklir sejak sebelum perjanjian itu diberlakukan. Kelompok ini didominasi oleh kelima negara anggota tetap Dewan Keamanan PBB. Di bawah traktat Non-Proliferasi, hanya kelima negara itulah yang berhak dan diijinkan memiliki senjata nuklir. Kedua adalah negara-negara non-nuklir atau *Non-Nuclear Weapon States* (NNWS). Selain kelima negara yang tergabung dalam kelompok NWS, semua negara masuk dalam kelompok NNWS yang tidak diperkenankan untuk mempelajari, mengembangkan, menguji coba sekaligus memiliki senjata nuklir. Di antara negara-negara non-nuklir, ada beberapa negara seperti India, Pakistan, Brasil, Argentina dan Afrika Utara merupakan negara yang berpotensi memiliki senjata nuklir. Negara-negara tersebut sejak semula telah menolak bergabung untuk menandatangani naskah NPT. Dua negara nuklir yaitu Republik Rakyat Cina dan Perancis juga menolak untuk menandatangani naskah NPT [51].

Traktat Non-Proliferasi pada dasarnya merupakan komitmen dari kelima negara NWS untuk mewujudkan perlucutan menyeluruh, serta komitmen negara-negara NNWS untuk tidak mengembangkan atau memperoleh senjata nuklir. Selain itu, NPT juga menegaskan untuk melindungi hak seluruh negara pihak dalam mengembangkan teknologi nuklir untuk tujuan damai. Untuk menjaga kestabilan dan perdamaian internasional pada dasarnya rekomendasi NPT merupakan kesepakatan bersama yang membahas tentang penegasan kembali terhadap komitmen yang mencakup [50]:

- Prinsip dan tujuan perlucutan senjata nuklir, yaitu universalitas (*universality*), non-proliferasi (*non proliferation*).
- Perlucutan senjata nuklir (*nuclear disarmament*).
- Kawasan bebas senjata nuklir (*nuclear weapons free zone*),
- Pengawasan (*safeguards*) oleh IAEA, dan
- Penggunaan nuklir untuk tujuan damai (*peaceful uses of nuclear energy*) dalam rangka implementasi traktat.

Terdapat tiga pilar yang mendasari pelucutan senjata. Pilar pertama adalah non-proliferasi senjata nuklir. Terkait dengan pilar ini, lima negara NWS setuju untuk tidak mentransfer teknologi senjata nuklir maupun hulu ledak nuklir ke negara lain, dan negara-negara NNWS setuju untuk tidak meneliti atau mengembangkan senjata nuklir. Kelima negara NWS juga menyetujui untuk tidak menggunakan senjata nuklir terhadap negara-negara NNWS, kecuali untuk merespon serangan nuklir atau serangan konvensional yang bersekutu dengan negara NWS. Namun, persetujuan ini belum secara formal dimasukkan dalam perjanjian, dan kepastian-kepastian mengenai persetujuan itu berubah-ubah sepanjang waktu. Amerika Serikat telah mengindikasikan bahwa negara itu dapat menggunakan senjata nuklir untuk membalas penyerangan non-konvensional yang dilakukan oleh negara-negara yang dianggap berbahaya. Mantan Menteri Pertahanan Inggris, Geoff Hoon, juga menyatakan secara eksplisit mengenai kemungkinan digunakannya senjata nuklir untuk membalas serangan seperti itu. Pada Januari 2006, Presiden Perancis, Jacques Chirac, menyatakan bahwa sebuah serangan teroris ke Perancis, jika didalangi oleh sebuah negara, akan memicu pembalasan nuklir (dalam skala kecil) yang diarahkan ke pusat kekuatan negara-negara berbahaya tersebut [56].

Pilar kedua adalah pelucutan senjata nuklir. Traktat Non-Proliferasi menyatakan bahwa negara dalam kelompok NWS berusaha mencapai rencana untuk mengurangi dan membekukan simpanan senjata nuklir mereka. Dinyatakan pula bahwa perjanjian dalam pelucutan berada di bawah kendali internasional [56]. NPT merekomendasikan agar NWS dengan rasa kesadaran yang tinggi dapat melakukan negosiasi dalam upaya pelucutan senjata nuklir. Negara dalam kelompok NWS juga menyatakan untuk tidak membujuk negara NNSW manapun untuk mendapatkan senjata nuklir. Doktrin serangan mempertahankan diri dan bentuk ancaman lainnya bisa dianggap sebagai bujukan atau godaan oleh kelompok negara NNWS. Traktat ini juga mengharuskan negara yang tergabung dalam kelompok NNWS meninggalkan segala kegiatan yang mengarah kepada persenjataan nuklir, mengharuskan mereka untuk menandatangani perjanjian *safeguards* IAEA dan menerapkannya

dalam seluruh sumber material dan bahan yang dapat melakukan reaksi belah inti khusus di dalam segala kegiatan nuklir untuk damai sesuai Artikel III NPT.

Pilar ketiga adalah pemanfaatan energi nuklir untuk maksud-maksud damai. Karena sangat sedikit dari negara-negara NWS dan negara-negara pengguna energi nuklir yang mau benar-benar membuang kepemilikan bahan bakar nuklir, maka pokok ketiga dari perjanjian ini memberikan jaminan kepada setiap negara untuk memanfaatkan teknologi nuklir, namun dalam kondisi-kondisi tertentu yang membuatnya tidak mungkin mengembangkan senjata nuklir. Isi perjanjian ini memberikan hak pada setiap negara menggunakan tenaga nuklir untuk kepentingan damai, dan karena populernya pembangkit tenaga nuklir yang menggunakan bahan bakar uranium, maka perjanjian ini juga menyatakan bahwa pengembangan uranium maupun perdagangannya di pasar internasional tetap diperbolehkan [56].

