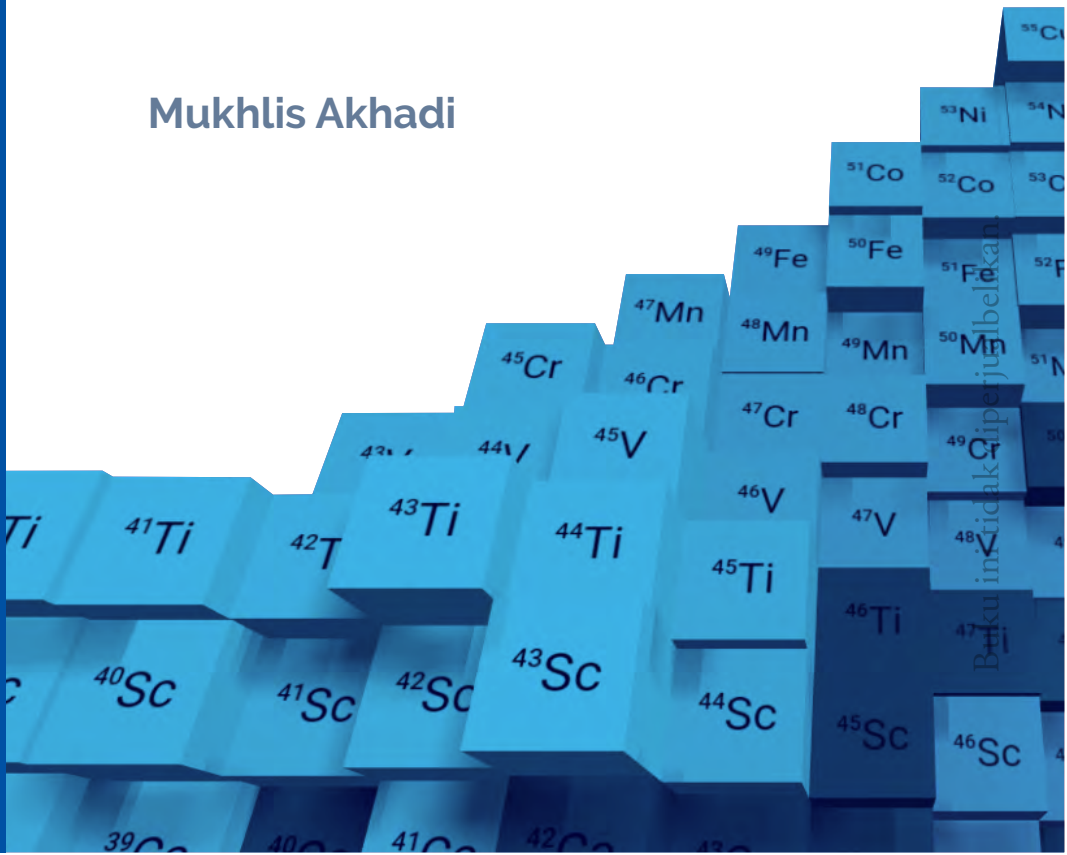




MEMBACA PETA NUKLIDA

Mukhlis Akhadi



MEMBACA PETA NUKLIDA



Buku ini tidak diperjualbelikan.

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 Rights Reserved

Buku ini tidak diperjualbelikan.

MEMBACA PETA NUKLIDA

Mukhlis Akhadi



BATAN PRESS

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2020 Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Pusat Diseminasi dan Kemitraan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Mukhlis Akhadi

Membaca peta nuklida / Mukhlis Akhadi ; editor, Evvy Kartini.--
Jakarta : BATAN Press (Badan Tenaga Nuklir Nasional Press),
2019.

xvi+160 hlm. ; 21 cm

Bibliografi : hlm. 147

Indeks : hlm. 153

ISBN 978-623-7425-06-9

1. Nuklida -- Struktur. I. Judul. II. Evvy Kartini.

539.74

Copyeditor : Ferhat Aziz
Proofreader : Ferhat Aziz & Theresia E. W
Desainer sampul & isi : Theresia E. W

Cetakan pertama 2020



Diterbitkan oleh:

BATAN Press, anggota IKAPI
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49
Gd. Perasten, Jakarta Selatan 12440
Telp.: +62 21 765 9401
Faks.: +62 21 7591 3833
E-mail: batanpress@batan.go.id

Buku ini merupakan karya buku yang terpilih dalam Program Akuisisi Pengetahuan Lokal Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah, Badan Riset dan Inovasi Nasional.



Karya ini dilisensikan di bawah Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

PENGANTAR PENERBIT

Setelah Frederic Soddy menemukan isotop radioaktif dan JJ Thomson memberikan bukti keberadaan isotop stabil, penggunaan tabel periodik untuk menggambarkan atom-atom tidak lagi mencukupi. Teknik penyajian atom-atom kemudian beralih dalam bentuk peta nuklida yang di susun pada tahun 1930-an dan terus diperbaharui mengikuti perkembangan penelitian di bidang fisika nuklir. Bagi komunitas sains nuklir, peta nuklida memiliki peran penting seperti halnya tabel periodik. Karena melalui peta inilah, data-data yang diperlukan untuk studi radioaktivitas lingkungan, radiokimia, fisika lingkungan dan kesehatan atau bidang terkait lainnya, dapat diperoleh.

Buku berjudul “Membaca Peta Nuklida” diharapkan dapat mempermudah pembaca dalam mengeksplorasi peta nuklida, termasuk bagaimana menggali informasi mengenai nuklida dan karakteristiknya. Secara umum, buku ini terbagi menjadi tiga bagian utama, yakni struktur atom untuk mempermudah pembaca dalam memahami konsep nuklida, proses transmutasi inti untuk menghasilkan nuklida-nuklida baru dan melahirkan kebutuhan untuk memetakan nuklida secara komprehensif, ditutup dengan bahasan mengenai peta nuklida yang berfokus pada peta nuklida dan cara-cara untuk mendapatkan informasi suatu nuklida dari peta tersebut. Berbagai contoh peristiwa fisika yang dapat dijelaskan oleh peta nuklida.

Buku ini juga dapat menjadi referensi bagi kalangan akademisi, khususnya yang berkaitan dengan ilmu-ilmu fisika dan khususnya fisika nuklir. Sentuhan sejarah perkembangan fisika nuklir, khususnya pada bagian awal buku, menjadikan buku ini mudah dipahami dan menarik untuk dibaca berbagai kalangan. Akhir kata, semoga penerbitan buku ini dapat memperkaya literatur sains dan teknologi nuklir yang masih sangat jarang di Indonesia dan meningkatkan kecintaan masyarakat terhadap sains, dan khususnya nuklir.

Penerbit

Buku ini tidak diperjualbelikan.

KATA PENGANTAR

Ketika pemahaman manusia terhadap materi penyusun alam semesta ini masih berada pada level yang sangat sederhana, Empedokles (500-440 Sebelum Masehi), seorang filsuf Yunani kuno yang hidup di Agrigentum, Sisilia, mengajarkan bahwa ada empat materi dasar penyusun alam, yaitu: tanah, udara, api dan air. Catatan sejarah ini menunjukkan bahwa ketertarikan manusia terhadap materi yang ada di sekitarnya sudah berlangsung sejak lebih dari 2.500 tahun silam.

Jika tinjauan kita tentang materi loncat dari abad ke-5 Sebelum Masehi ke permulaan abad ke-19 Masehi, maka pemahaman para ilmuwan terhadap materi juga telah mengalami loncatan hingga ke level penyusun materi terkecil, yaitu atom. Teknik pengelompokan unsur-unsur kimia pun terus berkembang seiring dengan perkembangan ilmu kimia yang ditandai dengan penemuan unsur-unsur baru. Perkembangan dalam bidang ini akhirnya mengantarkan para ilmuwan dapat membedakan materi berdasarkan unsur-unsur penyusun terkecilnya, yaitu atom.

Perkembangan penting dalam bidang kimia terjadi ketika Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) dari Rusia pada 1869 menemukan pola alami tertentu dengan keteraturan yang mendasari perbedaan sifat-sifat berbagai unsur kimia. Lahirlah Tabel periodik unsur-unsur yang mampu membedakan berbagai jenis unsur dan menyajikannya ke dalam sebuah

tabel yang cukup mudah untuk dipelajari. Berbagai upaya penyempurnaan akhirnya mengantarkan para ilmuwan berhasil menghadirkan tabel periodik modern yang masih digunakan hingga saat ini, terutama dalam bidang kimia.

Perkembangan penelitian dalam bidang fisika ternyata memberi warna lain pemahaman para ilmuwan terhadap materi. Dengan spektrograf massa para ilmuwan berhasil mengidentifikasi adanya unsur-unsur sejenis yang memiliki massa berbeda. Banyak unsur kimia diketahui memperlihatkan fenomena seperti itu. Artinya, banyak unsur kimia yang hadir di alam ini dapat membentuk berbagai macam isotop, yaitu unsur sejenis namun massanya berbeda-beda karena perbedaan kandungan neutron di dalam intinya.

Selain penemuan isotop, penelitian dalam bidang fisika nuklir juga berhasil menghadirkan inti-inti atom buatan melalui proses transmudasi inti. Jika pada saat Mendeleev menyusun tabel periodik baru dikenal adanya 70 jenis unsur kimia, kemudian ilmu pengetahuan modern berhasil menemukan unsur-unsur lain sehingga jumlahnya menjadi 92 unsur, maka proses transmudasi inti melalui fisi uranium-235 berhasil menghadirkan 11 unsur buatan baru sehingga jumlah unsur dalam tabel periodik menjadi 103 unsur. Setelah itu, dengan memanfaatkan alat pemercepat partikel, para ilmuwan berhasil menghadirkan unsur-unsur transuranium sehingga jumlah unsur yang terdaftar pada tabel periodik modern pada awal abad 21 mencapai 112 jenis unsur, terdiri atas unsur-unsur alamiah dan buatan.

Meski baru mengenal adanya 112 jenis unsur, namun karena banyak di antara unsur-unsur itu dapat membentuk berbagai jenis isotop, maka kini umat manusia telah berhasil mengenali sekitar 1440 macam isotop, 340 di antaranya terdapat di alam dan sekitar 1100 diproduksi di laboratorium, reaktor nuklir dan ledakan senjata nuklir. Beragamnya jenis unsur beserta isotop-isotopnya itu ternyata tidak dapat ditampilkan secara bersamaan dalam tabel periodik modern.

Karena itu diperlukan cara lain untuk menyajikan berbagai jenis unsur beserta isotop-isotopnya dalam satu bentuk sajian yang terpadu, sehingga karakteristik dari unsur-unsur itu dapat dibedakan dan dikenali secara baik. Untuk keperluan tersebut, para ilmuwan telah menghadirkan cara penyajian data unsur beserta isotop-isotopnya dalam bentuk peta nuklida.

Buku dengan judul Membaca Peta Nuklida ini menyajikan bahasan terkait dengan teknik penyajian unsur-unsur beserta isotop-isotopnya dalam suatu peta nuklida. Melalui buku ini, pembaca dapat memperoleh gambaran tentang perkembangan ilmu pengetahuan yang melatarbelakangi perlunya teknik penyajian unsur-unsur dalam peta nuklida. Selanjutnya, pembaca dapat menggali berbagai informasi yang terkandung dalam peta nuklida guna mendapatkan data karakteristik suatu nuklida yang banyak dimanfaatkan dalam studi baik dalam bidang kimia maupun fisika nuklir. Ada banyak informasi yang dapat digali dari peta nuklida. Pemahaman yang baik terhadap cara membaca peta nuklida dapat mempermudah seseorang dalam menemukan informasi data mengenai suatu nuklida.

Penulis menyadari 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 membantu dalam meningkatkan pemahaman terhadap peta nuklida bagi siapa saja yang memerlukannya.

Tangerang Selatan, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR PENERBIT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Reayasa Materi.....	2
1.2. Hakekat Materi.....	4
1.3. Materi Terkecil	6
BAB 2. STRUKTUR ATOM.....	9
2.1. Penemuan Elektron.....	10
2.2. Muatan Elektron	15
2.3. Perkembangan Model Atom	18
2.4. Inti Atom	26
BAB 3. TRANSMUTASI INTI.....	35
3.1. Peluruhan Inti Radioaktif.....	37
3.2. Transmutasi dengan Proyektil.....	47
3.2.1. Transmutasi dengan Partikel Alfa.....	47
3.2.2. Transmutasi dengan Neutron	49

3.3. Pemanfaatan Akselerator.....	55
3.4. Radioaktivitas Buatan	60
3.5. Reaksi Fisi	64
3.6. Reaksi Fusi.....	71
BAB 4. TABEL PERIODIK	81
4.1. Penemuan Sifat Berkala.....	82
4.2. Sistem Periodik Modern.....	85
4.3. Menghadirkan Unsur Hilang.....	90
4.4. Unsur Transuranium	98
BAB 5. PETA NUKLIDA.....	105
5.1. Mengenal Isotop	106
5.2. Teknik Penyajian Nuklida	111
5.4. Model Transmutasi Inti.....	131
5.5. Data Nuklir Lain.....	137
BAB 6. PENUTUP	143
DAFTAR PUSTAKA	147
INDEKS	153
BIODATA PENULIS.....	159

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. Radionuklida anggota deret uranium (deret $4n + 2$)	125
Tabel 5.2. Radionuklida anggota deret thorium (deret $4n$)	127
Tabel 5.3. Radionuklida anggota deret actinium (deret $4n + 3$)	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Bagan percobaan Joseph J. Thomson untuk mengukur nilai e/m partikel sinar katoda	11
Gambar 2.2.	Lintasan gerak partikel bermuatan di dalam medan magnet homogen (arah medan magnet keluar bidang kertas)	13
Gambar 2.3.	Bagan peralatan percobaan tetes minyak rancangan Robert A. Millikan untuk mengukur muatan elementer	17
Gambar 2.4.	Model atom yang diusulkan oleh Joseph J. Thomson.....	19
Gambar 2.5.	Skema percobaan hamburan partikel alfa untuk menguji model atom Thomson.....	20
Gambar 2.6.	Model atom yang diusulkan oleh Ernest Rutherford dan disempurnakan oleh Niels Bohr	25
Gambar 2.7.	Rangkaian percobaan untuk menyelidiki neutron	30
Gambar 2.8.	Model untuk menggambarkan lebih detail struktur atom	33
Gambar 3.1.	Jenis-jenis radiasi yang dipancarkan oleh inti atom radioaktif	41
Gambar 3.2.	Kondisi atom yang tereksitasi	46

Gambar 3.3. Proses produksi neutron dengan mesin akselerator	53
Gambar 3.4. Proses moderasi neutron cepat menjadi neutron thermik	54
Gambar 3.5. Transmutasi inti atom boron-11 oleh proton ...	60
Gambar 3.6. Proses fisi inti atom uranium-235	68
Gambar 3.7. Proses fusi 3 inti ^4He membentuk inti ^{12}C	80
Gambar 4.1. Tabel periodik yang pertama kali disusun oleh Dmitri Ivanovich Mendeleev tahun 1869.....	84
Gambar 4.2. Tabel periodik modern	86
Gambar 4.3. Perjalanan keberadaan atom technetium-99 di alam.....	94
Gambar 4.4. Peluruhan inti promethium-145.....	97
Gambar 5.1. Struktur atom isotop-isotop ^5Li dengan 3 proton dan 2 neutron, ^6Li dengan 3 proton dan 3 neutron dan ^7Li dengan 3 proton dan 4 neutron	107
Gambar 5.2. Teknik penyajian sebaran unsur beserta isotop-isotopnya pada peta nuklida tipe $N-Z$ (atas) dan tipe $Z-N$ (bawah)	113
Gambar 5.3a. Deretan nuklida-nuklida membentuk isotop.....	115
Gambar 5.3b. Deretan nuklida-nuklida membentuk isoton.....	115
Gambar 5.3c. Deretan nuklida-nuklida membentuk isobar	116
Gambar 5.4. Distribusi radionuklida pada peta nuklida dan pola peluruhannya	118
Gambar 5.5. Denah posisi nuklida baru hasil peluruhan relatif terhadap posisi radionuklida induk	120

Gambar 5.6. Sebaran radionuklida di sekitar lembah kestabilan untuk $Z = 1$ sampai dengan 10	121
Gambar 5.7. Potongan peta nuklida yang menyajikan unsur-unsur berat.....	122
Gambar 5.8. Proses kehadiran unsur transuranium dengan $Z = 93$ sampai dengan 96	123
Gambar 5.9. Skema peluruhan deret uranium	126
Gambar 5.10. Skema peluruhan deret thorium	128
Gambar 5.11. Skema peluruhan deret actinium	130
Gambar 5.12. Denah lokasi inti baru relatif terhadap inti asal yang menyerap atau melepaskan berbagai jenis partikel atau inti ringan.....	132
Gambar 5.13. Denah lokasi inti baru dalam peta nuklida relatif terhadap inti asal yang melakukan berbagai jenis transmudasi inti seperti tertulis dalam kotak	133
Gambar 5.14. Potongan peta nuklida yang menampilkan nuklida Na dan Al	134
Gambar 5.15. Potongan peta nuklida untuk posisi atom Li, B, dan C	137
Gambar 5.16. Penyajian data nuklir dalam kotak-kotak peta nuklida	139
Gambar 5.17. Potongan peta nuklida untuk atom helium	140
Gambar 5.18. potongan peta nuklida yang menyajikan radionuklida hasil fisi	141

BAB 1

PENDAHULUAN

Dalam pengertian yang sangat sederhana, materi didefinisikan sebagai sesuatu yang mengisi ruangan dan memiliki massa [1]. Batu, kayu, besi, air, udara, dan sebagainya adalah wujud yang berbeda-beda dari sesuatu yang disebut materi. Materi merupakan salah satu kebutuhan hidup manusia sepanjang zaman. Sejak zaman prasejarah, kehidupan manusia sudah berhubungan dengan berbagai jenis materi yang dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti untuk membuat peralatan berburu, bertani, bangunan tempat tinggal, transportasi, mengolah produk makanan, dan sebagainya.

Perkembangan peradaban manusia juga bisa diukur dari kemampuannya mengolah materi untuk memenuhi berbagai kebutuhan hidupnya [2]. Pada tahap awal, manusia hanya memanfaatkan bahan apa adanya sebagaimana yang telah disediakan di alam tanpa proses lebih lanjut. Batu, perunggu, dan besi menandai kehidupan tradisional tiga zaman untuk mengklasifikasikan budaya prasejarah. Para arkeolog melakukan penelitian kehidupan manusia zaman prasejarah melalui berbagai analisis terhadap hasil kebudayaan yang ditinggalkan atau analisis terhadap corak kehidupannya. Berdasarkan hasil analisis terhadap peninggalan kebudayaan, kehidupan zaman prasejarah dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zaman batu dan zaman logam.