Idealnya, ketiga pilar NPT itu harus diterapkan secara seimbang, transparan dan komprehensif. Namun dalam pelaksanaannya, ketiga pilar itu ternyata belum berjalan sesuai dengan harapan. Penyebabnya antara lain karena negara-negara yang memiliki senjata nuklir tidak mau diatur untuk pelucutan senjata mereka. Juga ada negara-negara yang tidak termasuk dalam NPT memiliki senjata nuklir atau mengembangkan senjata nuklir, seperti India, Pakistan dan Israel yang diduga atau dipastikan memiliki senjata nuklir. Pelarangan upaya riset untuk meningkatkan kemampuan teknis kepemilikan senjata nuklir juga sulit untuk diterapkan, termasuk terhadap Amerika Serikat sendiri yang tidak mau diatur dalam hal ini. Di sisi lain, pengembangan teknologi untuk memanfaatkan uranium secara damai dapat dianggap sebagai awal pengembangan hulu ledak nuklir. Hal ini dapat dilakukan oleh suatu negara dengan cara keluar dari NPT terlebih dahulu.

Traktat Non-Proliferasi dinilai telah mampu mencegah proliferasi horizontal persenjataan nuklir, namun belum sepenuhnya berhasil mencegah proliferasi secara vertikal. Teknologi persenjataan nuklir tidak ditransfer ke negara-negara non-nuklir, tapi bagi negara-negara dalam

The Nuclear Club, mereka terus meningkatkan kemampuan sistem persenjataan nuklir mereka. Oleh karena itu, perlu adanya kesepakatan bersama agar seluruh negara pihak NPT, termasuk negara-negara nuklir, terikat pada komitmen untuk tidak mengembangkan senjata nuklir, baik secara vertikal maupun horizontal (*non-proliferation in all its aspects*). Perlu ditekankan agar negara-negara nuklir memenuhi komitmennya untuk melucuti senjata nuklir atas inisiatif mereka sendiri sebagai bagian dari implementasi NPT dengan batas waktu perlucutan yang terjadwal dengan jelas [55].

Sangat sulit dilakukan penggalangan kerjasama di antara negara-negara yang secara terbuka telah memilih untuk melakukan proliferasi senjata nuklir. Dalam hal ini, IAEA harus diperkuat posisinya agar mampu menjalankan mandatnya dalam pengawasan pemanfaatan teknologi nuklir. Seluruh negara berkewajiban untuk selalu bekerjasama dengan badan energi atom dunia ini. Selain itu, diperlukan juga kerja keras secara bersama untuk menghasilkan suatu konvensi senjata nuklir universal dalam tenggat waktu yang jelas guna mewujudkan penghapusan senjata nuklir secara menyeluruh. Karena hanya dengan penghapusan secara menyeluruh itulah, penduduk bumi baru dapat memastikan bahwa senjata tersebut tidak akan pernah digunakan lagi.

Dalam perkembangannya, pada 11 Mei 1995, di New York, lebih dari 170 negara sepakat untuk melanjutkan perjanjian NPT tanpa batas waktu dan tanpa syarat (*indefinite extension*). Sejak saat itu, terdapat konsesi yang diberikan oleh negara-negara NWS kepada negara-negara NNWS yang dikenal sebagai mekanisme *strengthened review process* (SRP). Sesuai ketentuan di dalam Traktat, seluruh negara pihak melakukan pertemuan *Review Conference* setiap 5 tahun dengan tujuan untuk mengkaji implementasi berbagai ketentuan yang terdapat di dalam NPT sekaligus menyepakati hal-hal yang perlu dilakukan di masa mendatang untuk memperkuat NPT. Terkait dengan non-proliferasi, diharapkan agar universalitas NPT terus menjadi prioritas utama dan mendesak agar negara-negara yang belum menjadi pihak untuk segera mengaksesi NPT sebagai negara non-nuklir. Konferensi perpanjangan NPT pada 1995 itu merupakan momentum yang sangat penting dan strategis bagi

negara-negara NNWS untuk melakukan perbaikan-perbaikan terhadap ketimpangan-ketimpangan dalam pelaksanaan NPT sebelumnya.

6.4. Pengawasan Internasional

Sukses Proyek Manhattan dalam mengembangkan dan memproduksi senjata nuklir, diikuti oleh penggunaan senjata tersebut dalam Perang Dunia II, telah menyadarkan penduduk bumi mengenai bencana yang dapat ditimbulkan dari adanya perlombaan, pengembangan dan penyebaran senjata nuklir. Apabila semua negara di dunia ini diberi kebebasan untuk mengembangkan dan memiliki senjata nuklir, bisa dibayangkan ancaman bahaya yang sewaktu-waktu dapat menimpa bumi beserta seluruh isinya.

Untuk menghindari terjadinya pengembangan senjata nuklir, pada tahun 1957, IAEA dibentuk dengan salah satu tugasnya adalah untuk mengawasi dan mengatur pengembangan serta perluasan teknologi dan bahan nuklir. Dua tahun kemudian suatu perjanjian dirundingkan dalam rangka demiliterisasi benua Antartika dan melarang peledakan atau penyimpanan senjata nuklir di sana. Amerika Serikat dan Rusia menandatangani perjanjian tersebut. Sedang pada 1961, Sidang Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa meloloskan pernyataan bersama mengenai prinsip-prinsip yang telah disetujui untuk perjanjian perlucutan senjata, diikuti pada tahun 1963 dengan perjanjian yang mengikat Amerika Serikat, Inggris dan Uni Sovyet untuk tidak melakukan percobaan senjata nuklir di daratan, atmosfer dan bawah laut. Pada tahun 1967, muncul perjanjian lain antara beberapa negara dalam rangka membatasi penggunaan ruang angkasa untuk kepentingan mata-mata militer [3].

Seluruh negara pemilik senjata nuklir harus menunjukkan secara sungguh-sungguh, bukan hanya dengan kata-kata, komitmen mereka bagi perlucutan senjata nuklir. Dengan demikian, perlucutan senjata nuklir secara menyeluruh dapat diwujudkan. Negara-negara pemilik senjata nuklir juga harus memberikan jaminan keamanan untuk tidak menggunakan senjata nuklir terhadap negara bukan pemilik senjata

nuklir. Untuk memantau perkembangan program nuklir di masing-masing negara, para penandatangan perjanjian NPT melakukan pertemuan lima tahunan. Ancaman proliferasi senjata nuklir, dari manapun asalnya, harus direspon secara sungguh-sungguh dan efektif tanpa diskriminasi dan menggunakan standar ganda. Respon tersebut harus didasari oleh prinsip multilateralisme dan sesuai dengan hukum internasional [50].

Beberapa gagasan telah dimunculkan untuk menghapus senjata nuklir dari muka bumi. Munculnya kawasan bebas senjata nuklir pada intinya adalah membebaskan suatu wilayah dari kegiatan uji coba, tidak ada kepemilikan dan tidak ada proliferasi senjata nuklir. Gagasan pengawasan terhadap senjata nuklir saat ini dilakukan dengan cara melarang kepemilikan, penggelaran dan penggunaan senjata nuklir di kawasan yang telah ditentukan lokasinya. Pembentukan traktat kawasan bebas senjata nuklir dimaksudkan untuk memperkecil ruang gerak negara-negara yang masuk dalam kelompok *The Nuclear Club*, sehingga mereka tidak bisa memakai negara-negara non-nuklir untuk dijadikan sebagai ajang uji coba senjata nuklir. Ruang gerak *The Nuclear Club* akan semakin berkurang apabila banyak kawasan yang ditetapkan sebagai zona bebas senjata nuklir. Traktat kawasan bebas senjata nuklir membutuhkan adanya pengakuan dan komitmen dari *The Nuclear Club*, dimana mereka harus menghormati dan mematuhi sejumlah ketentuan yang tertuang dalam traktat. Upaya menghapus senjata pemusnah massal menjadi tidak efektif tanpa komitmen dari *The Nuclear Club* [56].

Diperlukan dukungan yang kuat untuk mempertahankan dan memperluas kawasan-kawasan bebas senjata nuklir di berbagai belahan dunia [51]. Upaya untuk menciptakan Kawasan Bebas Senjata Nuklir ini sebetulnya sudah mulai dinyatakan dalam Traktat Antartika (*Antartic Treaty*) di Washington pada 1959. Selanjutnya disusul oleh Traktat Tlatelolco (*Tlatelolco Treaty*) untuk Amerika Latin di Mexico pada 1967, serta kawasan bebas senjata nuklir di Pasifik Selatan yang ditandatangani di Rarotonga, Cook Island, pada 1985. Untuk Traktat sejenis, Kawasan bebas senjata nuklir untuk wilayah Afrika telah ditandatangani di Kairo, dengan nama Traktat Pelindaba (*Pelindaba Treaty*), serta kawasan

Asia Tenggara yang dikenal dengan Traktat Bangkok (*Bangkok Treaty*) ditandatangani pada 15 Desember 1995.

Tidak dapat dipungkiri bahwa dalam hal pengelolaan fasilitas nuklir, masalah pengamanan bahan nuklir mempunyai aspek yang sangat luas dan sangat strategis sebagai landasan pengembangan teknologi nuklir di manapun, baik dari aspek teknologi maupun aspek politis. Dikaitkan dengan situasi dunia saat ini, dimana komunitas internasional bersepakat untuk memerangi segala macam bentuk terorisme, maka bahan nuklir merupakan salah satu bahan yang mendapatkan perhatian khusus karena dapat disalahgunakan oleh kelompok teroris. Karena itu, diperlukan pengawasan internasional untuk menghindari kemungkinan buruk penyalahgunaan bahan nuklir maupun teknologi nuklir pada umumnya [3].

Pengawasan internasional yang dilakukan oleh IAEA lebih bersifat memantau kemungkinan diselewengkannya bahan nuklir tersebut di luar maksud-maksud damai. Pengawasan bahan nuklir meliputi sistem Pengendalian dan Pertanggungjawaban Bahan Nuklir yang secara populer dikenal dengan istilah Akuntansi Bahan Nuklir dan Sistem Proteksi Fisik, keduanya merupakan bagian penting dalam pengelolaan fasilitas nuklir. Istilah yang digunakan oleh IAEA untuk mengawasi penggunaan bahan nuklir adalah *safeguards*. Yang dimaksud bahan nuklir adalah bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan berantai atau bahan yang dapat diubah menjadi bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan berantai. Sedang yang dimaksud bahan bakar nuklir adalah bahan fisil atau fertil yang digunakan di reaktor untuk pembangkitan daya [55].

Sistem keamanan dan keselamatan lebih ditekankan lagi pada pengelolaan bahan fisil, khususnya bila dikaitkan dengan penggunaannya di luar maksud damai, misal untuk pembuatan senjata. Dengan demikian ada perbedaan dan persamaan antara bahan bakar nuklir dan bahan senjata nuklir. Persamaannya, keduanya menggunakan bahan fisil yang menghasilkan reaksi nuklir berantai. Perbedaan utamanya, sebagai bahan bakar nuklir, reaksi nuklir yang berlangsung bersifat terkendali

dalam reaktor nuklir, sedang untuk senjata nuklir reaksi berantai yang terjadi sengaja tidak dikendalikan.