1.1. Rekayasa Materi

Zaman batu adalah suatu periode ketika peralatan untuk aktivitas hidup manusia secara dominan dibuat dari batu. Pada zaman ini alat-alat yang dihasilkan masih sangat kasar dan bentuknya sangat sederhana. Pemanfaatan bahan dari batu dimaksudkan sebatas untuk memenuhi kebutuhan hidup saja, seperti peralatan untuk berburu binatang berupa kapak genggam. Dari zaman batu dikenal juga peninggalan prasejarah berupa batu-batu prasasti berukuran besar, seperti meja batu, sebagai tempat menaruh sesaji atau tugu untuk memuja arwah leluhur [3].

Zaman Perunggu mengacu pada periode waktu masyarakat prasejarah di mana metalurgi telah maju ke titik pembuatan perunggu [4]. Zaman ini berada di antara zaman batu dan zaman besi. Dari zaman perunggu ditemukan berbagai peninggalan hasil kebudayaan yang dibuat dari perunggu, baik peninggalan itu berupa alat-alat yang digunakan untuk menunjang aktivitas kehidupan maupun peninggalan yang sifatnya berbentuk benda budaya atau barang seni [2,3]. Zaman Perunggu tertua dimulai 5500 Sebelum Masehi (SM) di daerah yang kini merupakan wilayah Turki, Iran, dan Irak, yang juga menjadi tempat lahir peradaban manusia. Zaman Perunggu di India dimulai pada 3300 SM dengan pusat peradabannya di Lembah Indus. Di Cina dan Asia Tenggara mulai sekitar 2100 SM. Di seluruh wilayah Eropa, orang mulai menggunakan perunggu antara 2100-2000 SM [5].

Zaman Besi adalah periode akhir dari tiga zaman yang mengklasifikasikan masa prasejarah manusia [2]. Zaman ini dimulai pada sekitar abad ke-12 SM di Timur Dekat, India, dan Yunani, dan berakhir pada abad ke-5 atau ke-4 SM di sebagian besar wilayah dunia. Seperti namanya, Zaman Besi mengacu pada periode ketika manusia berhasil mengolah besi menjadi berbagai perkakas. Produksi sistematis besi pertama dimulai di Anatolia, Turki, dan menyebar baik ke wilayah Timur maupun Barat secara bersamaan.

Perkakas pada Zaman Besi seperti pedang dan alat pertanian sebenarnya mirip dengan yang dihasilkan pada Zaman Perunggu. Bedanya, produk-produk tersebut dibuat dari besi sehingga lebih kuat dan tahan lama. Pedang yang dibuat dari besi mudah mematahkan pedang yang dibuat dari perunggu, sehingga kelompok peradaban yang telah menguasai peleburan besi menjadi kelompok yang lebih unggul dalam persaingan hidup. Anatolia merupakan pusat Kekaisaran Hittite, yang menggunakan senjata dari besi untuk berperang menaklukkan sebagian besar wilayah Timur Dekat [5].

Dengan perkembangan peradaban manusia, materi-materi alam bisa diolah dan direkayasa lebih lanjut sehingga menghasilkan materi dengan kualitas yang lebih tinggi. Perkembangan ilmu pengetahuan tentang materi telah mengantarkan para ilmuwan menemukan hubungan sifat-sifat materi dengan elemen struktur materi. Lahirlah kajian dalam bidang ilmu bahan/material (*material science*), yaitu disiplin ilmu yang mempelajari hubungan antara struktur dengan sifat-sifat materi. Lahir pula kajian dalam bidang rekayasa bahan (*material engineering*) yang mempelajari teknik-teknik perbaikan sifat materi. Melalui dua bidang kajian itu manusia berhasil merancang struktur materi untuk mendapatkan sifat-sifat sesuai dengan yang diinginkan untuk maksud-maksud tertentu [6].

Perkembangan pengetahuan baru dalam bidang materi telah mewarnai kehidupan umat manusia saat ini. Rekayasa materi tidak diragukan lagi bakal mendominasi kemajuan teknologi dan memiliki peran penting dalam perkembangan teknologi masa depan. Produk-produk teknologi mutakhir sangat bergantung pada penemuan materi canggih. Tanggal 9 Juni 2007, perusahaan pembuat pesawat Boeing meluncurkan pesawat penumpang terbarunya, 787 *Dreamliner*, pada sebuah perayaan di salah satu pabriknya di Everett, Washington DC, Amerika Serikat [6]. Pesawat penumpang canggih ini sekitar 50 persen dibuat dari material komposit plastik yang ringan dan kuat, juga diklaim ramah lingkungan dan hemat bahan bakar.

1.2. Hakekat Materi

Karena dibutuhkan dalam kehidupan, keterikatan dan ketertarikan manusia terhadap materi sudah berlangsung sejak adanya peradaban. Begitu panjang jalan yang telah dilalui manusia untuk memahami hakekat materi. Uraian di atas hanyalah sekelumit contoh kemajuan dari waktu ke waktu yang diperoleh umat manusia berkaitan dengan pemanfaatan berbagai jenis materi yang telah disediakan alam untuk memenuhi kebutuhan dalam kehidupan sehari-hari. Terlihat adanya peningkatan pengetahuan tentang materi sepanjang perjalanan sejarah peradaban manusia.

Paling tidak sudah sejak 2500 tahun silam manusia mulai mempertanyakan tentang hakekat materi. Pemrakarsanya adalah para filsuf Yunani Purba di Miletus, kota pelabuhan utama dan pusat perdagangan Ionia. Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat, banyak diantara para filosof Yunani purba pra-Aristoteles, seperti Thales, Herakleitos, Anaksagoras hingga Demokritos, telah berusaha menerangkan materi yang ada di sekitar mereka [7]. 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) dari Miletus [7]. Thales berpendapat bahwa semua zat tersusun dari satu unsur, yaitu air. Menurut Thales, 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.

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 [8]. Teori materi yang dikemukakan oleh Empedokles itu memberikan efek sangat besar dalam mengembangkan pemahaman hakekat materi pada jamannya. Teori 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 dengan pendapat Empedokles dengan pernyataan bahwa keempat materi dasar penyusun alam semesta itu dapat diubah ke bentuk lainnya.

Kini, pemahaman manusia terhadap materi telah mencapai suatu tingkatan jauh di atas pemahaman masyarakat Yunani purba. 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%) [1].

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 yang ditemukan di ruang angkasa 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 [9].

1.3. Materi Terkecil

Suatu benda yang kita temukan di lingkungan bisa jadi tersusun atas banyak jenis unsur. Berbagai disiplin ilmu mengkhususkan diri menelaah unsur-unsur yang ditemukan dalam berbagai jenis benda yang berbeda-beda [1]. Dalam astronomi dikaji jenis-jenis unsur yang ditemukan di bintang, planet, satelit, asteroid, komet, meteor dan nebula. Bidang biologi mengkaji komposisi unsur yang menyusun tubuh makhluk hidup. Ilmu kimia mempelajari komposisi dan sifat-sifat unsur serta perubahan yang dialaminya. Ahli kimia mampu mengenali dan mengidentifikasi semua unsur dengan ketelitian tinggi melalui serangkaian uji penelitian.

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 [9].

Banyak usaha telah dilakukan umat manusia untuk menggambarkan sekaligus memahami atom [8]. Dari sejarah Yunani kuno kita mengenal konsep dasar tentang atom dari Demokritos (460-370 SM). 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. Inilah konsep tentang atom pertama yang tercatat oleh sejarah.

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 [8]. Oleh sebab itu, konsep tentang atom tidak terdefiniskan secara pasti. Pada saat itu manusia hanya berspekulasi mengenai keberadaan suatu atom.

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berhasil mengenali dan menemukan atom-atom baru di alam serta menghadirkan atom-atom buatan di laboratorium, sehingga jumlah atom yang berhasil dikenali manusia semakin banyak [10]. Di antara atom-atom itu ternyata dapat membentuk inti dengan massa yang berbeda-beda. Karena itu, untuk membedakan antara satu inti dengan inti atom sejenis lainnya, seringkali massa inti itu disertakan dalam penulisan atom. Atom yang dicirikan dengan kondisi intinya itu dikenal dengan nuklida. Pemahaman ilmuwan tentang materi terkecil sudah sampai pada partikel elementer penyusun atom. Melalui perbedaan kandungan partikel elementer dalam inti atom itulah nuklida-nuklida itu dapat dibedakan dan dikenali. Bab 2 buku ini menfokuskan bahasan mengenai struktur atom agar pembaca memperoleh gambaran komprehensif tentang nuklida.

Jika semula dalam ilmu kimia dipelajari reaksi kimia yang berlangsung antar atom-atom, perkembangan dalam fisika nuklir ternyata mengantarkan para ilmuwan mampu melangsungkan reaksi yang melibatkan inti atom. Reaksi itu dapat menyebabkan perubahan struktur inti atom yang dikenal dengan istilah transmudasi inti. Muncullah nuklida-nuklida buatan yang semula tidak ditemukan secara alamiah di lingkungan. Pembahasan mengenai masalah transmudasi inti atom ini dapat ditemukan pada Bab 3.

Semula para ilmuwan menyajikan dan mengelompokkan atom-atom berdasarkan keteraturan pola alami tertentu yang mendasari perbedaan sifat-sifat berbagai unsur kimia. Semua atom yang sudah dikenali pada saat itu, yang jumlahnya baru

mencapai sekitar 70 jenis, dapat disajikan dalam suatu tabel periodik. Melalui tabel itu, para ilmuwan dapat mengenali sifat-sifat kimia maupun fisika dari berbagai jenis atom dengan cara lebih mudah dan sistematis berdasarkan pengelompokan atom-atom dalam golongan. Pembahasan mengenai tabel periodik ini dilakukan pada Bab 4. Dari sini para pembaca akan mendapatkan gambaran sejarah awal metode penyajian berbagai jenis unsur dan pengelompokannya dalam satu tabel.

Proses-proses fisika dalam inti atom ternyata mampu menghadirkan nuklida-nuklida baru sehingga jumlahnya mencapai lebih dari 1400 macam nuklida, dan tabel periodik tidak dapat menampilkan keseluruhannya secara bersamaan. Karena itu diperlukan cara lain untuk menyajikan berbagai jenis nuklida dalam satu bentuk peta, sehingga karakteristik dari nuklida-nuklida itu tersaji dalam satu tampilan terpadu, dan informasi komprehensif tentang suatu nuklida mudah diperoleh. Bab 5 buku ini memfokuskan bahasan tentang peta nuklida dan cara-cara untuk mendapatkan informasi suatu nuklida dari peta tersebut.

Pembahasan dalam buku ini diakhiri dengan penutup pada Bab 6. Di dalamnya dirangkum berbagai manfaat yang dapat diperoleh dari peta nuklida. Banyak peristiwa-peristiwa fisika yang dapat terjadi di dalam inti atom, dan peta nuklida dapat memberikan gambaran mengenai peristiwa yang dapat terjadi dalam inti atom tersebut. Pada atom radioaktif, peta nuklida dapat dipakai untuk menentukan jenis radiasi yang dipancarkan dari inti atom. Sebaran isotop-isotop suatu nuklida juga tergambar dengan jelas dalam peta nuklida. Demikian juga keberadaan isoton dan isobar. Pemahaman yang baik terhadap peta nuklida akan mempermudah seseorang mendapatkan data mengenai suatu nuklida sekaligus mengenali karakteristik nuklida tersebut.

BAB 2

STRUKTUR ATOM

Perkembangan 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.

Dalam menganalisis oksida dari berbagai jenis logam, Joseph L. Proust (1754-1826) berpendapat bahwa perbandingan bahan-bahan dalam suatu senyawa kimia selalu tetap. John Dalton (1766-1844) yang juga melakukan berbagai analisa sama seperti yang dilakukan Proust berusaha untuk menerangkan proses terjadinya reaksi kimia antara elemen-elemen [1]. Dalton mencoba menerangkan reaksi tersebut dengan cara melakukan percobaan-percobaan yang menunjang pemahaman manusia tentang atom.

Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat bahwa teori tentang atom yang didasarkan pada hasil percobaan pertama kali dikemukakan oleh 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 [11].

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 [7].

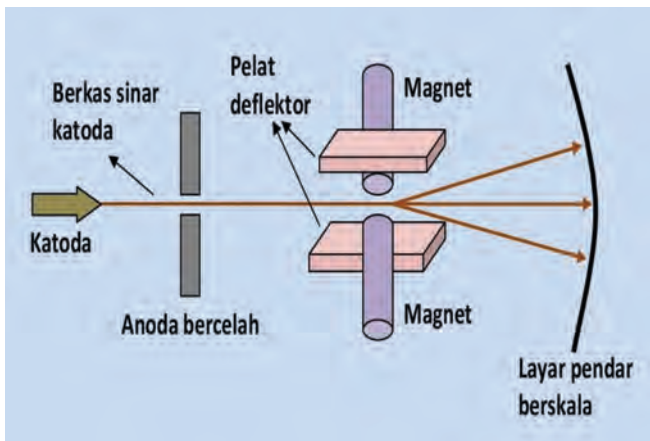
Hasil kerja para ahli kimia pada abad ke-18 telah melengkapi dasar teori atom Dalton. Teori atom itu selalu dapat digunakan dalam lapangan ilmu kimia, terutama dalam menerangkan kejadian-kejadian reaksi kimia yang baru ditemukan. Friedrich Wohler (1800-1882) misalnya, dapat menerangkan temuannya berupa sintesa urea pada tahun 1828 dengan menggunakan teori atom Dalton ini [8]. 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 [7]. Pada saat itu keberadaan atom dapat dipercayai para ilmuwan, sekalipun mereka belum pernah melihat bentuknya.

2.1. Penemuan Elektron

Pada 1897, fisikawan eksperimentalis kenamaan Inggris, Joseph J. Thomson (1856-1940), melakukan percobaan mengenai sinar katoda. Perlengkapan yang digunakannya berupa tabung Geissler yang sudah dimodifikasi. Selain menggunakan celah sempit anoda yang dapat dilalui berkas sinar katoda, di dalam

tabung juga dipasang dua pelat deflektor sejajar yang bisa diberi muatan listrik dari luar tabung. Bagian ujung tabung yang berhadapan dengan katoda didesain menyerupai bola berdiameter lebih besar yang bagian dalamnya dilapisi bahan fluoresens berskala seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 [13]. Tujuannya, agar ketika partikel bermuatan yang keluar dari katoda membentur permukaan fluoresens akan menimbulkan bintik cahaya yang dapat diamati dan diukur posisinya.

Tujuan Thomson melibatkan diri dalam penelitian sinar katoda dengan peralatan seperti digambarkan di atas adalah untuk mengukur nilai perbandingan antara muatan elementer (e) dan massa (m) partikel (nilai e/m) dari sinar katoda. Penelitian bersejarah ini dilakukan di Laboratorium Cavendish ketika ia sedang menjabat sebagai guru besar fisika eksperimental di Universitas Cambridge [7]. Dalam percobaan dengan peralatan hasil rancangannya, Thomson melewatkan berkas sinar katoda melalui celah sempit anoda. Sinar katoda yang lolos dari celah anoda selanjutnya melaju melewati pelat deflektor.



Gambar 2.1. Bagan percobaan Joseph J. Thomson untuk mengukur nilai e/m partikel sinar katoda [13]

Ketika pelat deflektor tidak diberi muatan listrik, pancaran berkas sinar katoda menempuh perjalanan garis lurus. Namun ketika masing-masing pelat di beri muatan listrik yang saling berlawanan sehingga timbul medan listrik di antara kedua pelat itu, perjalanan sinar katoda ternyata dibelokkan mendekati ke arah pelat bermuatan listrik positif. Besar kecilnya tingkat ketajaman pembelokan berkas sinar sangat dipengaruhi oleh besar-kecilnya muatan listrik pada pelat [12]. Hasil percobaan Thomson ini menjadi bukti meyakinkan bahwa sinar katoda merupakan pancaran berkas partikel bermuatan negatif.

Dalam eksperimen berikutnya, Thomson juga memasang dua kutub elektromagnet yang saling berlawanan di sisi tabung tempat kedua pelat deflektor terpasang. Pemasangan kutub magnet itu dilakukan sedemikian rupa sehingga garis gaya yang ditimbulkan oleh medan magnet arahnya menyilang tegak lurus terhadap arah garis medan listrik yang ditimbulkan oleh pelat deflektor [12]. Kuat medan magnetnya diatur sedemikian rupa sehingga mampu mengimbangi pembelokan sinar katoda yang disebabkan oleh medan listrik dari pelat. Dalam hal ini pemasangan kutub elektromagnet dimaksudkan agar medan magnet yang ditimbulkannya dapat membelokkan sinar katoda yang sama besar namun berlawanan dengan arah pembelokan yang disebabkan oleh medan listrik dari pelat deflektor.

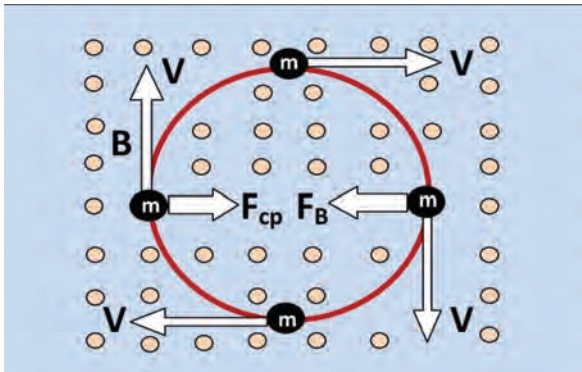
Nilai e/m diukur dengan menggunakan prinsip bahwa partikel bermuatan listrik yang bergerak di dalam medan magnet homogen akan mengalami pembelokan karena adanya pengaruh gaya magnet (F_B). Jika partikel bermuatan e bergerak dengan kecepatan v memasuki secara tegak lurus daerah medan magnet homogen B , maka gaya magnet yang bekerja pada muatan tersebut memenuhi persamaan [10]:

$$F_B = e \cdot v \cdot B \quad (i)$$

Gaya F_B yang bekerja pada muatan arahnya tegak lurus terhadap v sehingga tidak melakukan usaha apapun pada e . Gaya F_B ini hanya akan membelokkan arah gerak sehingga

lintasan e berupa lingkaran dengan jari-jari lintasan r . Karena muatan bermassa m menjalani gerak melingkar, maka timbullah gaya sentripetal F_{cp} yang arah kerjanya menuju ke pusat lingkaran seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 [14]. Besar gaya F_{cp} dirumuskan dengan persamaan [10]:

$$F_{cp} = \frac{mv^2}{r} \quad (ii)$$



Gambar 2.2. Lintasan gerak partikel bermuatan di dalam medan magnet homogen (arah medan magnet keluar bidang kertas) [14]

Karena besar gaya magnet F_B sama dengan besar gaya sentripetal F_{cp} , maka dari persamaan (i) dan (ii) diperoleh persamaan baru untuk menyatakan e/m sebagai berikut:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r} \text{ atau } e \cdot B = m \frac{v}{r}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r B} \quad (2-1)$$

Jari-jari lintasan (r) dan besar medan magnet (B) dapat diukur melalui percobaan. Namun masih ada satu besaran kecepatan gerak partikel elementer (v) yang belum diketahui harganya. Untuk menentukan kecepatan gerak partikel itu

dilakukan dengan jalan mengimbangi gaya magnet (F_B) dengan gaya listrik (F_e). Partikel bermuatan e yang dilewatkan dalam medan listrik E akan mengalami gaya listrik sebesar [10]:

$$F_e = e E \quad (\text{iii})$$

Karena pengaruh gaya listrik, maka arah gerak partikel akan menyimpang. Penyimpangan gerak partikel itu dapat diiadakan dengan memasang medan magnet B dalam kapasitor yang arah garis-garis gayanya tegak lurus terhadap arah medan listrik E . Medan magnet B akan menimbulkan gaya magnet atau lebih dikenal sebagai gaya Lorentz (F_B) yang besarnya seperti dirumuskan pada persamaan (i). Jika besar gaya akibat medan listrik sama dengan besar gaya akibat medan magnet, maka dari kombinasi kedua gaya ini partikel elementer e akan bergerak lurus. Dari persamaan (i) dan (iii) kecepatan gerak partikel dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut :

$$F_e = F_B \text{ atau } e E = e v B$$

sehingga diperoleh :

$$v = \frac{E}{B} \quad (2-2)$$

Nilai E dan B dapat diukur melalui percobaan, sehingga nilai v dapat dihitung dengan persamaan (2-2). Dari persamaan (2-1) Thomson akhirnya mendapatkan hasil pengukuran e/m yang nilainya sekitar 2.000 kali lebih besar dibandingkan yang dimiliki ion hidrogen, partikel terkecil yang sudah dikenal baik oleh para ilmuwan pada saat itu [7]. Dari hasil percobaan Thomson diperoleh hasil yang menunjukkan nilai perbandingan antara muatan elementer dengan massanya sebagai berikut [12]:

$$\frac{e}{m} = 1,7588 \times 10^{11} \text{ C.kg}^{-1} \quad (2-3)$$

Thomson mendapatkan bahwa nilai e/m dari berbagai percobaan yang telah dilakukannya ternyata konstan dan

tidak bergantung pada gas yang digunakan dalam tabung sinar katoda maupun logam yang digunakan sebagai elektroda. Berdasarkan data nilai e/m di atas, ada dua kemungkinan tafsir terhadap hasil yang diperoleh Thomson dari percobaannya [7]. Jika mempertimbangkan ion hidrogen sebagai ion terkecil, maka:

1. Ada kemungkinan bahwa massa partikel sinar katoda sama dengan massa ion hidrogen.
2. Muatan elementer sinar katoda sama dengan muatan ion hidrogen.

Thomson ternyata memilih kemungkinan kedua, yang berarti massa partikel sinar katoda adalah dua ribu kali lebih kecil dibandingkan massa ion hidrogen. Berangkat dari pilihan ini akhirnya Thomson mengusulkan bahwa partikel sinar katoda identik dengan partikel hipotetis pembawa satuan muatan listrik terkecil dalam peristiwa elektrolisa. Semula Thomson mengusulkan untuk partikel temuannya itu diberi nama *corpuscular*, yang kemudian oleh G. Johnstone Stoney (1826-1911) diberi nama elektron [7]. Atas jasa Thomson dalam mengidentifikasi partikel sinar katoda sebagai elektron melalui percobaan inilah, akhirnya ia dikukuhkan sebagai penemu elektron.

Keterlibatan Thomson dalam penelitian konduktivitas listrik oleh gas ternyata menghasilkan temuan yang memiliki arti sangat penting bagi perkembangan ilmu pengetahuan, baik dalam bidang kimia maupun fisika. Elektron merupakan partikel sub atomik pertama yang dikenal ilmuwan. Atas jasanya dalam mengungkap tabir misteri sinar katoda itu maka Thomson dinilai oleh *Royal Swedish Academy of Sciences* layak untuk dianugerahi hadiah Nobel Fisika tahun 1906 [15].

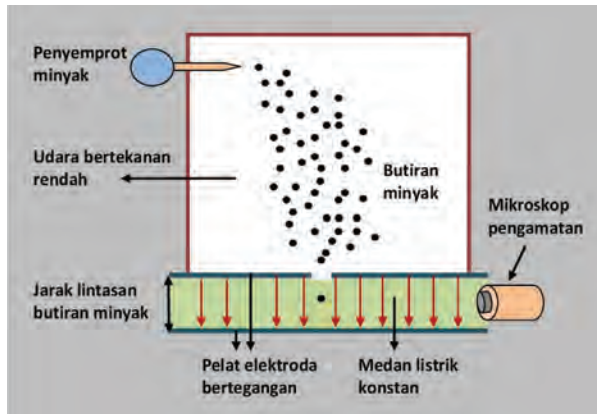
2.2. Muatan Elektron

Hasil percobaan Thomson masih menyisakan satu pertanyaan yang perlu dijawab oleh para ilmuwan, yaitu

mengenai jatidiri partikel elementer yang ditemukannya. Pertanyaan itu berkaitan dengan nilai pasti dari muatan elementer e dan massanya, m . Teka-teki itu baru berhasil dijawab oleh fisikawan Amerika Serikat Robert A. Millikan (1868-1953) dari Universitas Chicago [16]. Upaya untuk mengukur muatan sebuah elektron dilakukan oleh Millikan pada 1911 melalui percobaan menggunakan tetes minyak. Percobaan ini didasarkan pada suatu kenyataan bahwa ion akan menjadi pusat kondensasi dari air. Uap air yang mengembun pada ion berupa kabut dan muatan total yang dibawa kabut dapat diukur. Berat titik embun dapat ditentukan dengan Hukum Stokes.

Peralatan yang digunakan Millikan terdiri atas dua pelat elektroda sejajar yang ditempatkan di dalam kotak tertutup berisi udara bertekanan rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Butiran minyak disemprotkan sehingga masuk di antara kedua pelat elektroda dan akan menjadi bermuatan listrik apabila bersentuhan dengan elektroda. Gerak butiran minyak di antara kedua pelat elektroda itu selanjutnya diamati dengan mikroskop pada arah tegak lurus terhadap lintasannya. Pada saat pelat tidak diberi muatan listrik sehingga tidak ada beda potensial antar pelat, butiran minyak akan jatuh dari pelat atas ke bawah karena faktor gaya berat butiran itu. Berat butiran dapat dihitung dengan mengukur kecepatannya saat jatuh. Dengan cara ini dapat ditentukan massa butiran minyak yang diamati.

Percobaan berikutnya dilakukan dengan cara memberikan tegangan listrik antara kedua elektroda. Pemberian tegangan dilakukan sedemikian rupa sehingga membangkitkan gaya listrik yang arahnya ke atas dan nilainya sama besar dengan gaya berat butiran minyak. Percobaan ini dimaksudkan untuk mengukur muatan listrik butiran minyak. Gaya listrik yang timbul bergantung pada medan listrik yang terbangkitkan dan muatan listrik butiran minyak. Karena berat butiran minyak sudah ditentukan sebelumnya, maka muatan listrik butiran minyak dapat ditentukan dari hasil pengukuran. Penelitian dilakukan berulang-ulang dengan variasi massa butiran minyak.



Gambar 2.3. Bagan peralatan percobaan tetes minyak rancangan Robert A. Millikan untuk mengukur muatan elementer [17]

Berdasarkan kumpulan data hasil percobaannya, Millikan mendapatkan bahwa muatan listrik setiap butiran minyak ternyata merupakan kelipatan bulat dari muatan listrik sebuah elektron. Dari hasil penelitian itu Millikan mendapatkan harga muatan elementer sebuah elektron sebesar [16]:

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb (C)} \quad (2-4)$$

Atas keberhasilannya dalam mengukur muatan elementer elektron ini, juga sumbangsihnya dalam penelitian efek fotolistrik, Millikan dianugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada 1923 [18]. Melalui penggabungan hasil percobaan Millikan dengan hasil percobaan pengukuran nilai e/m yang telah diperoleh oleh Thomson sebelumnya, maka dari persamaan (2-3) dan (2-4) Millikan mendapatkan hasil perhitungan nilai massa sebuah elektron (m) sebesar:

$$m = \frac{e}{1,7588 \times 10^{11} (\text{C.kg}^{-1})} = \frac{1,6 \times 10^{-19} (\text{C})}{1,7588 \times 10^{11} (\text{C.kg}^{-1})} \quad (2-5)$$

$$= 9,106 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

2.3. Perkembangan Model Atom

Pemikiran tentang hakekat materi telah menjadi bagian penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Sepanjang sejarah perjalanan umat manusia, selalu muncul ilmuwan-ilmuwan yang berusaha untuk menyingkap rahasia yang tersimpan di balik materi penyusun alam semesta ini. Atom sebagai unit pembangun materi terkecil juga menjadi perhatian tersendiri di kalangan ilmuwan. Untuk memahami hakekat atom itu, para ilmuwan memperkenalkan model-model atom sesuai dengan tingkat penguasaan ilmu pengetahuan dan bukti-bukti ilmiah yang sudah ada pada jamannya.

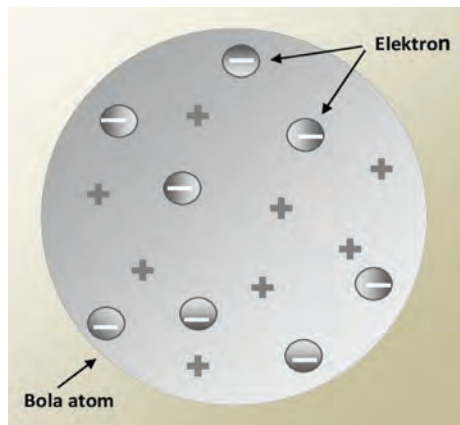
Model atom adalah suatu gambaran rekaan tentang atom yang dibuat berdasarkan hasil eksperimen maupun kajian teoritis, karena para ilmuwan belum tahu pasti seperti apakah bentuk atom itu sebenarnya. Karena merupakan gambaran hasil rekaan, maka perkembangan model atom selalu memperlihatkan suatu pola keteraturan yang berkembang menuju kesempurnaan, mengikuti kelengkapan data eksperimen terbaru yang diperoleh para ilmuwan, sesuai dengan tingkat perkembangan daya pikir manusia dan teknologi perangkat untuk mempelajarinya [11].

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. 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 [7].

Pada 1898 Thomson mengemukakan teori atom baru berdasarkan hasil temuannya. Dalam teorinya ia tetap berpegang pada pendapat bahwa atom takterbelahkan.

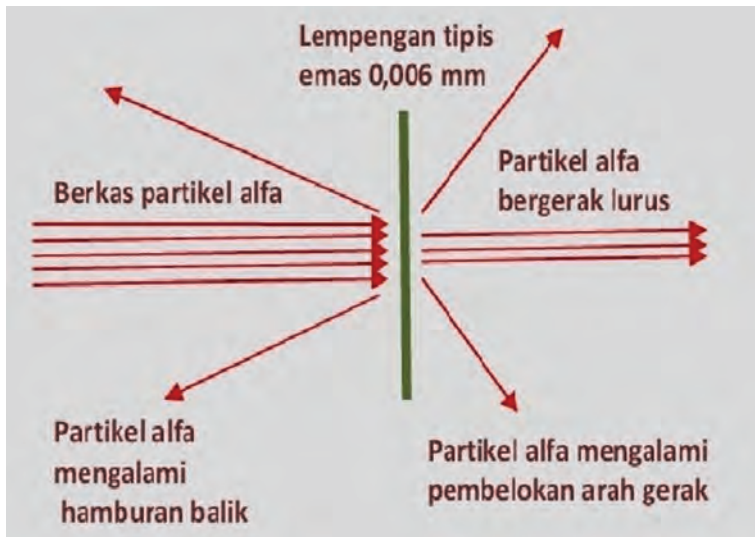
Menurut Thomson, atom mempunyai bentuk seperti bola yang muatan positifnya terbagi rata ke seluruh isi atom seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Di dalam bola tersebut tertanam elektron-elektron bermuatan negatif. Jumlah elektron selalu sama dengan jumlah muatan positif atom, sehingga atom secara keseluruhan berada dalam keadaan netral [16]. Apabila atom itu kehilangan satu atau lebih elektron, atom menjadi bermuatan positif yang disebut ion positif.

Meski model seperti yang dikemukakan oleh Thomson tidak tepat lagi untuk menggambarkan bangunan sebuah atom sebagaimana dipahami para ilmuwan pada saat ini, namun Thomson telah membuat langkah penting dalam model atomnya, yaitu mencirikan sifat kelistrikan dengan adanya muatan positif dan negatif dalam suatu atom [7]. Model ini bisa dikatakan menjembatani model atom lama pra Thomson yang tidak mengenal adanya komponen penyusun atom, dengan model atom modern sesudahnya yang mengenal adanya partikel-partikel subatomik bermuatan listrik sebagai komponen dasar penyusun atom. Pengujian terhadap model atom Thomson inilah yang nantinya melahirkan konsep-konsep model atom modern seperti yang dianut para ilmuwan saat ini.



Gambar 2.4. Model atom yang diusulkan oleh Joseph J. Thomson [16]

Fisikawan kelahiran Selandia Baru, Ernest Rutherford (1871-1937), sahabat Thomson yang saat itu sedang menjabat sebagai gurubesar di Universitas Manchester, Inggris, tertarik pada kesederhanaan model atom yang dikemukakan sahabatnya itu. Untuk menguji kebenaran model atom itu, Rutherford pada 1909 dengan dibantu oleh dua asistennya Hans Geiger (1882-1945) dan Ernest Marsden (1889-1970) melakukan suatu percobaan dengan menggunakan partikel alfa, yaitu sejenis partikel sub atomik yang dipancarkan oleh inti atom radioaktif alam yang saat itu sudah dikenal luas oleh kalangan ilmuwan. Pengujian terhadap model atom Thomson dilakukan dengan cara menembakkan partikel alfa ke arah suatu lempengan dari emas yang sangat tipis dengan ketebalan 0,006 mm [12]. Percobaan itu selanjutnya lebih dikenal dengan sebutan hamburan partikel alfa oleh lempengan emas dengan bagan percobaannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Skema percobaan hamburan partikel alfa untuk menguji model atom Thomson [19]

Asumsi utama dari pengujian ini adalah lempengan tipis emas berperan sebagai bangunan yang tersusun atas kumpulan bola pejal atom-atom bermuatan positif. Lempengan itu seakan sebagai dinding bagi partikel alfa yang menembaknya. Apabila model atom Thomson itu benar, maka ketika partikel alfa ditembakkan ke lempengan, seharusnya partikel itu mengalami gaya tolak oleh permukaan lempengan, sehingga terjadi hamburan balik. Sedang perjalanan partikel alfa yang berhasil menerobos melewati lempengan diharapkan bergerak lurus, tidak terganggu oleh elektron dan muatan positif dari atom yang menyebar memenuhi permukaan lempengan tersebut. Seandainya mengalami pembelokan pun, sudut penyimpangan arah gerakannya seharusnya kecil saja.

Tugas yang diberikan Rutherford kepada kedua asistennya itu adalah menyelidiki hamburan partikel alfa setelah ditembakkan ke lempengan emas. Susunan peralatan untuk percobaan didesain sedemikian rupa sehingga berkas partikel alfa dapat menumbuk permukaan lempengan secara tegak lurus. Hamburan yang dialami partikel alfa setelah berinteraksi dengan lempengan dideteksi pada berbagai posisi sudut pengamatan [12].

Laporan hasil penelitian hamburan partikel alfa oleh lempengan emas yang disampaikan Geiger dan Marsden ternyata sangat mengejutkan Rutherford. Hasil pengamatan yang diperoleh kedua asistennya ternyata tidak sesuai dengan asumsi semula. Kedua asisten itu melaporkan bahwa hanya sebagian kecil saja partikel alfa yang mengalami hamburan balik, sebagian kecil lainnya menembus lempengan dengan arah gerakannya mengalami pembelokan, dan sebagian besar lainnya justru mampu menembus lempengan dengan arah gerakannya yang lurus tanpa mengalami pembelokan. Kedua asisten Rutherford berhasil mendeteksi adanya partikel alfa yang menumbuk dinding tabung gelas yang berada di balik lempengan emas, tepat berada pada posisi titik dengan arah garis lurus di depan sumber partikel alfa [16].

Ada dua hal yang membuat Rutherford terkejut dari laporan kedua asistennya. Pertama, lempengan emas yang sangat tipis seharusnya tidak bisa membangkitkan gaya yang cukup besar untuk membelokkan arah gerak partikel alfa yang menembaknya. Landasan fisika yang membuatnya terkejut adalah partikel alfa yang digunakan dalam penelitian itu bergerak dengan kecepatan sangat tinggi, sekitar 160.000 km/detik. Partikel itu memiliki energi yang sangat besar dan massa yang jauh lebih besar dari massa elektron. Massa partikel alfa adalah 7.000 kali lebih besar dibanding massa elektron. Suatu yang mustahil telah terjadi jika elektron dalam atom dapat membelokkan arah gerak partikel alfa. Komentar Rutherford tentang fenomena ini adalah: "Tidak masuk akal. Ini sama halnya anda menembakkan peluru berdiameter 15 inchi pada selembar kertas tisu, kemudian mendapati peluru tadi terpantul balik menembaki anda" [7]. Kedua, jika atom dipandang sebagai bola pejal sebagaimana dikemukakan oleh Thomson, seharusnya susunan atom-atom yang menutup permukaan lempeng emas itu tidak dapat ditembus secara langsung oleh partikel alfa.

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. Berdasarkan pengamatan, dari sekitar 8.000 partikel alfa yang ditembakkan ke lempengan emas, ada satu partikel alfa yang mengalami pembelokan arah geraknya dengan sudut pembelokan cukup besar. Bahkan satu dari 20.000 partikel alfa mengalami pembelokan dengan sudut lebih besar dari 90° atau mengalami hamburan balik [20].