Pada 1971, Dewan Gubernur IAEA telah menyetujui dokumen yang menjadi dasar bagi perjanjian *safeguards* secara menyeluruh atau *Comprehensive Safeguards Agreement (CSA)*. Sesuai konsep CSA, IAEA mempunyai hak dan kewajiban untuk meminta kepada suatu negara agar melaporkan semua kegiatan yang belum dilaporkan atau dianggap belum memuaskan. IAEA juga mempunyai hak yang tidak terbatas untuk meminta informasi dan hak untuk memasuki fasilitas atau suatu tempat yang telah dilaporkan oleh negara maupun tempat atau lokasi yang dianggap memiliki bahan nuklir tetapi tidak dilaporkan oleh negara tersebut sehingga dilakukan *inspeksi khusus* oleh IAEA. Sejak berlakunya NPT tampak sekali adanya jangkauan yang sangat berarti dalam pelaksanaan *safeguards* IAEA terhadap negara peserta NPT. Adapun bahan-bahan nuklir yang terkena *safeguards* IAEA adalah [3]:

- Bahan dapat belah khusus terutama ^{239}Pu , ^{235}U dan ^{233}U .
- Uranium yang mengandung campuran isotop secara alami, uranium yang kadar ^{235}U nya susut (uranium susut kadar) dan thorium.

Nilai strategis dan politis dari bahan nuklir mendorong perlunya diterapkan sistem proteksi fisik terhadap bahan tersebut. Pengawasan terhadap masalah keselamatan dan pengamanan bahan fisil akan semakin diperketat apabila suatu fasilitas nuklir mengelola bahan fisil sejumlah lebih dari satu *Significant Quantity (SQ)* atau melebihi batasan satu kilogram efektif [3]. Di atas batasan satu SQ ada kemungkinan bahan fisil dapat digunakan untuk tujuan pembuatan senjata. Batasan nilai SQ untuk plutonium adalah 8 kg, untuk uranium yang diperkaya dengan tingkat pengayaan di atas 20 persen adalah 25 kg U-235, untuk uranium-233 adalah 8 kg, dan untuk uranium dengan tingkat pengayaan di bawah 20 persen adalah 75 kg U-235.

Mengingat perkembangan dalam pemanfaatan teknologi nuklir yang terus meningkat dengan berbagai tujuan baik yang mengarah untuk

maksud damai maupun non-damai, maka tidak tertutup kemungkiam perangkat hukum dan peraturannya juga berkembang terus. Pada 1980 telah ditandatangani suatu peraturan yang menjadi standar internasional untuk melakukan proteksi terhadap bahan nuklir yang dikenal dengan *The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*. Proteksi fisik terhadap material nuklir juga dianggap sebagai elemen dasar bagi regim non-proliferasi, karena proteksi tersebut merupakan langkah yang dilakukan oleh masing-masing negara untuk menerapkan pencegahan atau menghalangi tindakan yang melawan hukum pada fasilitas nuklir dan bahan material nuklir. Penerapan sistem ini dapat dipakai untuk mencegah jatuhnya bahan nuklir tersebut ke tangan fihak yang tidak bertanggung jawab, seperti [3] :

- Penjahat, teroris serta kelompok revolusioner.
- Pemerintah atau negara yang mungkin akan menyalah gunakan bahan nuklir dengan mengalihkan tujuan pemakaian dari untuk maksud damai ke pembuatan senjata nuklir.

Dalam rangka pelaksanaan *safeguards* tadi, pemerintah suatu negara anggota NPT mewajibkan kepada penanggung jawab instalasi nuklir (sekaligus sebagai penanggung jawab bahan nuklir) untuk melaksanakan proteksi fisik yang ketat, dan melaksanakan peraturan pembukuan bahan nuklir serta melaporkan kepada yang berwenang atas setiap impor dan ekspor bahan nuklir. Sistem pelaporan ini dimaksudkan untuk mencegah terjadinya pencurian, kehilangan atau penyalahgunaan bahan nuklir dengan sengaja. Di samping itu, pemerintah juga secara rutin melakukan inspeksi bahan nuklir pada setiap instansi yang menggunakan bahan tersebut [55].

Terdapat dua tingkatan pengawasan terhadap bahan nuklir, pertama adalah pengawasan yang dilakukan Badan Pengawas di masing-masing negara, Untuk Indonesia dilakukan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), dan kedua adalah pengawasan internasional oleh IAEA. Dengan sistem pengawasan bertingkat ini maka kemungkinan adanya penyimpangan dalam pemanfaatan teknologi nuklir di luar maksud damai akan dapat lebih diperkecil. Negara-negara fihak NPT diharapkan

bertanggungjawab terhadap pengamanan bahan nuklir yang digunakan untuk kegiatan penelitian sehingga tidak disalahgunakan untuk maksud di luar ketentuan yang disepakati [3].

Pada 1992, saat berlangsung *The First Review Conference* di Wina, para peserta sidang menginginkan agar konvensi ini juga dilengkapi dengan kerangka kerja dalam rangka kerjasama internasional dengan tujuan untuk mencegah, memulihkan, dan menemukan kembali bahan nuklir yang telah dicuri, dengan memberikan sanksi hukum terhadap orang-orang yang telah melakukan tindakan kriminal terhadap bahan material nuklir. Melalui langkah ini, diharapkan bahwa salah satu sasaran pemanfaatan teknologi nuklir bagi kesejahteraan masyarakat dengan prinsip melindungi masyarakat secara luas dan lingkungan dapat dicapai dengan lebih baik [50].

Sebagai konsekuensi keikutsertaan suatu negara dalam menandatangani naskah NPT, IAEA juga melakukan inspeksi untuk meyakinkan bahwa suatu negara tidak menggunakan bahan nuklir untuk kegiatan yang menyimpang dari maksud damai, misal untuk pembuatan senjata nuklir atau bahan peledak lainnya. Ruang lingkup inspeksi ini meliputi reaktor nuklir dan bahan nuklir, zat radioaktif dan/atau sumber radiasi lainnya. Menurut perjanjian bilateral antara negara anggota NPT dengan IAEA sebagai pelaksana NPT itu, maka suatu negara harus mempunyai apa yang disebut SSAC (*State System of Accounting for and Control of Nuclear Material*). Berdasarkan perjanjian ini, inspektur dari IAEA akan mengadakan inspeksi secara rutin terhadap pemakaian bahan nuklir di fasilitas-fasilitas nuklir suatu negara.