Dari hasil percobaan itu akhirnya Rutherford berkesimpulan, bahwa sebagian partikel alfa dipantulkan

kembali karena bertumbukan dengan bagian yang sangat keras dari atom. Sebagian partikel alfa lainnya dibelokkan arah geraknya karena menabrak bagian tepi inti atom. Sebagian besar partikel alfa bergerak lurus atau mengalami pembelokan dengan sudut sangat kecil (kurang dari satu derajat) karena berhasil menerobos lempengan emas. Karena sebagian besar partikel alfa diteruskan, berarti di dalam bangunan atom itu terdapat ruang kosong yang mudah ditembus dan partikel alfa melaju tanpa halangan [7].

Berdasarkan fakta-fakta tersebut di atas, maka model atom Thomson yang menyatakan, bahwa massa atom tersebar merata mengisi seluruh isi atom, tidak dapat dipertahankan lagi. Dengan gugurnya teori atom Thomson yang secara luas diterima oleh para ilmuwan hingga akhir abad ke-18 itu, maka pada 1911 Rutherford dalam makalahnya menyusun dan mengusulkan model atom baru sebagai berikut [16]:

1. Atom terdiri atas muatan positif dan negatif dimana semua muatan positif dan sebagian besar massa atom terkumpul pada suatu titik di tengah-tengah bola atom.
2. Titik di mana massa atom terkonsentrasikan 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.

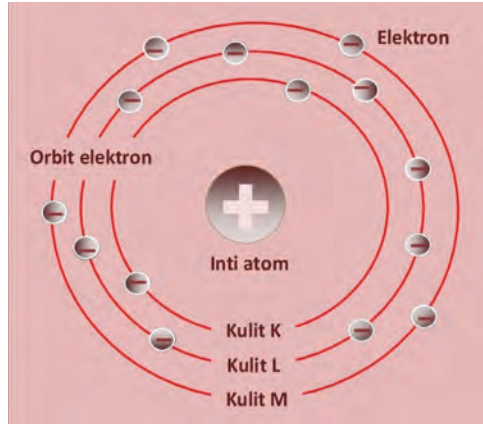
Ketika menulis makalah tentang teori atom pada 1911, Rutherford menggunakan istilah *charge concentration* untuk menyebut titik di mana sebagian besar massa atom terkonstrasikan. Namun dalam bukunya yang diterbitkan pada 1912, istilah itu kemudian diganti dengan *nucleus* yang berarti inti atom.

Jika model atom Thomson diuji oleh Rutherford dengan hamburan partikel alfa, maka model atom Rutherford pun harus diuji untuk membuktikan apakah model itu sesuai

dengan kaidah-kaidah fisika yang ada [14]. Dari hasil pengujian terhadap model atom Rutherford ini diketahui bahwa kelemahan utamanya terletak pada masalah kestabilan atom. Dalam gerakan mengelilingi inti, elektron akan kehilangan energinya secara kontinu. Jika model ini diikuti, berdasarkan kaidah dalam fisika klasik, gerakan elektron mengelilingi inti atom akan menempuh lintasan dengan jari-jari lintasannya semakin lama semakin kecil. Lintasannya akan berbentuk spiral mengikuti berkurangnya energi elektron yang berlangsung secara kontinyu. Lama-kelamaan energi elektron habis hingga akhirnya elektron itu menempelkan dirinya pada permukaan inti atom.

Meski masih ada kelemahan dikaitkan dengan uji spektroskopi warna pancaran cahaya dari atom hidrogen, 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 pada 1913 dalam teori atomnya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 [11].

Bohr mengemukakan bahwa atom ternyata mirip dengan sistem tata surya, dengan elektron-elektron mengitari inti atom seperti halnya planet-planet mengitari matahari. Dengan alasan yang sama bahwa sistem tata surya tidak runtuh karena tarikan gravitasi antara matahari dan tiap planet, atom juga tidak runtuh karena tarikan elektrostatik Coulomb antara inti atom dengan tiap elektron dalam orbit. Bohr menerangkan model atomnya berdasarkan teori kuantum untuk menjelaskan spektrum gas hidrogen. Spektrum garis menunjukkan bahwa elektron hanya menempati tingkat-tingkat energi tertentu dalam atom.



Gambar 2.6. Model atom yang diusulkan oleh Ernest Rutherford dan disempurnakan oleh Niels Bohr [11]

Bohr mengemukakan teori baru mengenai struktur dan sifat-sifat atom yang merupakan gabungan dari penemuan Rutherford mengenai struktur atom dan teori kuantum dari Max Planck (1858-1947). Bohr dengan cara yang mengagumkan dalam teori atomnya berusaha untuk memperhitungkan adanya garis yang berbeda-beda dalam spektrum atom. Dalam hal ini Bohr tidak mengemukakan teori atomnya sendiri, melainkan hanya menambahkan postulat terhadap teori atom Rutherford. Dalam postulatnya itu Bohr mengatakan bahwa [16]:

1. Elektron tidak dapat berputar mengelilingi inti melalui sembarang lintasan, tetapi hanya dapat melalui lintasan-lintasan tertentu saja dengan momentum anguler tertentu di bawah pengaruh gaya Coulomb tanpa membebaskan energi. Lintasan ini disebut lintasan stasioner, dimana elektron-elektron yang berada di dalamnya memiliki energi tertentu.
2. 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 pada orbit atom bagian dalam menyerap energi dari luar. Apabila suatu unsur didinginkan, elektron 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 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 [21]. Nilai hasil perhitungannya ternyata sangat cocok dengan nilai yang diperoleh melalui percobaan secara langsung. Hal ini dipakai sebagai bukti bahwa teori Bohr tentang spektrum atom adalah benar.

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 [18]. 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.

2.4. 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 Rutherford-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.

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) [12].

Bermula dari masa purnabakti Joseph J. Thomson pada 1919, akhirnya Ernest Rutherford dipromosikan menduduki jabatan guru besar fisika eksperimental di Laboratorium Cavendish menggantikan posisi Thomson. 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 dari berat satu atom H [12]. 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 tersebut menempatkan inti atom H pada posisi sangat penting, sehingga oleh Rutherford diberi nama proton (p), suatu kosakata Yunani yang berarti “yang pertama”.

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 $13e$ (e adalah muatan elementer sebuah elektron yang nilainya $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb). padahal massanya yang terukur adalah 27 kali massa proton. Dalam hal ini muatan listrik 1 buah proton juga $1e$, sama besarnya dengan muatan listrik 1 buah elektron, hanya tandanya saja yang berbeda, proton bermuatan listrik positif (+), sedang elektron muatan listriknya negatif (-). Jika asumsi inti atom tersusun atas proton-proton itu benar adanya, seharusnya muatan listrik yang dimiliki oleh inti aluminium tadi adalah juga $27e$. Karena perbedaan angka itu, maka Rutherford menduga bahwa di dalam inti atom mengandung sejumlah elektron bermuatan negatif yang menetralkan beberapa muatan positif proton. Dalam hal ini di dalam inti atom aluminium mengandung 14 buah elektron yang menetralkan 14 buah proton sehingga muatan intinya tinggal $13e$ [7].

Diasumsikan bahwa elektron dan proton mungkin bergabung sangat dekat sehingga membentuk partikel netral. Partikel hipotetis ini memiliki massa yang hampir sama dengan proton. Rutherford merupakan orang pertama yang menduga

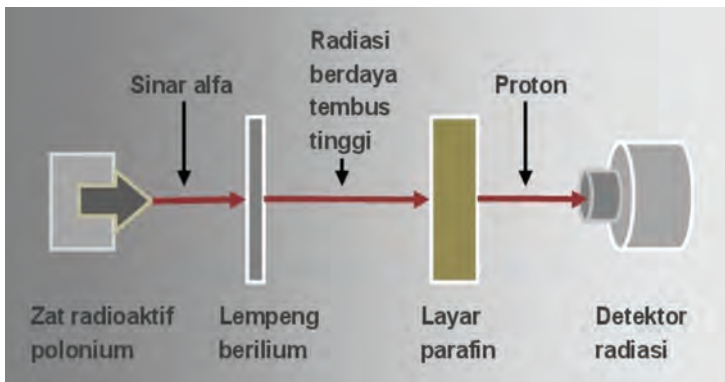
bahwa inti atom tersusun atas proton dan elektron (e). Hipotesa proton-elektron sebagai penyusun inti dihubungkan dengan sifat-sifat elektron bebas. Diusulkan bahwa elektron diikat oleh partikel bermuatan positif dan tidak memiliki sifat independen di dalam inti. Salah satu kemungkinannya, sebagaimana diusulkan oleh Rutherford di awal tahun 1920, adalah bahwa elektron dan proton mungkin bergabung sangat dekat sehingga membentuk partikel netral [12]. Keyakinan adanya partikel netral itu dikemukakan juga oleh William D. Harkins (1873-1951), pakar kimia nuklir Amerika Serikat. Partikel hipotetis ini selanjutnya diberi nama neutron (n).

Keberadaan neutron yang tidak memiliki muatan listrik akan sangat sulit untuk dideteksi, sementara beberapa usaha yang telah dilakukan gagal untuk menemukan neutron tersebut. 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. Penelitiannya dilakukan dengan cara menembaki target aluminium dengan partikel alfa yang dipancarkan dari sumber berupa bahan radioaktif alamiah [7]. Meski tidak menghasilkan temuan apapun, belakangan diketahui bahwa yang dilakukan oleh Rutherford dan Chadwick ini sudah berada di jalur yang benar.

Deretan panjang usaha pencarian neutron akhirnya mulai menampakkan hasil lewat eksperimen dua fisikawan Jerman, Walther Bothe (1891-1957) dan asistennya, Herbert Becker (1887-1955), pada 1930. Mereka melaporkan, apabila unsur-unsur ringan seperti litium (Li), berilium (Be), dan boron (B) ditembaki dengan partikel alfa yang dipancarkan dari unsur radioaktif polonium (Po), maka teramati adanya pancaran radiasi dengan daya tembus sangat tinggi yang saat itu diduga sebagai sinar gamma berenergi tinggi [20]. Penelitian seperti yang dilakukan Bothe dan Becker dilakukan ulang dalam selang dua tahun kemudian oleh dua ilmuwan Perancis, Jean Frederic Joliot (1900-1958) bersama istrinya, Irene Joliot-

Curie (1897-1956). Hasil penelitian mereka memperlihatkan, apabila radiasi yang diamati oleh kedua ilmuwan Jerman itu dijumpai pada selembar layar lilin parafin yang banyak mengandung atom H sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7, maka radiasi itu dapat memantulkan proton yang bergerak dengan kecepatan tinggi keluar dari parafin [7]. Peristiwa ini pun ditafsirkannya sebagai bentuk pancaran radiasi gamma berenergi tinggi. Hipotesa tentang adanya partikel netral yang disebut neutron sebagaimana diramalkan oleh Rutherford dan Harkins ternyata belum menjadi perhatian para peneliti.

Percobaan Joliot-Curie akhirnya diulang kembali oleh Chadwick pada 1932. 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 dua peneliti Jerman itu baru cocok apabila dipandang sebagai berkas partikel netral dengan massa yang sama dengan massa proton. Karena tidak bermuatan listrik atau netral, maka partikel yang keluar dari lempeng berilium itu diberi nama neutron. Laporan temuan ini dipublikasikan dalam jurnal ilmiah Inggris, *Nature*, pada 1932 [7].



Gambar 2.7. Rangkaian percobaan untuk menyelidiki neutron [7]

Dalam makalahnya Chadwick menjelaskan bahwa lilin parafin tersusun atas campuran senyawa hidrokarbon dengan komponen utamanya adalah atom hidrogen dan karbon. Karena tidak bermuatan listrik, maka pada saat menumbuk layar parafin, neutron tidak mengalami gaya Coulomb baik dengan inti atom hidrogen maupun karbon yang bermuatan positif. Akibatnya, berkas neutron yang terpancar dari lempeng berilium sebagian dapat dengan bebas menerobos layar parafin, dan sebagian lainnya bertumbukan dengan inti-inti atom hidrogen dan karbon. Selanjutnya Chadwick menjelaskan fenomena tumbukan yang terjadi antara neutron dengan inti atom hidrogen maupun karbon yang terjadi dalam layar parafin. Massa dari neutron adalah $1u$. Sedang massa inti atom hidrogen (proton) dan inti atom karbon masing-masing adalah $1u$ dan $12u$. Peristiwa tumbukan antara neutron dengan inti hidrogen, karena massa keduanya hampir sama, maka neutron mampu mementalkan proton yang kemudian teramati terpancar keluar dari layar parafin. Dalam hal ini terjadi transfer energi dari neutron kepada proton.

Berdasarkan perhitungan Chadwick, kira-kira setengah dari energi yang dibawa neutron dipindahkan kepada proton. Lain halnya dengan tumbukan yang terjadi antara neutron dengan inti atom karbon. Karena massa inti karbon adalah 12 kali lebih besar dibanding massa neutron, maka pada peristiwa tumbukan ini neutron akan terpental balik. Tumbukan antara keduanya dapat diibaratkan sebagai tumbukan antara bola tenis dengan bola kaki, neutron hanya memberi sedikit getaran terhadap inti karbon yang ditumbuknya. Kecocokan antara penjelasan dengan data hasil percobaan akhirnya menempatkan Chadwick sebagai penemu neutron [15].

Penemuan neutron dinilai sebagai peristiwa penting karena berhasil membuka pintu gerbang menuju penelitian dan pengembangan fisika modern lebih lanjut. 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. Di

samping itu, Chadwick juga berhasil mengamati bahwa massa dari neutron ternyata hampir sama dengan massa proton [14].

Pengukuran yang lebih teliti di kemudian hari menunjukkan massa neutron sedikit lebih berat daripada proton dengan kelebihan massa sekitar $\frac{1}{720}$ kali massa proton. Sebagai bentuk penghargaan atas hasil jerih payah dalam mengungkap jati diri neutron itu, maka panitia Nobel Fisika di Universitas Stockholm, Swedia, menempatkan Chadwick sebagai pemenang hadiah Nobel bidang fisika tahun 1935 [18]. 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.

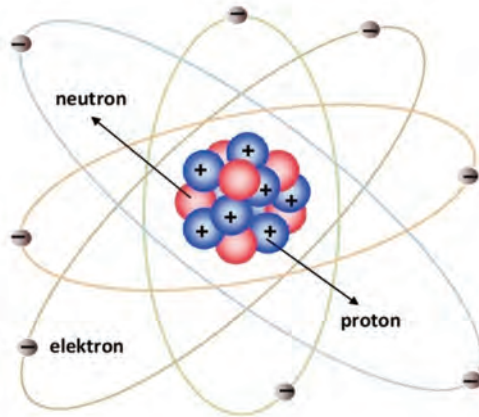
Penemuan partikel neutron mendorong munculnya hipotesa bahwa setiap inti atom hanya tersusun atas proton dan neutron saja [12]. Sebagai partikel penyusun inti atom, kesatuan dari proton dan neutron ini disebut nukleon. Hipotesa ini digunakan untuk pertama kalinya sebagai dasar teori inti atom yang detil oleh Werner Heisenberg (1901-1976) pada 1932. 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 2.8.

Sudah sejak lama istilah nuklida (*nuclide*) diterima secara luas untuk menyatakan jenis 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, dengan Z menyatakan jumlah proton dan

A menyatakan jumlah proton dan neutron dalam inti. Dengan diperkenalkannya istilah nuklida yang dicirikan dengan Z dan A , maka disepakati suatu aturan cara penulisan untuk mempermudah dalam mendapatkan informasi dari suatu nuklida. Baik dalam fisika maupun kimia inti seringkali atom ditulis dengan lambang nuklidanya sebagai berikut [22]:



dengan X menyatakan nama atom, Z menunjukkan nomor atom dan A menunjukkan nomor massa.



Gambar 2.8. Model untuk menggambarkan lebih detail struktur atom [10]

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: $N = A - Z$. Nama-nama atom dapat dikenali dari simbol kimianya sebagaimana disajikan pada tabel berkala atom-atom yang akan dibahas pada Bab 4. Setiap atom memiliki simbol kimia sendiri-sendiri, seperti atom hidrogen mempunyai simbol H, oksigen mempunyai simbol O dan sebagainya.

Mengingat massa suatu atom, inti atom dan partikel-partikel penyusunnya sangat kecil, maka untuk menyatakan massa tersebut digunakan besaran *atomic mass unit* yang disingkat *u*, nilainya setara dengan $1u = 1,666 \times 10^{-24}$ gram [21]. Nomor massa suatu atom menunjukkan pula massa atom tersebut dalam *u*. Misal ${}^{235}_{92}\text{U}$ berarti massa satu atom U adalah $235u$. Sebuah proton memiliki massa $1,007276u$ atau $1,672623 \times 10^{-24}$ gram, sedang massa sebuah neutron adalah $1,008664u$ atau $1,674929 \times 10^{-24}$ gram, dan massa sebuah elektron adalah $0,00054858u$ atau $9,109390 \times 10^{-28}$ gram.

Untuk keperluan praktis, massa sebuah proton dan neutron seringkali dianggap sama, masing-masing $1u$. Karena massa dari elektron adalah sedemikian kecilnya dibandingkan dengan massa proton dan neutron (massa elektron = $\frac{1}{1840}$ massa proton), maka dalam pembahasan mengenai atom, seringkali elektron dianggap sebagai partikel elementer penyusun atom yang tidak mempunyai massa, atau massa dari elektron dianggap nol [21].

Untuk mendapatkan gambaran mengenai nomor atom dan nomor massa suatu inti, berikut diberikan contoh nuklida ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{232}_{90}\text{Th}$ dan ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Dari tabel berkala atom-atom kita dapat mengetahui nama atom dari ketiga jenis nuklida tersebut berturut-turut adalah uranium, thorium dan plumbum atau timbal dengan *Z* masing-masing adalah 92, 90, dan 82. Massa nuklidanya berturut-turut adalah $238u$, $232u$ dan $208u$. Inti ${}^{238}_{92}\text{U}$ mengandung proton (*Z*) = 92 dan neutron (*N*) = $A - Z = 238 - 92 = 146$. Inti ${}^{232}_{90}\text{Th}$ mengandung proton 90 dan neutron 142, sedang inti ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ mengandung proton 82 dan neutron 126.