Teknik pengukuran merupakan bagian penting dari *safeguards* untuk memperoleh data yang akurat, tepat dan cepat. Perolehan data seperti itu selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam sistem pembukuan dan digunakan sebagai salah satu tolok ukur keberhasilan dalam pelaksanaan *safeguards*. Teknologi dan peralatan yang digunakan dalam *safeguards* juga terus dikembangkan oleh IAEA. Salah satunya adalah pengawasan melalui pengambilan cuplikan lingkungan. Teknik ini telah diperkenalkan sejak 1966 sebagai salah satu metode pengawasan IAEA

untuk mengetahui keberadaan bahan nuklir atau kegiatan nuklir yang tidak diumumkan, misal uji coba senjata nuklir yang dirahasiakan. Melalui analisis terhadap cuplikan lingkungan, keberadaan unsur-unsur radioaktif yang dihasilkan dari proses ledakan senjata nuklir itu cukup mudah untuk dideteksi [3].

Traktat Pelarangan Menyeluruh Uji-coba Nuklir atau *Comprehensive Test Ban Treaty* (CTBT) adalah sebuah perjanjian internasional yang melarang semua kegiatan peledakan nuklir dalam semua lingkungan baik untuk tujuan militer maupun sipil. Perjanjian ini berhasil dirampungkan pada bulan Juni 1996 di Konferensi Perlucutan Senjata di Jenewa, namun baru dapat diadopsi oleh Majelis Umum PBB pada 10 September 1996, dan terbuka untuk ditandatangani pada 24 September 1996 di Markas Besar PBB. Pada waktu itu, perjanjian tersebut telah ditandatangani oleh 71 negara termasuk di dalamnya 5 dari 8 negara berkemampuan nuklir. Per 10 September 2006, perjanjian ini telah ditandatangani oleh 176 negara dan sudah diratifikasi oleh 135 negara. Traktat Pelarangan Menyeluruh Ujicoba Nuklir pada dasarnya merupakan perluasan dari PTBT (*Partial Test Ban Treaty*). Jika pada PTBT hanya melarang uji coba peledakan senjata nuklir di dalam laut, di permukaan tanah dan di atmosfer saja, maka pada CTBT pelarangan tersebut ditambah lagi dengan uji coba senjata nuklir di dalam tanah [51].

Untuk memantau atau mendeteksi adanya pelanggaran traktat, dibentuklah sebuah organisasi internasional yang bermarkas di Wina, Austria, yang bertugas untuk melakukan verifikasi. Organisasi yang bertugas dan bertanggung jawab dalam pelaksanaan CTBT itu adalah *Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation* (CTBTO). Sejak penandatanganan perjanjian tersebut, CTBTO telah berkembang demikian cepat melakukan program-program baik di bidang organisasi, administrasi maupun pelatihan yang diselenggarakan setiap tahun. Dalam rangka mengimplementasikan seluruh aturan-aturan yang ada dalam CTBT, organisasi ini menjalankan fungsi strukturalnya bekerja sama dengan IAEA, dan melakukan satu sistem pengawasan global dengan fasilitas-fasilitas pemantau dan inspeksi-inspeksi terhadap kejadian yang dianggap mencurigakan [51].

Pendeteksian adanya ledakan nuklir dilakukan dengan pendeteksian lewat seismometer, hidroakustik, infrasonik dan radionuklida. Sejumlah stasiun pendeteksian dibangun di seluruh pelosok bumi untuk keperluan ini. Keberadaan berbagai sistem monitoring baik dalam kapasitasnya sebagai stasiun seismografi, radionuklida, suara infra maupun hidroakustik yang dimiliki dan didaftarkan oleh negara pihak diintegrasikan menjadi sistem terpadu untuk mendeteksi indikasi kemungkinan dilakukannya uji coba peledakan senjata nuklir di seluruh penjuru dunia. Per Oktober 2006, sudah terintegrasi 321 stasiun monitor dan 16 laboratorium radionuklida di seluruh dunia [56].

Dalam rangka menyukseskan program CTBTO, Indonesia telah berpartisipasi mengikutsertakan enam stasiun seismografi milik Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) Departemen Perhubungan sebagai bagian dari Sistem Pemantauan Internasional atau *International Monitoring System (IMS)*. Keenam stasiun seismografi tersebut dibangun dan ditingkatkan kemampuannya sesuai standar IMS agar dapat digunakan sebagai stasiun pembantu untuk memantau adanya ledakan percobaan senjata nuklir. Keenam stasiun seismologi pelengkap itu berada di Cibinong (Jawa Barat), Jayapura (Papua), Sorong (Papua), Parapat (Sumatera), Kappang (Sulawesi Selatan) dan Kupang (Nusa Tenggara Timur).

BAB 7

PENUTUP

Telah dilakukan pembahasan mengenai jejak bagian awal dari perjalanan teknologi nuklir. Pembahasannya dimulai dari upaya paling awal umat manusia untuk mengungkap jati diri suatu atom, yang saat itu diasumsikan sebagai bagian terkecil dari semua materi penyusun alam semesta. Upaya pengenalan terhadap materi penyusun alam semesta ini dalam perjalanan panjang berikutnya ternyata mengantarkan ke arah lahirnya teknologi nuklir. Didukung oleh hasil penelitian fisikawan-fisikawan ternama, atom yang semula masih berupa konsep dan belum terdefinisikan secara pasti itu akhirnya melahirkan suatu teknologi yang dipakai untuk memproduksi senjata nuklir, yang kedahsyatannya dipertontonkan pada penghujung akhir Perang Dunia II.

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. Uji coba senjata nuklir yang berlangsung secara intensif antara periode 1946-1980 telah menimbulkan kekhawatiran internasional akan terulangnya perang nuklir. Perundingan perlucutan senjata nuklir yang digalang oleh Amerika Serikat dan Rusia sedikitpun tak mengurangi minat negara-negara tertentu untuk memiliki senjata nuklir sendiri.