BAB 3

TRANSMUTASI INTI

Transmutasi inti (*nuclear transmutation*) adalah peristiwa berubahnya inti suatu atom menjadi inti atom baru yang strukturnya berbeda dengan inti semula. Karena inti atom tersusun atas proton dan neutron, maka setelah berlangsungnya proses transmutasi selalu terjadi perubahan komposisi proton, atau neutron, atau keduanya, dalam inti atom baru yang dihasilkan. Transmutasi itu bisa berlangsung melalui reaksi inti yang melibatkan partikel proyektil atau inti atom lain, atau berlangsung secara spontan tanpa dipicu oleh faktor luar. Transmutasi inti yang berlangsung secara spontan itu dapat terjadi melalui proses peluruhan inti atom radioaktif [12].

Ada beberapa kemiripan antara reaksi kimia dengan transmutasi inti, meskipun kedua jenis peristiwa yang melibatkan atom itu terjadi dalam daerah energi yang sangat berbeda dan melalui mekanisme yang berbeda pula. Kemiripan antara keduanya terletak pada individu-individu yang terlibat dalam proses, yaitu atom atau molekul dalam reaksi kimia, dan partikel atau inti atom dalam transmutasi inti. Hukum kekekalan juga berlaku pada kedua peristiwa tersebut, seperti kekekalan massa dan muatan listrik yang nilainya selalu konstan antara sebelum dan setelah proses berlangsung.

Meski ada beberapa kemiripan, namun ada pula perbedaan mendasar antara reaksi kimia dan transmutasi inti.

Pada reaksi kimia, energi dalam bentuk panas yang dihasilkan maupun diserap relatif sangat kecil dengan orde dalam elektron Volt (eV) [23]. Panas yang dilepaskan berasal dari energi ikat antara elektron dengan inti atom, sedang apabila terjadi penyerapan panas, energi itu dipakai untuk melepaskan elektron orbital dari ikatan inti. Pada reaksi kimia tidak terjadi pemusnahan massa atom yang bereaksi, atau dengan kata lain tidak ada massa atom yang hilang. Reaksi kimia menghasilkan senyawa baru tanpa merubah struktur atom-atom yang bereaksi.

Pada transmudasi inti, panas yang dilepaskan atau diserap berorde Mega elektron Volt (MeV) atau sejuta kali lebih lebih besar dibanding panas pada reaksi kimia ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$). Panas yang dilepaskan berasal dari pemusnahan sebagian massa inti. Apabila terjadi penyerapan panas, energi itu diperlukan untuk mengatasi gaya tolak elektrostatis antar muatan sejenis [14]. Perlu diketahui bahwa inti atom mengandung proton yang bermuatan listrik positif. Karena itu, secara keseluruhan inti atom selalu bermuatan listrik positif (+). Transmudasi inti selain melalui proses peluruhan hanya dapat terjadi jika kedua inti atom atau antara inti atom dan partikel proyektil yang berinteraksi memiliki cukup energi untuk mengatasi gaya tolak elektrostatis atau gaya Coulomb antar muatan positif [24]. Ketika gaya tolak Coulomb yang muncul antara inti atom dan partikel itu teratasi, maka keduanya akan berada pada jarak yang sangat dekat dalam wilayah gaya kuat inti, sehingga kedua inti yang semula tolak-menolak kini justru saling menarik untuk bergabung.

Proses berikutnya adalah terjadinya transmudasi inti dalam bentuk penyusunan kembali komposisi nukleon (proton dan neutron) dalam inti atom. Oleh sebab itu, setelah proses transmudasi inti berlangsung, akan diperoleh inti baru dengan nukleon baru yang strukturnya berbeda dengan nukleon sebelumnya [12]. Kasus ini ternyata mirip dengan penyusunan kembali atom-atom yang terjadi dalam reaksi kimia. Dapat pula dikatakan bahwa dalam reaksi kimia terjadi

penyusunan molekul baru, sedang dalam transmudasi inti terjadi penyusunan inti atom (struktur nukleon) baru.

3.1. Peluruhan Inti Radioaktif

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 radiasi (sinar-sinar radioaktif) secara spontan ini sering disebut sebagai atom radioaktif, sedang fenomena fisika yang ditunjukkannya dikenal sebagai gejala keradioaktifan atau radioaktivitas.

Awal pengenalan manusia dengan gejala keradioaktifan suatu bahan dimulai ketika fisikawan Perancis Antoine Henri Becquerel (1852-1908) pada 1896 mengamati unsur uranium (U) yang menunjukkan gejala aneh dan belum pernah diketahui sebelumnya. Semula Becquerel hanya menduga bahwa unsur itu menyimpan energi radiasi matahari yang diterima sebelumnya [15]. Untuk menguji dugaan itu, maka Becquerel menaruh biji U di dalam kotak timah yang tertutup rapat dan menyimpannya dalam waktu yang sangat lama. Dari hasil pengamatan, Becquerel mendapatkan bahwa bijih U tetap menunjukkan gejala radiasi meskipun tidak mendapatkan energi sinar matahari dalam waktu yang cukup lama.

Sebagai penjelasan atas temuannya yang tidak disengaja itu, pertama-tama Becquerel menduga bahwa satu-satunya sumber sinar aneh pastilah berasal dari garam uranium-natrium-sulfat itu sendiri. Dengan penelitian lanjutan akhirnya Becquerel mengetahui bahwa sinar aneh yang dipancarkan garam uranium itu memiliki banyak kesamaan dengan sinar-X yang ditemukan Wilhelm C. Roentgen (1845-1923) setahun sebelumnya, salah satunya adalah memiliki daya tembus tinggi. Hal penting lainnya dari hasil penelitian Becquerel adalah

bahwa sinar yang diamatinya tidak bergantung pada bentuk senyawa kimia bahan. Dalam hal ini Becquerel menyadari bahwa gejala radiasi tersebut pasti berasal dari atom uranium itu sendiri. Namun karena belum cukupnya pengetahuan tentang fenomena ini, maka untuk sementara sinar aneh yang dipancarkan garam uranium tadi diberi nama sinar Becquerel [22].

Penemuan gejala radioaktivitas merupakan salah satu pondasi penting untuk melangkah lebih lanjut ke perkembangan fisika nuklir 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 radioaktivitas menjadi terbuka lebar.

Pada tahun 1896, Becquerel menerbitkan beberapa kertas kerja ilmiah tentang fenomena yang ditemukannya. Dengan ditemukan gejala radiasi dari U itu maka fenomena keradioaktifan suatu bahan mulai dipelajari secara intensif oleh para peneliti. Beberapa ilmuwan yang membaca kertas kerja Becquerel menjadi tertarik dan melakukan penelitian serupa. Pada tahun 1898, pasangan suami-istri ahli kimia berkebangsaan Perancis, Marie Curie (1867-1936) dan Pierre Curie (1859-1905), berhasil menemukan dua unsur baru yang dapat menunjukkan gejala sama seperti unsur U. Kedua unsur baru tersebut dinamai Polonium (Po) dan Radium (Ra). Dalam kurun waktu berikutnya, puluhan bahan lain yang menunjukkan gejala radioaktivitas semacam itu berhasil ditemukan [25].

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. Namun karena waktu itu pemahaman manusia tentang atom belum begitu detail, maka

fenomena radioaktivitas masih tetap merupakan misteri, dan para ilmuwan belum berhasil menerangkan secara ilmiah dari mana radiasi yang dipancarkan oleh bahan-bahan radioaktif itu berasal. 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 [18].

Umat 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.

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 dalam inti, sedemikian rupa sehingga dicapai konfigurasi nukleon baru untuk mencapai keadaan inti atom yang stabil. Caranya adalah dengan melakukan proses peluruhan (*decay*) sambil melepaskan kelebihan energi intinya dalam bentuk pancaran sinar-sinar radioaktif [26].

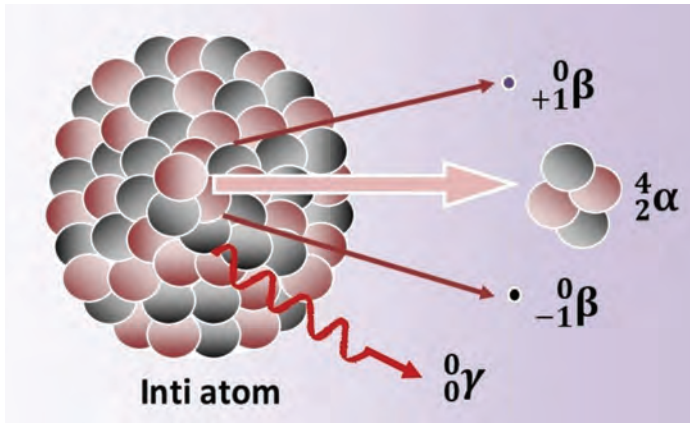
Jenis radiasi yang dipancarkan oleh atom radioaktif dipengaruhi oleh komposisi jumlah proton dan neutron dalam intinya. Setiap atom radioaktif juga memiliki waktu paruh ($T_{1/2}$), yaitu waktu yang diperlukan oleh atom untuk meluruh sehingga jumlahnya menjadi setengah dari jumlah semula.

Jika berkas radiasi yang dipancarkan oleh atom radioaktif dilewatkan dalam daerah bermedan listrik atau bermedan magnet, maka dari berkas tersebut akan diperoleh tiga jenis sinar radioaktif. Dengan menganalisa ketiga jenis sinar tersebut, maka didapatkan sinar-sinar radioaktif dengan karakteristik sebagai berikut [19]:

1. Sinar alfa (α) yang dibelokkan oleh medan magnet ke arah kutub negatif. Dari hasil penyelidikan diketahui bahwa sinar α merupakan partikel dengan muatan listrik $+2e$ dan massanya $4u$. Dari penelitian berikutnya diketahui bahwa partikel alfa ini tidak berbeda dengan inti atom Helium-4 sehingga diberi lambang ${}^4_2\alpha$ atau ${}^4_2\text{He}$.
2. Sinar beta (β) yang dibelokkan oleh medan magnet namun arahnya berlawanan dengan arah pembelokan sinar α , yaitu ke arah kutub positif. Sinar β merupakan partikel dengan muatan listrik $-1e$ dan tidak bermassa. Penelitian berikutnya menunjukkan bahwa partikel β ini memiliki karakteristik yang sama dengan electron, sehingga diberi lambang ${}^0_{-1}e$ atau ${}^0_{-1}\beta$.
3. Sinar gamma (γ) yang tidak dibelokkan baik oleh medan listrik maupun medan magnet. Dari penyelidikan diketahui bahwa sinar γ ini merupakan salah satu anggota spektrum radiasi elektromagnetik yang tidak bermassa dan tidak bermuatan sehingga biasa ditulis dengan lambang ${}^0_0\gamma$.

Jenis-jenis radiasi yang dapat dipancarkan oleh inti atom radioaktif adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Ketika para ilmuwan baru mengenal bahan radioaktif alam, jenis radiasi yang diketahui pada saat itu hanyalah sinar α , sinar β negatif atau elektron dan sinar γ [12]. Namun ketika para ilmuwan berhasil menghadirkan unsur-unsur radioaktif buatan, mereka dapat mengamati adanya unsur-unsur radioaktif dengan nomor atom ringan yang dapat

memancarkan sinar β positif atau positron, yang setelah diselidiki ternyata merupakan elektron bermuatan listrik positif sehingga diberi lambang ${}^0_+e$ atau ${}^0_+\beta$ [16].



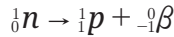
Gambar 3.1. Jenis-jenis radiasi yang dipancarkan oleh inti atom radioaktif [12]

Kestabilan suatu inti atom dipengaruhi oleh perbandingan jumlah neutron (N) dan jumlah proton (Z) yang ada dalam inti suatu atom. 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 kemungkinan inti atomnya tidak stabil atau bersifat radioaktif [26].

Jenis radiasi yang dipancarkan oleh bahan radioaktif dipengaruhi oleh nilai N/Z dalam intinya. Untuk inti-inti ringan, jika nilai $N/Z > 1$, berarti jumlah neutron lebih banyak dibandingkan jumlah proton. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, inti atom akan melakukan perubahan neutron menjadi proton disertai pancaran elektron atau ${}^0_-\beta$. Dapat juga dikatakan bahwa atom dengan $N/Z > 1$ merupakan atom yang kelebihan elektron, sehingga atom jenis ini akan memancarkan elektron. Neutron merupakan partikel yang tidak bermuatan listrik dan bermassa $1u$, sehingga diberi notasi 1_0n . Sedang

Buku ini tidak diperjualbelikan.

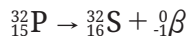
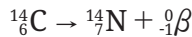
proton merupakan partikel bermuatan listrik $+1e$ bermassa $1u$, sehingga diberi notasi 1_1p . Proses perubahan neutron menjadi proton dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut :



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



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 $(Z+1)e - 1e = Ze$. Beberapa contoh inti radioaktif pemancar sinar ${}^0_{-1}\beta$ adalah:



Jika nilai $N/Z < 1$, berarti jumlah neutron dalam inti atom lebih kecil dibandingkan jumlah proton. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, dalam inti atom akan terjadi perubahan proton menjadi neutron disertai pemancaran positron atau radiasi ${}^0_{+1}\beta$. Pemancaran ${}^0_{+1}\beta$ 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 [27].

Jika persyaratan tersebut tidak terpenuhi, maka yang akan terjadi dalam inti adalah proses penangkapan elektron. Dalam proses ini, salah satu elektron orbital ditangkap oleh inti atomnya sendiri. Elektron yang tertangkap adalah elektron yang berada pada lintasan paling dalam (kulit *K*), karena elektron dalam lintasan ini berada sangat dekat dengan inti dan mempunyai peluang paling besar untuk ditangkap inti atom dibandingkan dengan elektron yang berada di lintasan lainnya. Seringkali proses penangkapan elektron oleh inti atom ini disebut juga sebagai penangkapan *K*. Elektron yang ditangkap akan menyatu dengan proton dalam inti sehingga membentuk neutron [19].

Pengertian lain untuk atom dengan nilai $N/Z < 1$ adalah bahwa atom jenis ini mempunyai kelebihan proton (bermuatan $+1e$), sehingga untuk mencapai kondisi inti yang stabil perlu menyerap elektron yang bermuatan $-1e$. Jadi dalam hal ini penyerapan elektron oleh inti suatu atom akan memberikan hasil yang sama apabila atom tersebut memancarkan positron [27]. Proses perubahan proton menjadi neutron dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:

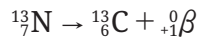
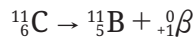


Pada tahap awal mempelajari bahan-bahan radioaktif alam, keberadaan bahan radioaktif pemancar ${}_{+1}^0\beta$ belum diketahui oleh para ilmuwan [22]. Positron pertama kali diramalkan keberadaannya oleh Paul AM. Dirac (1902-1984) pada 1927 dan teramati pertamakali kemunculannya pada sinar kosmis dari angkasa luar oleh Carl D. Anderson (1905-1991) pada 1932 [12]. Inti atom radioaktif yang memancarkan ${}_{+1}^0\beta$ akan menghasilkan inti baru dengan Z berkurang satu dan A tetap. Persamaan untuk menggambarkan

proses nuklir untuk inti atom yang melakukan peluruhan ${}_{+1}^0\beta$ adalah sebagai berikut:



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, 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 $(Z-1)e + 1e = Ze$. Unsur-unsur radioaktif buatan umumnya berperan sebagai pemancar ${}_{+1}^0\beta$. Beberapa contoh inti radioaktif pemancar ${}_{+1}^0\beta$ adalah:



Sebagai akibat dari proses penangkapan atau penyerapan elektron dari kulit K oleh inti atom, maka tempat kulit K yang semula berisi elektron menjadi kosong. Kekosongan ini akan diisi oleh elektron lain yang berasal dari kulit dengan level energi lebih tinggi, yaitu elektron yang mengisi orbit lebih luar dibanding kulit K . Karena berasal dari orbit dengan level energi yang lebih tinggi, maka perpindahan elektron tersebut akan disertai dengan terjadinya pancaran sinar-X dengan energi fotonnya merupakan selisih antara level energi kulit K dengan level energi kulit asal elektron tersebut. Selisih energinya begitu spesifik bergantung pada jenis atomnya, sehingga setiap proses penangkapan elektron akan selalu diikuti oleh terjadinya pancaran energi foton yang disebut sinar-X karakteristik [19].

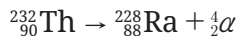
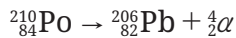
Inti-inti berat dengan nomor atom tinggi, dimana nilai N/Z lebih besar dari 1,6 maka dalam peluruhannya akan selalu disertai pemancaran partikel ${}_{+2}^4\alpha$ atau inti atom ${}_{2}^4\text{He}$ [12]. Jika inti atom memancarkan partikel ${}_{+2}^4\alpha$, maka nilai Z inti atom hasil peluruhannya berkurang dua dan A nya berkurang

empat. Proses pemancaran partikel $\frac{4}{2}\alpha$ dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut:



Inti-inti berat dengan Z tinggi seperti inti-inti yang muncul pada akhir Tabel Periodik, dalam peluruhannya akan selalu disertai pemancaran radiasi $\frac{4}{2}\alpha$. Sebagian besar atom dengan $A > 150$ merupakan pemancar $\frac{4}{2}\alpha$, dan mayoritas inti radioaktif pemancar $\frac{4}{2}\alpha$ mempunyai $A > 200$ [22]. Ada pula inti yang lebih ringan sebagai pemancar $\frac{4}{2}\alpha$ dengan umur paruh yang sangat panjang, namun model peluruhannya sulit untuk diamati.

Partikel $\frac{4}{2}\alpha$ tidak berada dalam suatu inti atom, namun dapat terbentuk sebagai kesatuan nukleon dalam inti yang tersusun atas 2 neutron dan 2 proton. Jika kesatuan nukleon itu berada sangat dekat dengan permukaan inti atom, ada kemungkinan satuan nukleon itu lepas dari ikatan inti dalam bentuk partikel bermuatan $+2e$ yang berasal dari 2 proton dan bermassa $4u$ karena mengandung 2 buah neutron dan 2 buah proton. Partikel ini memiliki kestabilan inti yang sangat tinggi sehingga dalam beberapa kasus dapat berperan sebagai partikel tunggal [12]. Beberapa contoh inti radioaktif pemancar partikel $\frac{4}{2}\alpha$ adalah:



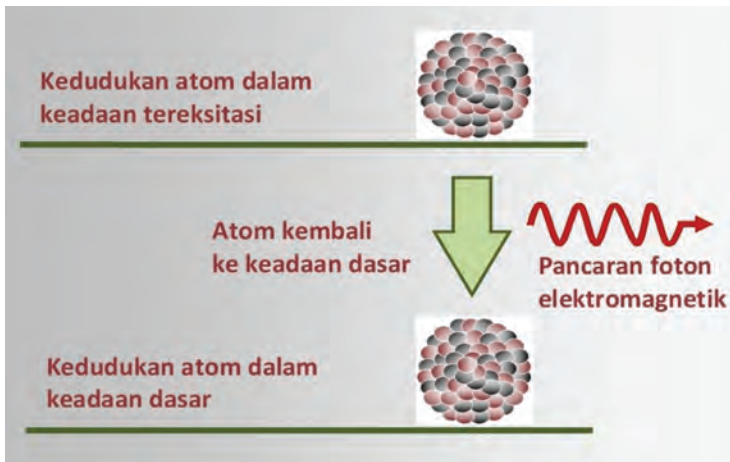
Atom yang memancarkan sinar γ tidak akan mengalami pengurangan Z maupun A , hanya intinya saja yang semula berada dalam keadaan tereksitasi akhirnya kembali ke keadaan dasar. Inti dalam keadaan tereksitasi adalah inti yang memiliki tingkat energi di atas tingkat terendahnya atau energi tingkat dasar (*ground state*). Sedangkan tingkat energi dasar suatu inti adalah energi ikat inti total dari inti stabil [27].