Bermula dari pengalaman itulah istilah nuklir oleh masyarakat awam seringkali dikaitkan dengan senjata untuk perang. Cacat bawaan yang muncul sejak kelahiran teknologi nuklir telah memberikan dampak psikologis dalam memori kolektif masyarakat awam yang sangat sulit untuk dilupakan. Bertitik

tolak dari bayang-bayang ancaman senjata nuklir tadi, maka tidak jarang di antara kita menolak teknologi nuklir dalam bentuk apapun tanpa mau melihat lebih jauh untuk tujuan apa teknologi nuklir tersebut. Gerakan internasional yang semula digalang untuk menentang uji coba dan proliferasi senjata nuklir, akhirnya merebak menjadi gerakan anti dengan segala sesuatu yang berbau nuklir.

Namun perjalanan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir ternyata tidak berhenti hanya sampai di bom atom saja. Manusia tertantang untuk memanfaatkan energi maha dahsyat yang keluar dari inti atom itu untuk kepentingan kemanusiaan. Lahirlah slogan baru *nuke for peace* atau nuklir untuk perdamaian yang diprakarsai oleh IAEA. Ada banyak manfaat yang dapat dinikmati oleh umat manusia di muka bumi ini jika teknologi nuklir dimanfaatkan secara benar.

Traktat Non-Proliferasi merupakan tonggak utama bagi pencegahan penggunaan senjata nuklir di dunia. Sejak mulai diberlakukan, NPT dianggap telah berhasil menjadi landasan utama bagi keamanan global, dan hingga kini telah mengikat 189 negara berdaulat menjadi negara pihak yang bersedia meratifikasi NPT. Badan Tenaga Atom Internasional dibentuk dengan salah satu tugasnya adalah untuk mengawasi dan mengatur pengembangan serta perluasan teknologi dan bahan nuklir. Melalui pengawasan internasional yang sangat ketat, upaya proliferasi senjata nuklir dapat dihindari, sehingga bayang-bayang ancaman perang nuklirpun bisa dipupus. Kehadiran teknologi nuklir dapat memberi banyak manfaat bagi kehidupan tanpa adanya bayang-bayang menakutkan ancaman perang nuklir yang dapat memusnahkan kehidupan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Depth Study World War II (1939–1945). Australian Curriculum. Oxford: Philip Wilson Publishing Ltd; 2003.
2. Barretto P, Rogov A. Pillars for development, technology transfer facts & trends. IAEA Bulletin. Vienna; 2000; 42 (1): 50-56.
3. Yuwono I. Peranan pengamanan bahan nuklir dalam pengembangan teknologi nuklir di Indonesia. Pidato pengukuhan ahli peneliti utama bidang teknologi nuklir. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional, Pusat Teknologi Pengembangan Bahan Nuklir, 2002.
4. Santoso, RSI. Kapita selecta sejarah perkembangan ilmu pengetahuan. Jakarta: Sinar Hudaya, 1977.
5. Wospakrik HJ. Dari atomos hingga quark. Jakarta 12210: Penerbit Universitas Atma Jaya/Kepustakaan Populer Gramedia, Mei 2005.
6. Walker FW. Nuclides and isotopes. 14th ed. California 95125: GE Nuclear Energy, 1989.
7. Standen A. Daftar berkala, Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 4. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; 139-161.
8. Andraos J. Names of scientists associated with discoveries of elements of periodic table. Ontario: Department of Chemistry, York University, 2014.
9. Young HD, Freedman RA. University Physics. 9th ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1998.
10. Taylor JR, Zafiratos CD. Modern physics for scientist and engineers. New Jersey 07632: Prentice Hall, Engelwood Cliffs, 1991.
11. Sutton C. Ninety years around the atom. New Scientist 1987 Jan 8; 49-53.
12. Arnikar HJ. Essentials of nuclear chemistry. 4th ed. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers, 1996.
13. Gautreau R, Savin W. Fisika modern. Terjemahan oleh Hans J. Wospakirk. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga, 1995.
14. Krane KS. Fisika modern. Terjemahan oleh Hans J. Wospakrik & Sofia

- Niksolihin. Jakarta 10430: Penerbit Universitas Indonesia, 1992.
15. Halliday D, Resnic R., Fisika modern . Alih bahasa oleh P. Silaban. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga, 1990.
 16. Cohen BL. Concept of nuclear physics. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., 1982.
 17. Alonso M, Finn EJ. Fundamental university physics volume III. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1980.
 18. Nitschke M. The discreet charm of exotic nuclei. New Scientist 1989 Feb 10; 55-59.
 19. Kaplan I. Nuclear physics. 2nd ed. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1979.
 20. Lowman Jr PD. Geologi Bulan. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 4. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; 22-33.
 21. Nagane Y, Hirata M. Production and properties of transuranium elements. Radiochim Acta 99; 2011: 1-17.
 22. Oganessian YT, Hamilton JH, Utyonkov VK. Discovery of the new element $Z=117$ and confirmation of 115. EPJ Web of Conferences 17, 02001. Published by EDP Sciences, 2011.
 23. Wapstra AH. Criteria that must be satisfied for the discovery of a new chemical element to be recognized. Amsterdam: Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica, 1991.
 24. Watson GW. A brief history of element discovery, synthesis, and analysis. India: Open Knowledge Foundation Network, 2011.
 25. Friedlander G. Nuclear and radiochemistry. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.
 26. Balchin J. Quantum leaps, 100 ilmuwan besar paling berpengaruh di dunia. Jakarta Selatan 12520: Ufuk Press, Maret 2012.
 27. A Brief History of Radiation. Los Alamos Science Number 23; 1995: 116-123.
 28. Hart MH. Seratus tokoh yang paling berpengaruh dalam sejarah. Cet ke-15. Terjemahan oleh Mahbub Djunaedi. Jakarta: Pustaka Jaya, 1995.

29. Birch B. Marie Curie. Alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1993.
30. Wilopo AC. Editor. Seabad pemenang hadiah nobel fisika. Jakarta: Abdi Tandur, 2002.
31. Chember H. Introduction to health physics. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1987.
32. Herman A. The new physics, the route into atomic age. Federal Republic of Germany: International Bonn-bad Godesberg, 1979.
33. Macdonald F. Albert Einstein. Alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1996.
34. Taylor A. Buku-buku yang mengubah dunia. Jakarta: Penerbit Erlangga, 2011.
35. Allison SK. Enrico Fermi 1901—1954. Washington DC: National Academy Of Sciences, 1995.
36. The History of Nuclear Energy. Washington DC: US Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 1990.
37. Schumann P. The Making of the Atomic Bomb. Tersedia di: <http://www.scribd.com/doc/123028151/The-Making-of-the-Atomic-Bomb#> scribd. Dikunjungi: 04 Pebruari 2015.
38. Simatur Z. Surat-Surat yang mengubah dunia, dari surat Kubilai Khan sampai surat Einstein. Jakarta Selatan 12630: Visimedia, 2010.
39. The First Reactor. Washington DC 20585: US Department of Energy, December 1982.
40. Gosling FG. The Manhattan project, making the atomic bomb. United States Department of Energy: National Security History Series, January 2010.
41. Pendrill, AMM. The Manhattan project—a part of physics history, physics education 41(6). New York: IOP Publishing Ltd, November 2006.
42. Jihui Q, Tisue T, Volkoff A. Atoms for peace, targetting technical cooperation for result. IAEA Bulletin; 2000 Mart; 42 (1): 30-41.
43. Paths to a new century. IAEA Bulletin; 2000; 42(4): 22-26.
44. Semenov BA, Dastidar P, Kupitz J, Goodjohn A. Growth Projections and development trends for nuclear power. IAEA Bulletin; 1989; 31(3): 6-12.

45. Nuclear weapons: a comprehensive study, report of the secretary-general United Nation. New York: Department for Disarmament Affairs, 1991.
46. Ochran TB, Paine CE. The amount of plutonium and highly-enriched uranium needed for pure fission nuclear weapons. Washington DC 20005: Natural Resources Defence Council Inc, April 1995.
47. Koulouri C. Editor. The Second World War. 2nd ed. Thessaloniki: Kresimir Erdelja Series , 2009.
48. Todd A. The cold war. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
49. Charnysh V. A brief history of nuclear proliferation. London: Nuclear Age Peace Foundation, 2009.
50. Aust A, Asada M, Iffit E, Kyriakopoulos N, Mackby J, et al. A new look at the comprehensive nuclear-test-ban treaty (CTBT). Netherlands Institute of International Relations Clingendael: International Group on Global Security (IGGS), September 2008).
51. Safeguards to prevent nuclear proliferation. World Nuclear Association website. Tersedia di: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/non-proliferation/safeguards-to-prevent-nuclear-proliferation.aspx>. Dikunjungi: 03 Maret 2015.
52. Kristensen HM. U.S. nuclear weapons in Europe a review of post-cold war policy, force levels, and war planning. Washington DC: Natural Resources Defence Council, February 2005.
53. Ballistic and cruise missile threat. Watson Way Wright-Patterson AFB: NASIC Public Affairs Office NASIC/CVH, April 2009.
54. Yusuf M. Predicting proliferation: the history of the future of nuclear weapons. Policy Paper Number 11. Boston: Boston University, January 2009.
55. Flakus FN, Johnson L. Binding agreements for nuclear safety: the global legal framework. IAEA Bulletin; 1990; 450(2): 21-26.
56. Davenport K, Taylor M. Assessing progress on nuclear nonproliferation and disarmament. US Department of Defence: Arms control association report. Updated Report Card 2010–2013.

INDEKS

A

- Atom 1-4, 6-26, 30-42, 42, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 145, 147-150
- Atom for Peace* 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 111, 114-115, 120, 124, 129, 139-145
- Atomic massa unit, u* 1-4, 6, 7-26, 30-42, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 114-114, 120, 124, 129, 139-145.

B

- Badan Pengawas Tenaga Nuklir 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 134, 139-145
- Badan Tenaga Atom Internasional 1-4, 6-26, 30-42, 47-55, 56-69, 71-71, 76-81, 83-84, 86-89, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 118, 120, 124, 129, 139-141, 145, 151
- Bahan fertil 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-96, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 136-141, 164
- Bahan fisil 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 146
- Bahan moderator 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 146
- Bahan radioaktif 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 146
- Batang kendali 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 146
- Becquerel, Antoine Henry 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 146
- Blok Barat 1-4, 6-26, 30-42, 45, 47-55, 57-69, 71-72, 76-81, 83-84, 86-87, 89-90, 94-95, 99-102, 105-106, 109, 114-115, 120, 124, 129, 139-141, 147
- Blok Timur 113-115, 139, 147
- Bohr, Niels H. 113-115, 139, 147
- Bom atom 113-115, 139, 147
- Bom hidrogen 114-115, 147
- Bom neutron 114, 147
- Briggs Committee* 86, 92, 114, 147

C

- Cadmium, Cd 114
- Chadwick, Sir James 114
- CTBT 114, 136, 144
- CTBTO 114, 136, 137
- Curie, Marie 114
- Curie, Pierre 114

D

- Daftar berkala 24, 29, 114, 141

Dalton, John 114
Demokritos 5, 7, 8, 9, 114

E

Einstein, Albert 114
Elektron 18, 30, 52-52, 114
Elektron-Volt, eV 114
Elektroskop 114
Energi inti 114

F

Fasilitas nuklir 114
Fat Man 1, 106, 114
Fermi, Enrico 114
Film fotografi 114
Fisika nuklir 114
Fisi berantai 114
Fisi berantai tak terkendali 114
Fisi berantai terkendali 114
Fisi uranium 114
Fluoresensi 43, 114
Foton elektromagnetik 114
Frisch, Otto Robert 114