Untuk mencapai tingkat energi dasar atau keadaan stabil,

atom dengan inti tereksitasi akan melakukan pelepasan energi melalui pancaran sinar γ . Oleh sebab itu, pemancaran sinar γ ini biasanya menyertai peluruhan inti yang memancarkan sinar ${}^4_2\alpha$ maupun ${}^0_{-1}\beta$ [12]. Jadi pemancaran sinar γ tidak menyebabkan terjadinya perubahan Z maupun N , melainkan hanya terjadi perubahan pada level energi intinya saja. Proses pemancaran energinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Persamaan peluruhan inti radioaktif pemancar sinar γ digambarkan melalui persamaan perubahan kondisi inti sebagai berikut:



Tanda bintang (*) dipakai untuk menyatakan bahwa suatu inti (inti X) berada dalam keadaan tereksitasi.



Gambar 3.2. Kondisi atom yang tereksitasi [19]

Selain memancarkan sinar γ , ada cara lain bagi inti yang tereksitasi untuk kembali ke keadaan dasarnya. Energi γ yang dipancarkan inti tereksitasi dapat langsung diserap oleh elektron yang mengisi orbit bagian dalam atom itu sendiri,

seperti elektron yang mengisi kulit K dan L . Energi γ yang diserap elektron dipakai untuk melawan energi ikat inti, dan sisa energinya diubah menjadi energi kinetik elektron. Elektron yang telah memperoleh energi itu mampu melepaskan diri dari ikatan intinya dan terpental dengan membawa sejumlah energi kinetik. Proses seperti ini disebut sebagai pengubahan diri [27]. Kekosongan elektron pada kulit K dan L akibat berlangsungnya proses pengubahan diri itu akan segera diisi oleh elektron-elektron lainnya dari kulit yang lebih luar, diikuti dengan terjadinya pancaran sinar-X karakteristik.

3.2. Transmutasi dengan Proyektil

Di laboratorium, transmutasi inti biasanya dihasilkan melalui penembakan target inti atom A dengan proyektil berupa partikel nuklir a yang memiliki energi cukup untuk mengatasi gaya tolak elektrostatis dari inti A . Dari hasil penembakan itu akan dihasilkan inti baru B disertai dengan pelepasan partikel baru 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 (n), proton (p), alfa (α) dan sebagainya, atau inti-inti ringan seperti deutron (d atau ${}^2_1\text{H}$, inti atom deuterium) dan triton (t atau ${}^3_1\text{H}$, inti atom tritium). Bisa juga berupa foton elektromagnetik dalam bentuk radiasi γ .

3.2.1. Transmutasi dengan Partikel Alfa

Transmutasi inti buatan mula-mula dihasilkan dengan cara menembaki target dengan partikel α yang dipancarkan oleh bahan radioaktif alam [7]. Fenomena terjadinya transmutasi inti oleh proyektil seperti ini pertama kali diamati oleh Ernest Rutherford (1871-1937) pada tahun 1919. Pada saat itu Rutherford mendapatkan bahwa inti atom ${}^{14}\text{N}$

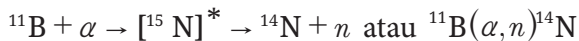
dapat memancarkan p apabila ditembaki dengan partikel α yang dipancarkan dari radionuklida alamiah radium-C (Ra-C). Melalui percobaan itu Rutherford menyimpulkan bahwa partikel α yang masuk ke dalam inti ^{14}N dapat membentuk sebuah inti gabungan yang sifatnya tidak stabil, sehingga segera mengeluarkan p untuk menjadi inti baru ^{17}O . Persamaan reaksi nuklir untuk proses transmudasi inti yang pertama kali diamati oleh Rutherford tersebut dapat ditulis dalam bentuk $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$.

Radiasi yang dipancarkan oleh bahan radioaktif alamiah dapat dimanfaatkan sebagai proyektil, dan partikel α merupakan jenis proyektil yang cukup efektif untuk menembakan inti karena energi dan momentumnya yang relatif tinggi [12]. 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. Penggunaan target atom ringan dapat mengurangi gaya tolak Coulomb antara inti atom target dan partikel α . Beberapa contoh reaksi nuklir jenis (α, p) selain yang telah diamati Rutherford adalah $^{10}\text{Be}(\alpha, p)^{13}\text{C}$, $^{23}\text{Na}(\alpha, p)^{26}\text{Mg}$ dan $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$. Pada reaksi (α, p) muatan atau nomor atom inti hasil reaksi naik satu satuan dan massanya naik tiga satuan.

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-bukti adanya pancaran n dan pengembangan metode dalam menganalisis reaksi nuklir dimana salah satu produknya adalah n telah mengantarkan manusia ke penemuan beberapa jenis reaksi (α, n) [12]. Pada reaksi jenis ini, nomor atom inti hasil reaksi meningkat dua satuan dan massanya meningkat tiga satuan. Contoh dari transmudasi inti yang dihasilkan melalui proses reaksi (α, n) ini adalah $^{14}\text{N}(\alpha, n)^{17}\text{F}$, $^{23}\text{Na}(\alpha, n)^{26}\text{Al}$ dan $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$.

Seringkali dalam proses reaksi nuklir juga dilepaskan partikel yang sama dengan partikel yang ditembakkan. Dalam hal ini inti target tidak mengalami transmudasi inti, melainkan hanya berada dalam keadaan tereksitasi [12]. Untuk kasus ini, proses yang terjadi disebut hamburan. Hamburan yang terjadi bisa bersifat elastis jika inti target tidak mengalami perubahan level energi, dengan kata lain inti tidak tereksitasi. Dalam peristiwa hamburan elastis ini tidak terjadi perubahan energi kinetik pada partikel datang. Hamburan yang terjadi bersifat inelastis jika inti target mengalami perubahan level energi. Dalam hamburan inelastik, energi partikel terhambur berbeda dengan energi kinetik partikel datang.

Pada umumnya, jika energi dari proyektil yang ditembakkan tidak terlalu tinggi, reaksi nuklir yang terjadi berlangsung melalui dua tahap. Pertama, proyektil ditangkap oleh inti target sehingga membentuk inti atom gabungan (*compound nucleus*) yang berada dalam keadaan tereksitasi. Kedua, inti gabungan mengalami proses deeksitasi melalui pancaran partikel atau cara lain [28]. Contoh untuk reaksi jenis ini adalah penembakan inti ^{11}B dengan partikel α yang menghasilkan inti atom baru ^{14}N disertai pelepasan n . Prosesnya berlangsung melalui pembentukan inti gabungan $[^{15}\text{N}]^*$ sebagai berikut :



Tanda bintang (*) pada $[^{15}\text{N}]^*$ menunjukkan inti gabungan berada dalam keadaan tereksitasi.

3.2.2. Transmutasi dengan Neutron

Perkembangan dalam bidang transmudasi inti sangat terbatas karena partikel α yang diperoleh dari unsur radioaktif alam hanya menghasilkan berkas dengan intensitas rendah, dan transmudasi intinya hanya dapat dilakukan terhadap unsur-unsur bernomor atom rendah. Muncul ide untuk melakukan transmudasi inti dengan proyektil lain, pilihannya jatuh pada

partikel n . Sebelumnya para ilmuwan telah mengetahui, apabila partikel α ditembakkan ke arah target atom-atom ringan, dari atom target itu akan dipancarkan n .

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 , α maupun d . 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 transmudasi inti [16]. Karena sifat netral proyektil n , maka reaksi nuklir yang dihasilkannya jauh lebih bervariasi dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh proyektil lainnya.

Semula para ilmuwan menggunakan sumber n berupa pasangan atom Ra sebagai pemancar α dan beryllium (Be) sebagai target, sehingga menghasilkan sumber Ra-Be sebagai pemancar n . Reaksi nuklir yang terjadi dalam campuran sumber pemancar n dinamakan reaksi (α, n) karena di dalamnya terjadi penyerapan sinar α yang diikuti pancaran n . Namun dengan sumber Ra-Be, intensitas berkas n yang dipancarkan ternyata sangat sedikit. Partikel α yang dipancarkan oleh satu gram Ra hanya mampu menghasilkan sekitar 10 juta buah n per detik dari pelat berilium. Meski berkas n yang dihasilkan sumber tersebut mampu menembus inti atom target, namun jumlahnya dirasa masih terlalu kecil dibanding dengan kebutuhan [12].

Guna meningkatkan jumlah pancaran, pasangan peneliti Perancis Jean Frederic Joliot (1900-1958) bersama istrinya, Irene Joliot-Curie (1897-1956), pada 1934 memperkenalkan sumber pemancar sinar α dari bahan polonium (Po) yang tingkat keradioaktifannya lebih tinggi dibanding Ra [7]. Atom Po mampu memancarkan partikel α dengan energi lebih besar dari 5 MeV. Berkas partikel α yang sangat kuat ini

selanjutnya dipakai untuk menembaki berbagai jenis bahan target dari atom-atom ringan seperti boron (B), aluminium (Al) dan magnesium (Mg). Dari penembakan ini dapat dihasilkan pancaran n dengan intensitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sumber Ra-Be.

Salah satu jenis sumber n yang banyak diminati ilmuwan berupa Po yang dicampur dengan unsur ringan seperti B sehingga dihasilkan sumber Po-B yang mampu memancarkan n dalam jumlah lebih besar dibanding sumber lain yang sudah dikenal saat itu. Sumber pemancar n lainnya adalah Po-Be. Sumber ini merupakan pemancar n yang pertama kali digunakan oleh Sir James Chadwick (1891-1974) pada 1932 untuk meneliti keberadaan n . Sumber ini mempunyai umur paruh 138 tahun, dan n yang dipancarkannya berenergi 5,7 MeV sampai 10,9 MeV [20]. Selain Ra dan Po, unsur-unsur berat berumur paruh panjang seperti americium (Am) dan plutonium (Pu) juga sering digunakan sebagai sumber sinar α dalam bentuk serbuk. Unsur tersebut dengan hati-hati kemudian dicampur serbuk halus Be dan dibungkus dalam kapsul baja tahan karat yang kuat dan rapat.

Pada inti atom target ^{27}Al , reaksi (n, α) menghasilkan inti baru ^{24}Na . Reaksi (n, α) pada inti ^6Li dengan persamaan reaksi nuklirnya $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ dan pada inti ^{10}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 [12]. Reaksi (n, α) menghasilkan inti baru dengan nomor atomnya berkurang dua satuan dan massa intinya berkurang tiga satuan.

Dalam beberapa kasus reaksi nuklir, proyektilel n 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 [12]. Sebagai contohnya adalah

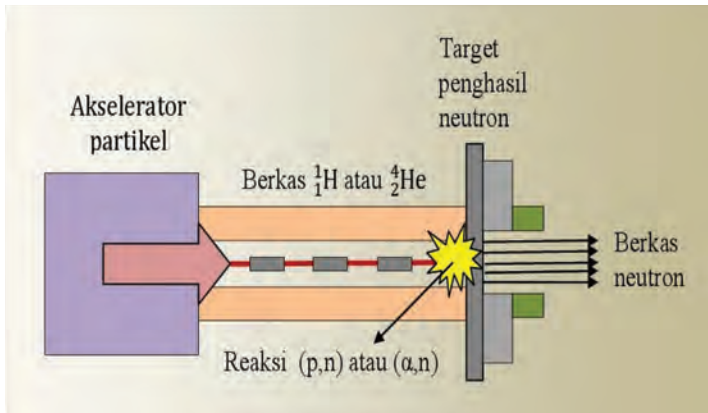
reaksi penyerapan n oleh inti ^{27}Al dengan persamaan reaksi intinya $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ atau penyerapan n oleh inti ^1H dengan persamaan reaksi intinya $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$.

Reaksi kebalikannya juga dapat terjadi [12], dimana inti atom target menyerap energi sinar γ yang cukup untuk mengeluarkan partikel dari dalam inti atom. Reaksi jenis ini disebut sebagai reaksi fotonuklir. 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 $^2\text{H}(\gamma, n)^1\text{H}$.

Neutron merupakan partikel nuklir penyusun inti atom yang tidak bermuatan listrik. Pemancaran neutron secara langsung dari inti atom sebetulnya sulit terjadi. Unsur radioaktif yang dapat memancarkan neutron secara spontan adalah californium-252 (^{252}Cf). Inti atom ini bersifat radioaktif pemancar sinar α yang dapat mengalami fisi nuklir spontan disertai pemancaran neutron dengan laju rata-rata 10 fisi untuk setiap 313 pemancaran sinar α . Umur paruh ^{252}Cf melalui peluruhan sinar α adalah 2,73 tahun [19]. Laju pelepasan neutronnya sebesar $2,31 \times 10^6$ neutron/detik untuk setiap mikrogram ^{252}Cf . Neutron yang dipancarkannya mempunyai jangkauan energi yang sangat luas, dengan nilai rata-rata distribusi energi kira-kira 2,3 MeV.

Neutron cepat dapat diproduksi melalui reaksi nuklir dalam suatu akselerator, sehingga alat ini sering disebut juga sebagai generator (pembangkit) neutron. Pemakaian akselerator sebagai generator neutron memungkinkan dihasilkannya neutron cepat berenergi tunggal. Proses pembangkitan neutron dilakukan dengan cara mempercepat partikel bermuatan seperti α (^4_2He) dan d (^2_1H) kemudian menabrakannya dengan target atom-atom tertentu [12]. Proses ini akan menyebabkan terjadinya transmudasi inti yang diikuti dengan pelepasan neutron dari atom target seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Beberapa contoh transmutasi inti yang menghasilkan neutron adalah: ${}^9_4\text{Be}(d, n){}^{10}_5\text{B}$, ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$, ${}^7_3\text{Li}(\alpha, n){}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_3\text{Li}(\alpha, n){}^{17}_9\text{F}$ dan ${}^{23}_{11}\text{Na}(\alpha, n){}^{26}_{13}\text{Al}$.

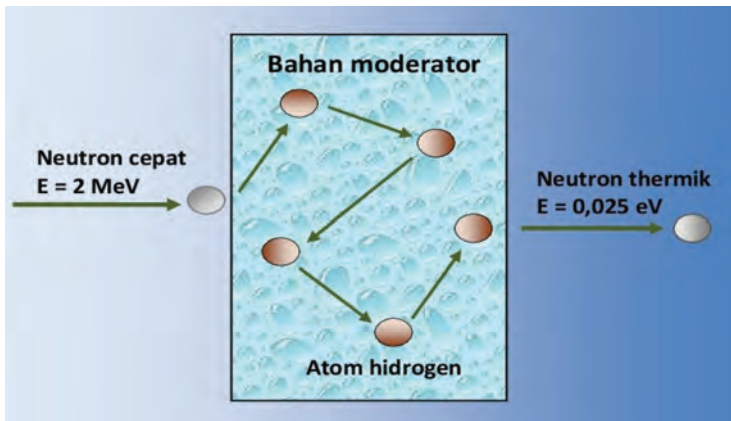


Gambar 3.3. Proses produksi neutron dengan mesin akselerator [12]

Rangkaian penelitian dengan n telah dilakukan oleh fisikawan muda Enrico Fermi (1901-1954) yang pada 1927 menjadi professor fisika teoritis di Universitas Roma. Bersama kawan-kawannya seperti Edoardo Amaldi (1908-1989), Franco Rasetti (1901-2001) dan Emilio Segrè (1905-1989), Fermi pada 1930 merancang penelitian dengan menembakkan n terhadap berbagai jenis unsur mulai dari yang paling ringan hingga yang lebih berat [7]. Penelitian itu dimaksudkan untuk mempelajari hasil reaksi apa saja yang mungkin dapat terjadi, salah satunya adalah untuk mendapatkan unsur radioaktif buatan.

Penembakan dengan n terhadap unsur-unsur ringan mulai dari hidrogen, litium, berilium, boron hingga karbon 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 n dengan bahan-bahan yang tersusun atas

atom-atom ringan seperti air dan parafin. Karakteristik n ketika berinteraksi dengan atom-atom ringan akhirnya diketahui [7]. Fermi mengamati bahwa hasil interaksi antara n dengan atom ringan akan menyebabkan penurunan kecepatan gerak n . Interaksi yang berlangsung berulang kali akan menyebabkan n cepat (berenergi tinggi) berubah menjadi n lambat (berenergi termik) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Proses moderasi neutron cepat menjadi neutron termik [29]

Semula orang beranggapan, n dengan energi tinggi akan lebih mudah menjangkau inti atom. Namun hasil eksperimen Fermi justru menunjukkan kebalikannya. Neutron menjadi cukup mudah ditangkap oleh inti atom suatu bahan apabila gerakannya sangat lambat. Neutron lambat ini ternyata sangat bermanfaat dan reaksi nuklir yang ditimbulkannya cukup menarik perhatian. Dalam waktu relatif singkat, hampir semua unsur yang saat itu sudah dikenal telah diuji Fermi dan kawan-kawan dengan penembakan n termik.

Penurunan kecepatan gerak n sebagaimana diamati Fermi terjadi karena setiap kali terjadi tumbukan antara n dengan inti atom bahan akan disertai dengan pengalihan sebagian energi n kepada bahan. Akibatnya, setelah mengalami beberapa kali

tumbukan, energi n terkuras mendekati habis dan gerakannya menjadi sangat lambat. Neutron ini disebut n thermik karena energinya sama dengan energi gerak molekul gas hidrogen pada temperatur kamar. Jika energi n yang dipancarkan dari sumber semula berorde sekitar 5 Mega elektron Volt (MeV, 1 MeV = 1.000.000 eV), setelah menjadi n thermik energinya tinggal 0,025 elektron Volt (eV) [29].