G

Garam uranium 43, 114
Gejala radioaktivitas 48, 114
Gerakan anti nuklir 114
Grafit 114

H

Hadiah Nobel 20, 72, 114
Hahn, Otto 114
Hipotesa proton-elektron 31, 114
Hiroshima 1, 3, 105-106, 110-111, 114-115, 117-118, 124

I

IAEA, *International Atomic Energy Agency* 2, 114
Inti atom 1, 16, 48, 71, 83, 114
Inti atom gabungan 114
Inti helium, He 114
Isobar 114
Isoton 66, 114
Isotop 63, 65, 67, 96, 99, 114

K

Kecepatan cahaya 114
Keseimbangan massa-energi 114
Kestabilan inti atom 114
Kulit atom 114

L

Little Boy 1, 105, 114
Los Alamos 93, 114, 142

M

Model atom 14, 17, 19-21, 114
Model atom Dalton 114
Model atom mekanika kuantum 114
Model atom Rutherford 114
Model atom Rutherford-Bohr 114
Model Atom Thomson 114

N

Nagasaki 1, 3, 65, 106, 109-111, 114-115, 117-118
Neutron 51, 62, 76, 78-79, 94-95, 97, 99, 114-115
Nomor atom 39, 114
Nomor massa 39, 114
Nukliida 63, 65, 114
Nukliida stabil 114
Nukliida tak stabil 114

O

Orbit electron 114

P

Partikel alfa 15, 54-55, 77, 114
Peluruhan 49, 101, 114
Peluruhan radioaktif 114
Polonium, Po 114
Positron 55, 56, 114
Proton 32, 51, 114

R

Radiasi pengion 49, 114
Radioaktivitas 42, 114
Radioisotop 65, 114
Radionukliida 68, 114
Radionukliida alamiah 114
Radionukliida buatan 114
Radium, Ra 114
Rutherford, Ernest 114

S

Sinar alfa 114
Sinar Becquerel 114
Sinar beta 55, 114
Sinar gamma 56, 57, 114
Sinar radioaktif 114
Sinar-X 114
Spektrograf massa 114
Struktur atom 36, 114

Struktur inti atom 114

T

Teknologi nuklir 4, 114

Teori atom 8, 10, 18, 20, 114

Teori atom Bohr 18, 114

Thomson, Joseph J. 114

Thorium, Th 114

U

Umur paro 99, 114

Unsur radioaktif 114

Uranium-235, U-235 114

Uranium-238, U-238 114

Y

Yunani purba 5-6, 114

BIOGRAFI 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).

Mewakili BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standars* (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. Banyak menulis artikel ilmiah populer dan ilmiah semipopuler di berbagai media cetak nasional. Pernah menjadi dosen tetap pada jurusan teknik mesin, teknik elektro dan teknik sipil Sekolah Tinggi Teknik (STT)-PLN di Jakarta.

Telah menulis empat buku dengan judul: Pengantar Teknologi Nuklir (Penerbit PT Rineka Cipta, Jakarta 1997), Dasar-Dasar Proteksi Radiasi (Penerbit PT Rineka Cipta, Jakarta 2000), Ekologi Energi: *Mengenal Dampak Lingkungan dari Penggunaan Sumber-Sumber Energi* (Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta 2009), dan *Isu Lingkungan Hidup: Mewaspada Dampak Kemajuan Teknologi dan Polusi Lingkungan Global yang Mengancam Kehidupan* (Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta 2014).

JEJAK PERJALANAN TEKNOLOGI NUKLIR

Dari Konsep Atomos hingga
Traktat non-Proliferasi

Banyak usaha telah dilakukan umat manusia untuk menggambarkan sekaligus memahami hakekat materi pengisi jagad raya ini. Upaya untuk mengungkap jati diri materi itu paling tidak sudah dilakukan sejak 2500 tahun silam oleh para filosof Yunani Kuno. Dari upaya itu lahirlah konsep tentang atom, yaitu bagian terkecil penyusun materi yang sudah tidak dapat dibagi-bagi lagi. Para ilmuwan telah menempuh perjalanan begitu panjang dalam kurun waktu hingga ratusan tahun untuk mendapatkan gambaran yang lebih detil tentang hakekat atom.

Dari perjalanan yang demikian panjang itu, akhirnya sampallah pada suatu saat dimana pemahaman manusia tentang atom melahirkan teknologi yang mampu memproduksi senjata nuklir. Atom yang semula ingin diketahui karena merupakan bagian dari kehidupan, akhirnya menjelma menjadi ancaman bagi kehidupan umat manusia. Namun interaksi manusia dengan teknologi nuklir ternyata tidak berhenti hanya sampai di senjata untuk perang saja. Manusia tertantang untuk memanfaatkan energi maha dahsyat yang keluar dari inti atom untuk kepentingan kemanusiaan. Lahirlah upaya dari masyarakat internasional untuk mencegah terulangnya penggunaan senjata nuklir.

Buku yang sedang ada di tangan pembaca ini mengupas sepenggal kisah bagian awal perjalanan teknologi nuklir. Pembahasannya dimulai dari perjalanan sejarah upaya manusia memburu atom. Pembaca akan dibawa untuk mengenali atom beserta fenomena-fenomena fisika yang dapat terjadi di dalamnya. Selanjutnya pembaca akan diperkenalkan dengan sejarah awal kelahiran teknologi nuklir hingga situasi politik dunia yang mendorong lahirnya senjata nuklir. Pembahasannya diakhiri dengan upaya masyarakat internasional untuk memupus ancaman perang nuklir melalui Traktat non-Proliferasi yang melarang penyebaran senjata nuklir. Selesai membaca buku ini diharapkan akan muncul gambaran obyektif tentang teknologi nuklir yang sejatinya tidak perlu ditakuti. Aplikasi teknologi nuklir secara benar dapat memberi banyak manfaat bagi kehidupan umat manusia. Selamat membaca.