Untuk selanjutnya, bahan-bahan yang dapat dengan efektif memperlambat gerak n seperti air dan parafin disebut sebagai bahan moderator. Kedua bahan itu banyak mengandung atom hidrogen yang massa intinya hampir sama dengan massa n . Apabila hidrogen berinteraksi dengan n , akan terjadi tumbukan elastis yang mampu menyerap sebagian besar energi n . Melalui proses tumbukan itu, n akan menyerahkan sebagian besar energinya kepada inti atom H. Setelah beberapa kali proses tumbukan, energi rata-ratanya berkurang hingga mencapai beberapa eV [29].

3.3. Pemanfaatan Akselerator

Selain mengupayakan transmudasi inti dengan mengandalkan partikel α dan n , dalam perkembangan berikutnya para ilmuwan menyadari bahwa partikel-partikel inti lainnya seperti p , d dan bahkan sinar γ ternyata dapat dimanfaatkan sebagai proyektil untuk melangsungkan transmudasi inti. Partikel seperti p dan d dengan muatan positif tunggalnya akan mengalami gaya Coulomb yang lebih kecil dari inti target dibandingkan gaya Coulomb yang dialami oleh partikel α . Dengan demikian diharapkan bahwa transmudasi inti dapat dilangsungkan dengan p atau d berenergi lebih rendah. Para ilmuwan memandang penting mengembangkan alat yang dapat mempercepat partikel bermuatan tersebut di laboratorium.

Alat pemercepat partikel atau akselerator (*accelerator*)

adalah alat yang dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan seperti elektron, proton, inti-inti ringan seperti d dan t , serta inti atom lainnya [16]. Pada prinsipnya, semua partikel bermuatan dapat dipercepat gerakannya menggunakan akselerator. Mempercepat gerak partikel bertujuan agar partikel tersebut bergerak sangat cepat sehingga memiliki energi kinetik yang sangat tinggi. Karena dapat dipercepat, maka energi partikel itu dapat diatur sedemikian rupa disesuaikan dengan kebutuhan. Pada mulanya akselerator partikel dipakai untuk penelitian dalam fisika nuklir dengan cara menabrakkan partikel berkecepatan sangat tinggi ke target atom tertentu. Pesawat ini banyak dimanfaatkan oleh pusat-pusat riset fisika energi tinggi.

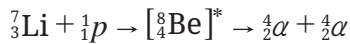
Untuk mempercepat partikel diperlukan medan listrik ataupun medan magnet. Jika partikel bermuatan memasuki ruangan bermedan listrik atau magnet, partikel itu akan mendapatkan percepatan yang besarnya sebanding dengan kuat medan dan besar muatan partikel, dan berbanding terbalik dengan massa partikel. Dilihat dari jenis gerakan partikel, dikenal adanya dua jenis akselerator, yaitu akselerator dengan gerak partikelnya lurus yang lebih dikenal dengan sebutan akselerator linear, dan gerak partikelnya melingkar dengan sebutan akselerator magnetik [12].

Akselerator partikel pertama kali dikembangkan oleh dua orang fisikawan Inggris John D. Cockcroft (1897-1967) dan Ernest T.S. Walton (1903-1995) pada tahun 1929 [12]. Alatnya sendiri diberi nama Pelipatganda Tegangan Cockcroft-Walton. Alat ini digunakan untuk mempercepat partikel yang pertama kali pada tahun 1930. Dengan alat tadi, Cockcroft dan Walton berhasil mempercepat gerak partikel hingga berenergi ratusan ribu eV. Atas jasanya dalam merintis penggunaan akselerator ini, mereka dianugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada tahun 1951 [18].

Di Laboratorium Cavendish, Universitas Cambridge, Inggris, Cockcroft dan Walton menembaki target berupa atom

litium (Li) dengan proyektil p yang dipercepat dalam akselerator hingga berenergi 0,1 – 0,7 MeV. Pemanfaatan p sebagai proyektil merupakan kasus pertama dalam transmudasi inti yang seluruh prosesnya dilakukan secara buatan. Perpindahan oleh partikel yang keluar dari target Li diamati menggunakan layar seng sulfida yang ditempatkan tidak jauh di belakang target .

Dari hasil pengamatan jejak partikel dalam detektor kamar kabut Wilson diketahui bahwa partikel yang keluar dari reaksi antara p dan Li ternyata partikel α . 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 namun arahnya saling berlawanan [7]. Reaksi yang terjadi dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut:



Penemuan reaksi tersebut memiliki arti historis yang cukup menarik perhatian kalangan ilmuwan. Reaksi itu melengkapi bukti-bukti kuantitatif paling awal tentang kebenaran hukum yang menunjukkan hubungan kesetaraan antara massa dan energi sebagaimana dikemukakan oleh Albert Einstein (1879-1955). Reaksi itu juga merupakan jenis reaksi inti 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 [12]. Sejak 1932, beberapa jenis transmudasi inti telah dipelajari secara dan hasilnya sangat bersesuaian dengan hubungan kesetaraan massa-energi yang diturunkan dari persamaan relativitas Einstein.

Beberapa tipe akselerator telah dikembangkan dalam kaitannya untuk studi reaksi nuklir dan penelitian struktur dasar inti yang seringkali menghendaki adanya partikel berenergi sangat tinggi. Energi ini diasosiasikan dengan kecepatan gerak partikel, dimana partikel yang bergerak dengan

kecepatan tinggi berarti memiliki energi kinetik yang sangat tinggi pula. Energi itu sendiri diperlukan untuk mengatasi gaya tolak Coulomb antara partikel dan inti atom yang sama-sama bermuatan positif, sedemikian rupa sehingga partikel itu dapat mendekati inti atom. Tidak lama setelah sukses pengoperasian dan eksperimen dengan akselerator Cockcroft-Walton, Robert J. Van de Graaff (1901-1967) mengembangkan generator elektrostatik di Universitas Princeton dan di Institut Teknologi Massachusetts [12]. Selanjutnya menyusul pembangunan siklotron di Lawrence dan Livingston. Dengan mesin akselerator yang unjuk kerjanya semakin baik, partikel-partikel nuklir seperti p , α dan d dapat dipercepat hingga mencapai energi beberapa MeV.

Dalam perkembangan berikutnya, para ilmuwan berhasil merancang berbagai jenis mesin pemercepat partikel seperti akselerator linear (*linear accelerator*, LINAC), *cyclotron*, *synchocyclotron*, betatron, *electron synchrotron*, *proton synchrotron* dan lain-lain. Akselerator linear pertama kali diperkenalkan oleh Rolf Wideroe (1902-1996) di Swiss pada tahun 1929, namun unjuk kerjanya saat itu kurang memuaskan. LINAC mempunyai kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan akselerator magnetik. Kelebihan LINAC adalah alat ini memerlukan magnet dengan ukuran yang jauh lebih kecil dibandingkan pada akselerator magnetik untuk menghasilkan partikel dengan energi kinetik yang sama [12].

Akselerator linear dapat dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan hingga berenergi di atas 1 Giga elektron Volt (GeV, $1 \text{ GeV} = 1.000.000.000 \text{ eV}$). Partikel yang akan dipercepat diinjeksikan ke dalam ruangan vakum bermedan listrik atau magnet dengan tekanan $10^{-15} - 10^{-26} \text{ mmHg}$. Setelah mencapai tingkat energi sesuai dengan yang diinginkan, berkas partikel itu langsung ditembakkan ke arah target sehingga terjadi reaksi nuklir antara partikel dan inti atom target.

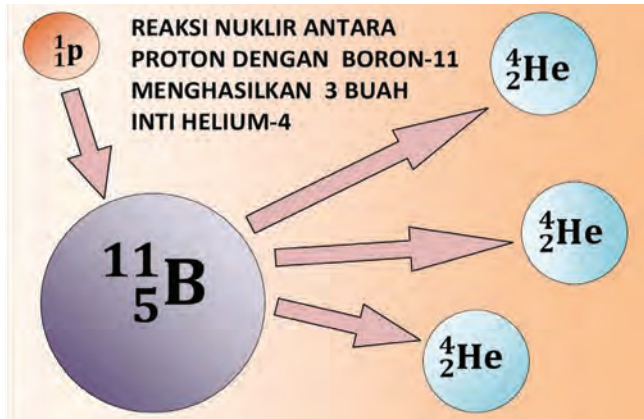
Pesawat LINAC semula dipakai untuk mempercepat

partikel bermuatan positif seperti p . Namun setelah melalui berbagai modifikasi, mesin ini dapat pula dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan negatif seperti e . Dalam hal ini e yang dipercepat mampu bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Elektron dengan energi 2 MeV bergerak dengan kecepatan $0,98c$, dengan c adalah kecepatan cahaya, nilainya 3×10^8 m/s. Jika e berenergi tinggi itu ditabrakkan pada target dari logam berat, maka dari pesawat LINAC ini akan dipancarkan sinar-X berenergi tinggi.

Akselerator generasi mutakhir mampu menghasilkan partikel berenergi sangat tinggi. Modifikasi peralatan dan desain akselerator baru seperti *synchrotron* memungkinkan percepatan gerak partikel hingga berenergi dalam orde GeV. Cosmotron di Brookhaven National Laboratory di Amerika Serikat mampu mempercepat p hingga berenergi 2,5 GeV. Mesin yang dibangun berikutnya mampu menghasilkan partikel berenergi 25 GeV. TRISTAN (*Transportable Ring Intersecting Storage Accelerator on Nippon*) yang dibangun di Jepang dan mulai dioperasikan tahun 1986 mampu menghasilkan partikel berenergi 60-70 GeV. Pusat Riset Nuklir Bersama Eropa Barat (CERN) memiliki akselerator yang mampu mempercepat partikel hingga berenergi 140 GeV. Akselerator partikel di Batavia, AS, mampu mempercepat partikel hingga berenergi 800 GeV. Di laboratorium fisika energi tinggi, akselerator mutakhir seperti yang terdapat di Fermi Lab di AS mampu memberi energi kinetik pada partikel yang dipercepat hingga mencapai energi berorde TeV ($T = \text{terra}$, $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) [12].

Beberapa contoh transmudasi inti melalui proses reaksi inti jenis (p, α) , dimana proyektil p dipercepat terlebih dahulu di dalam akselerator 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 dapat 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 partikel α atau inti helium (He). Jadi hasil akhir dari reaksi (p, α) terhadap

target atom ^{11}B adalah tiga buah partikel $\frac{4}{2}\alpha$ atau inti $\frac{4}{2}\text{He}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Transmutasi inti atom boron-11 oleh proton [12]

Kehadiran akselerator menjadi bagian penting dalam riset fisika nuklir di laboratorium fisika energi tinggi. Berbagai jenis transmutasi inti atom dapat dilakukan menggunakan berbagai jenis proyektil partikel bermuatan yang dipercepat dalam akselerator. Dari kegiatan ini para ilmuwan dapat menghadirkan berbagai jenis unsur kimia baru secara buatan yang sebelumnya tidak ditemukan di alam. Dari semula hanya ada 92 jenis atom yang dapat ditemukan di alam, kini para ilmuwan telah berhasil menghadirkan atom-atom buatan sehingga jumlah atom mencapai lebih dari 100 jenis [30].

3.4. Radioaktivitas Buatan

Sumbangan yang berarti dalam penelitian radioaktivitas buatan diberikan oleh dua ilmuwan Perancis, Jean Frederic Joliot bersama istrinya, Irene Joliot-Curie [7]. Dalam salah satu penelitiannya, mereka menembaki pelat Al dengan partikel α . Berkas n yang dipancarkan dari pelat Al di arahkan ke dalam

kamar-kabut Wilson. Alat ini dipakai untuk mengamati jejak partikel radiasi melalui efek tumbukannya dengan partikel lain. Alat yang dirancang pertama kali pada 1911 oleh fisikawan eksperimentalis Scotlandia, Charles T.R. Wilson (1869-1959), ini mampu memetakan radiasi secara akurat. Pemantau radiasi ini terdiri atas sebuah silinder gelas berpenghisap yang diisi udara dengan uap air jenuh dan dipertahankan pada tekanan tertentu.

Prinsip yang mendasari cara kerja kamar-kabut Wilson adalah bahwa uap air lebih mudah mengembun di sekeliling partikel bermuatan listrik [19]. Jika partikel radiasi masuk ke dalam kamar-kabut itu, maka radiasi akan mengionkan udara di dalamnya. Ion-ion yang terbentuk akan bertindak sebagai pusat-pusat kondensasi (pengembunan) sehingga terbentuklah tetes-tetes air yang menyerupai butiran air hujan. Sebagai akibatnya, suatu jejak uap air dapat teramati sepanjang lintasan partikel, Jejak ini selanjutnya dipotret secara otomatis sebelum menyebar. Melalui pengamatan dengan kamar-kabut Wilson ini, para peneliti dapat memperoleh data visual dalam bentuk kesan tampak dari lintasan partikel radiasi. Dari visualisasi lintasan itu dapat dianalisis sifat-sifat dari radiasi yang bersangkutan.

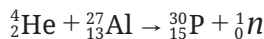
Dengan kamar-kabut Wilson, Frederic dan Irene Joliot-Curie dapat mengamati sejumlah besar jejak yang ditinggalkan oleh partikel-partikel ringan bermuatan positif. Hasil pengukuran memperlihatkan bahwa massa partikel ringan itu ternyata sama dengan massa elektron. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi tentang keberadaan sejenis radiasi yang diberi nama positron. Radiasi itu sebelumnya diamati oleh Anderson, melalui penelitiannya tentang sinar kosmis sebagaimana telah dikemukakan pada bagian 3.1.

Hal lain yang lebih menarik dari hasil penelitian pasangan Frederic dan Irene Joliot-Curie adalah teramatinya fenomena berikut. Apabila sumber Po diambil dan Al tidak lagi tertembaki dengan berkas partikel α , maka sumber neutronnya lenyap.

Hal ini tentu sesuai dengan yang diperkirakan sebelumnya. Anehnya, pancaran positron tetap berlangsung dengan laju pancarannya semakin lama semakin kecil. Setiap 2,5 menit, laju pancaran positronnya turun menjadi setengah dari laju pancaran sebelumnya. Semula tentu Frederic dan Irene Joliot-Curie tidak menyadari adanya zat radioaktif baru pemancar positron dengan umur paruhnya 2,5 menit. Hasil penelitian ini memberi kesan bahwa penembakan partikel α memicu kemunculan unsur baru di dalam pelat Al. Unsur baru itu bersifat radioaktif pemancar positron dengan umur paruhnya 2,5 menit [7].

Gejala baru yang teramati oleh Frederic dan Irene Joliot-Curie ternyata sangat berbeda dengan keradioaktifan alamiah yang sudah diketahui saat itu, dimana ketika pelat Al ditembaki lagi dengan partikel α , maka pancaran positron kembali berlangsung. Hasil analisis yang lebih rinci menunjukkan bahwa inti atom Al (${}^{27}_{13}\text{Al}$) dapat mengeluarkan sebuah proton (1_1p) dari intinya setelah menangkap partikel α (${}^4_2\text{He}$). Inti atom Al yang kehilangan sebuah proton itu berubah menjadi inti atom baru berupa phosphor yang bernomor massa 30 (${}^{30}_{15}\text{P}$). Inti atom baru yang terbentuk ternyata tidak stabil (bersifat radioaktif) sehingga segera melakukan peluruhan untuk menjadi inti yang stabil. Dalam proses peluruhannya, ${}^{30}_{15}\text{P}$ memancarkan sebuah positron (0_1e atau ${}^0_1\beta$) membentuk inti baru berupa silikon (${}^{30}_{14}\text{Si}$)

Berdasarkan analisis tersebut, jelaslah bahwa pasangan peneliti Frederic dan Irene Joliot-Curie telah berhasil melakukan transmudasi inti atom buatan dengan hasil berupa inti atom baru yang bersifat radioaktif. Dari penelitian yang dilakukan pada 1934 inilah ilmuwan berhasil menghadirkan unsur radioaktif buatan untuk pertama kalinya [31]. Proses reaksi inti untuk penemuan radioaktivitas buatan yang pertama itu dapat ditulis sebagai berikut:





Karena eksperimen Frederic dan Irene Joliot-Curie dipandang menghasilkan terobosan penting dalam perkembangan ilmu kimia, maka panitia Nobel menganugerahi hadiah Nobel Kimia 1935 kepada pasangan peneliti tersebut. Memasuki akhir 1938, berbagai jenis atom radioaktif buatan berhasil dihadirkan. Umumnya kehadiran atom radioaktif buatan itu dihasilkan melalui proses pengaktifan dengan n . Pengenalan berbagai jenis sumber yang dapat memancarkan neutron dalam jumlah besar sangat membantu para ilmuwan dalam penelitian radioaktivitas buatan.

Salah satu proses fisika yang dapat berlangsung di dalam inti atom adalah proses pengaktifan (*activation*), yaitu ditembakinya inti-inti atom bahan oleh n sehingga bahan yang semula tidak radioaktif berubah sifatnya menjadi radioaktif yang mampu memancarkan radiasi. Dari proses pengaktifan ini akan diperoleh berbagai jenis atom radioaktif yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Namun adakalanya proses pengaktifan juga menghasilkan atom-atom radioaktif yang sebenarnya tidak dikehendaki kemunculannya.

Proses pengaktifan yang berlangsung di laboratorium dilakukan dengan cara menembaki unsur-unsur stabil dengan n . Bahan yang akan diaktivasi disebut target. Neutron yang ditembakkan akan masuk ke dalam inti atom sehingga jumlah n dalam inti atom bahan target tersebut bertambah. Perubahan jumlah n dalam inti target ini dapat mengakibatkan kestabilan inti atom terganggu sehingga inti berubah sifat menjadi radioaktif.

Proses pengaktifan yang sengaja diusahakan oleh manusia antara lain adalah dalam proses produksi radioisotop. Dalam reaktor nuklir, neutron-neutron yang dipancarkan oleh proses fisi sebagian dimanfaatkan untuk keperluan ini. Pengaktifan neutron dalam lingkup yang lebih kecil dipakai juga untuk menganalisa bahan dengan teknik yang dikenal sebagai

analisa pengaktifan neutron (APN). Dari proses aktivasi ini akan diperoleh sampel radioaktif yang mampu memancarkan radiasi. Dengan menganalisa radiasi yang dipancarkannya dapat ditentukan jenis dan jumlah unsur kelumit yang terdapat dalam sampel yang diaktivasi. Dari proses pengaktifan dapat dihadirkan berbagai jenis bahan radioaktif baru hasil transmudasi inti yang sebelumnya tidak ditemukan di alam.

3.5. Reaksi Fisi

Pada Desember 1928, Otto Hahn (1879-1968) dan Fritz Strassman (1902-1980) melakukan penelitian di Institut Kaiser Wilhelm, Jerman, dengan cara menembaki unsur uranium dengan partikel neutron termal [32]. Semula mereka mendapatkan hasil yang sangat aneh sekaligus membingungkan. Ketika dilakukan analisis kimia yang lebih saksama terhadap inti atom hasil penembakan neutron termal 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 [7].

Hahn dan Strassman mengulang kembali penelitian semula dengan pengamatan yang tingkat ketelitiannya lebih tinggi. Namun keanehan yang sama ternyata muncul kembali pada penelitian ulangan. 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 [7].

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 [32]. Namun akhirnya Frisch teringat pada teori “model tetes cairan” (*liquid drop model*) yang pernah diusulkan oleh Niels Bohr (1885-1962) dan Fritz Kalckar (1910-1938) yang didengarnya di suatu seminar di Institut Niels Bohr pada 1936.

Menurut teori Bohr dan Kalckar, inti atom berat seperti inti uranium sejatinya mirip setetes cairan. 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. 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 [28]. 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.

Otto Frisch dan Lise Meitner (1878-1968) 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 makalahnya Frisch menggunakan istilah fisi (*fission*) untuk menamai reaksi pembelahan yang terjadi pada inti atom berat seukuran uranium [7].

Dalam kesempatan terpisah, Frisch mengirimkan makalah lainnya, juga ke jurnal *Nature*, dimana ia meramalkan bahwa proses fisi inti uranium akan dibarengi oleh pembebasan 2 hingga 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

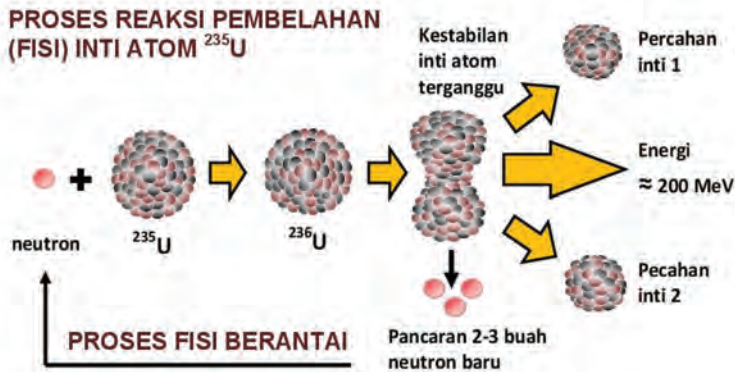
fisikawan untuk membuktikan kebenaran ramalannya melalui berbagai eksperimen. Karena setiap proses fisi selalu diikuti oleh pembebasan energi nuklir sebesar 200 MeV, mereka membayangkan akan diperoleh pembebasan energi nuklir dalam jumlah besar yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan hidup umat manusia [29].

Enrico Fermi menjadi Profesor Fisika Teoritis di Universitas Roma dari tahun 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 beremigrasi menuju Amerika Serikat, dalam rangka menghindari pemimpin fasis Benito Mussolini (1883-1945) yang saat itu berkuasa di Italia. Tiba di New York tanggal 2 Januari 1939, Fermi langsung diterima sebagai Profesor Fisika di Universitas Columbia, New York [33].

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 reaksi fisi 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 R. Dunning (1907-1975) dan Herbert Anderson (1914-1988) 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 [32]. 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 (1898-1964) dan berhasil menemukan bahwa uraniumlah unsur yang paling tepat untuk melangsungkan reaksi fisi nuklir berantai. Mereka juga berhasil membuktikan adanya penggandaan neutron pada uranium yang memiliki potensi untuk pembuatan senjata nuklir. Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai kalangan, ternyata semuanya berhasil mengkonfirmasi kebenaran terjadinya reaksi fisi pada atom uranium. Dimana inti uranium yang melakukan proses fisi pecah menjadi dua inti yang lebih kecil (Z lebih kecil) dan massanya lebih ringan (A lebih ringan) dibandingkan inti uranium seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6 [29].



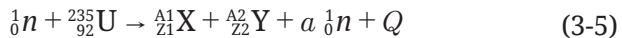
Gambar 3.6. Proses fisi inti atom uranium-235 [29]

Fakta menakjubkan terkait dengan penemuan reaksi fisi adalah 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 (1908-1964), Frederic Joliot-Curie, dan Lew Kowarski (1907-1979) di Perancis yang mempublikasikan hasil eksperimennya dalam dua jurnal di musim gugur pada 1939. Dari beberapa konfirmasi mengenai hasil penelitian, para

ilmuwan akhirnya mendapatkan suatu gambaran umum mengenai fisi uranium sebagai berikut: inti atom uranium yang melakukan reaksi fisi pecah menjadi dua inti dengan ukuran lebih kecil disertai dengan pelepasan 2-3 buah neutron dan energi inti atau energi nuklir dalam bentuk panas (energi termal) sebesar kurang lebih 200 MeV [34].

Reaksi yang ditemukan oleh Hahn dan Strassman 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 fisi atom uranium tersebut dikatakan reaksi inti, karena setelah terjadi reaksi tidak ditemukan lagi adanya inti atom uranium, karena inti uranium pecah menjadi dua inti dengan ukuran lebih kecil (Z dan A nya lebih kecil). 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 [35].

Secara umum, proses fisi uranium-235 dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut [29]:



dengan n adalah neutron, $Z1$ dan $Z2$ adalah nomor atom inti-inti hasil fisi, $A1$ dan $A2$ adalah nomor massa inti-inti hasil fisi, a adalah jumlah neutron yang dilepaskan, dan Q adalah energi termik yang keluar dari proses fisi. Jumlah dari $Z1$ dan $Z2$ adalah 92 ($Z1 + Z2 = 92$), sama dengan Z uranium. Dalam hal ini pada proses fisi berlaku hukum kekekalan Z . Jumlah massa sebelum proses fisi (sebelah kiri tanda panah) adalah $1u + 235u = 236u$, sehingga jumlah dari $A1$, $A2$ dan a adalah 236 ($A1 + A2 + a = 236$), dengan nilai a bisa 2 atau 3, bergantung pada proses fisinya. Dalam proses fisi juga berlaku hukum kekekalan A . Nilai Q adalah sekitar 200 MeV, berasal dari konversi sebagian massa inti uranium yang berubah menjadi

energi nuklir [12]. Berikut ini diberikan beberapa contoh proses fisi uranium tanpa menyertakan energi termik yang dilepaskan:



Keberhasilan umat manusia dalam mengendalikan reaksi nuklir berantai dalam reaktor nuklir serta maraknya uji coba senjata nuklir pada pertengahan abad ke 20 telah memperkaya khasanah pengetahuan berkaitan dengan inti atom [36]. Beberapa atom radioaktif baru hasil proses fisi bermunculan sehingga mulai dikenal dan dipelajari oleh para ilmuwan. Jika pada saat Dmitri Ivanovic Mendeleev (1834-1907) menyusun tabel periodik unsur-unsur baru dikenal adanya 70 jenis unsur kimia, kemudian ilmu pengetahuan modern berhasil menemukan unsur-unsur lain sehingga jumlahnya menjadi 92 unsur, maka proses fisi uranium-235 berhasil menghadirkan 11 unsur buatan baru sehingga jumlah unsur dalam tabel periodik menjadi 103 unsur [30].

Proses fisi uranium-235 merupakan proses yang tidak simetri, artinya dua inti yang dihasilkan umumnya memiliki nilai A yang berbeda [12]. Kemungkinan yang paling besar menunjukkan bahwa inti atom hasil fisi mempunyai nilai A bervariasi antara 95 sampai dengan 135 dengan jumlah neutron (N) di dalam intinya berkisar antara 50 sampai 82. Nomor atom unsur-unsur hasil fisi tersebut bervariasi dari 30, yaitu ${}_{30}^{72}\text{Zn}$ (seng) hingga 64, yaitu ${}_{64}^{138}\text{Gd}$ (gadolinium). Inti-inti atom hasil fisi tersebut dapat juga dikelompokkan ke dalam inti ringan dengan A dari 85 hingga 104 dan inti berat dengan A dari 130 hingga 149. Di antara kedua kelompok tersebut merupakan inti-inti menengah. Semua atom hasil fisi bersifat radioaktif. Dalam peluruhannya, beberapa atom tersebut dapat membentuk rantai peluruhan yang terdiri atas beberapa atom radioaktif anak.

Ledakan senjata nuklir yang terjadi di Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945 menghasilkan antara 30-40 atom baru yang semula belum dikenal [37]. Karena bersifat radioaktif, atom-atom baru tersebut masih melakukan peluruhan sehingga menghasilkan atom-atom lain yang juga bersifat radioaktif, sehingga jumlah atom yang keluar dari ledakan senjata nuklir dalam bentuk debu-debu radioaktif dapat mencapai sekitar 200 jenis atom.

3.6. Reaksi Fusi

Di masa lalu, ketika ilmu pengetahuan baru lahir, manusia hanya mengenal adanya dua macam gaya, yaitu gaya gravitasi dan gaya elektromagnetik. Apel yang jatuh ke bumi seperti yang diamati oleh Isaac Newton (1643-1727) disebabkan oleh adanya gaya gravitasi dari pusat bumi. Gaya ini ditransmisikan oleh graviton yang hingga saat ini belum berhasil dideteksi oleh manusia. Gaya elektromagnetik dapat kita temukan pada semua jenis gelombang elektromagnetik seperti cahaya tampak, sinar-X, gelombang radio, TV, radar dan sebagainya. Gaya elektromagnetik mempunyai peran yang sangat penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Gaya ini merupakan dasar dari beberapa penemuan penting selama abad ke-20 lalu. Dari beberapa percobaan dan pertolongan teori elektrodinamika kuantum, manusia berhasil memastikan bahwa foton merupakan pembawa gaya elektromagnetik ini.

Ketika dunia fisika modern lahir yang dimulai sejak awal abad ke-20, penyelidikan para fisikawan beralih ke struktur atom. Dalam rangka memahami atom inilah, para fisikawan memerlukan adanya dua gaya lagi untuk menjelaskan atom, yaitu gaya inti lemah dan gaya inti kuat [21]. Gaya inti lemah dipakai untuk menerangkan peluruhan di dalam inti atom radioaktif sebagaimana telah dibahas pada bagian 3.1. Ada suatu kenyataan bahwa inti atom radioaktif melakukan peluruhan secara spontan. Selama peristiwa peluruhan itu, di

dalam inti atom terjadi perubahan proton menjadi neutron atau sebaliknya, bergantung pada jenis radiasi yang dipancarkan inti. Di sinilah gaya inti lemah berperan.

Gaya inti kedua adalah gaya kuat yang dipakai untuk mengimbangi gaya tolak elektrostatis antara proton-proton dalam inti atom. Hukum Coulomb menyatakan bahwa partikel-partikel yang muatan listriknya sejenis akan saling tolak-menolak, sedang yang muatan listriknya tidak sejenis akan saling tarik-menarik. Hukum itu memang diakui kebenarannya dan bisa diuji dengan cara sederhana di laboratorium. Tetapi kenyataannya inti atom tersusun atas proton-proton yang bermuatan listrik positif dan juga neutron yang tidak bermuatan listrik. Pertanyaannya adalah kenapa inti atom tidak pecah berantakan? Logika pertanyaan ini adalah karena proton-proton penyusun inti atom itu bermuatan listrik positif maka menurut hukum Coulomb tadi harus saling tolak-menolak sehingga letak mereka saling berjauhan dan inti atom akan pecah berantakan. Namun kenyataannya inti atom tetap utuh. Disinilah gaya inti kuat memainkan peranannya.

Pada tingkat atomik, gaya-gaya yang dominan adalah gaya inti lemah yang bertanggungjawab atas proses peluruhan inti atom radioaktif, dan gaya inti kuat yang berperan mempertahankan keutuhan inti atom stabil [10]. Gaya inti kuat mengikat proton-proton di dalam inti atom, sehingga tidak terpisah satu sama lainnya karena gaya tolak elektrostatis. Gaya inti kuat ini juga memainkan peran yang sangat penting dalam proses fusi nuklir yang melibatkan penggabungan inti-inti atom ringan membentuk satu inti atom yang lebih berat. Reaksi fusi pada prinsipnya adalah kebalikan dari reaksi fisi. Pada proses fisi, inti atom berat pecah menghasilkan inti-inti atom yang lebih ringan sebagaimana telah dibahas pada bagian 3.5. Sedang dalam proses fusi, inti-inti atom ringan bergabung membentuk inti atom yang lebih berat.

Agar dapat melangsungkan reaksi fusi, inti-inti harus memiliki energi kinetik yang cukup untuk mengatasi gaya

tolak Coulomb antar muatan positif inti. Dalam keadaan biasa, karena sama-sama bermuatan positif, dua inti akan saling tolak-menolak. Gaya tarik-menarik gravitasi antara dua inti sangat kecil dibandingkan gaya tolak elektrostatisnya, sehingga untuk dapat melakukan proses fusi, kedua inti itu harus dapat mengatasi gaya tolak elektrostatis antar keduanya terlebih dahulu. Gaya tolak Coulomb berbanding lurus dengan muatan listrik, sehingga semakin besar inti atom (semakin besar Z suatu atom) akan semakin besar pula gaya Coulomb yang dialami inti. Dengan demikian, semakin besar pula energi kinetik yang diperlukan untuk melangsungkan proses fusi pada inti tersebut [28]. Karena hambatan energi kinetik ini maka proses fusi umumnya hanya berlangsung pada inti-inti ringan atau bermuatan listrik rendah.

Masalah gaya tolak Coulomb tidak muncul dalam reaksi fisi karena neutron yang ditembakkan ke inti atom bahan fisi tidak bermuatan listrik, sehingga dapat menerobos ke dalam inti meskipun energi kinetiknya sangat rendah, bahkan mendekati nol. Jika kedua inti berada pada jarak yang sangat dekat, maka keduanya dapat menyatu karena adanya gaya inti kuat yang dapat mengikat kedua inti. Wilayah kerja gaya inti kuat ini memang sangat pendek jangkauannya, tidak lebih dari ukuran inti atom. Tetapi karena setiap bahan tersusun atas atom-atom yang di dalamnya terdapat proton, maka gaya inti kuat memiliki arti penting untuk menerangkan fenomena alam, termasuk proses terjadinya fusi nuklir [28].

Fusi nuklir yang berlangsung di permukaan bumi pertama kali diperoleh pada 1930 dengan cara menembaki target deuterium dengan inti deutron berenergi tinggi yang dipercepat dalam pemercepat partikel (akselerator) *Cyclotron* [7]. Selain dengan jalan mempercepat gerak partikel dengan akselerator, energi kinetik partikel dapat diperbesar dengan cara memanaskan inti pada temperatur yang sangat tinggi hingga jutaan Kelvin (K). Inilah konsep dasar yang selama ini diyakini oleh para fisikawan dan selalu dipakai dalam kegiatan

penelitian reaksi fusi. Karena hanya dapat berlangsung pada temperatur yang sangat tinggi, reaksi nuklir melalui cara yang kedua ini sering disebut dengan reaksi termonuklir (*thermonuclear reaction*) [12].

Agar reaksi fusi bisa berlangsung, inti-inti atom yang akan berfusi harus memiliki energi kinetik cukup untuk mengatasi gaya tolak elektrostatik antar keduanya. Pemberian energi itu dapat dilakukan melalui peningkatan energi kinetik pada salah satu atau kedua inti. Energi kinetik yang diperlukan agar dua inti dapat saling berdekatan atau saling kontak dapat dihitung menggunakan persamaan energi potensial (E_p) listrik. Jika dua inti masing-masing bernomor atom Z_1 dan Z_2 saling terpisah dengan jarak r , maka besar energi potensial yang dialami masing-masing inti tersebut adalah [28]:

$$E_p = \frac{(Z_1 e)(Z_2 e)}{4\pi\epsilon_0 r} = k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (3-6)$$

dengan k adalah tetapan Coulomb dan e adalah muatan elementer sebuah elektron. Jika r berorde jari-jari inti (10^{-14} m), maka dengan mensubstitusikan harga e ($1,6 \times 10^{-19}$ C) dan k (9×10^9 Nm/C) ke persamaan (3-6) diperoleh :

$$\begin{aligned} E_p &\approx 2,4 \times 10^{-14} Z_1 Z_2 \text{ (Joule)} \approx 1,5 \times 10^5 Z_1 Z_2 \text{ (eV)} \\ &\approx 0,15 \times Z_1 Z_2 \text{ (MeV)} \end{aligned}$$

Jika reaksi fusi itu terjadi antara inti-inti ringan, misal inti atom hidrogen, maka nilai Z_1 dan Z_2 masing-masing adalah 1, sehingga dari persamaan di atas diperoleh nilai $E_p \approx 0,15$ MeV atau 150 kilo elektron Volt (keV). Jika inti-inti itu tidak memiliki energi kinetik sama atau lebih besar dibandingkan E_p maka reaksi fusi sangat sulit terjadi.

Energi kinetik rata-rata suatu partikel setara dengan temperatur absolut, T (dalam Kelvin, disingkat K). Temperatur yang diperlukan untuk melangsungkan reaksi fusi ternyata sangat tinggi. Hal itu dapat dilihat dari hubungan kesetaraan antara energi partikel dan temperatur lingkungan seperti

ditunjukkan pada persamaan berikut [28]:

$$E_k = \frac{3}{2} k T \quad (3-7)$$

dengan k adalah konstanta Boltzmann yang nilainya $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$. Misal dipilih energi kinetik terendah dari partikel yang masih memungkinkan terjadinya reaksi fusi ($E_k = 10 \text{ keV}$ atau 10^4 eV), dari persamaan (3-7), temperatur lingkungan yang diperlukan untuk mendapatkan energi tersebut adalah:

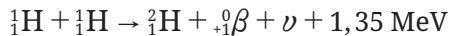
$$T = \frac{2}{3} \frac{(10^4 \text{ eV})(1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}})}{1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}}$$

$$T = 77.000.000 \text{ K}$$

Nilai temperatur ini jauh lebih tinggi dibandingkan temperatur yang dipercayai ada pada permukaan maupun inti matahari. Pada temperatur setinggi itu, elektron-elektron terkelupas dari atom. Hasilnya adalah inti-inti atom berbentuk gas yang terionisasi sempurna. Gas sangat panas ini disebut plasma. Sifat dari plasma ini adalah netral karena merupakan campuran antara inti bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif.

Reaksi fusi memiliki peran penting dalam proses produksi energi pada matahari dan bintang-bintang lainnya. Matahari merupakan salah satu jenis bintang yang sudah dipelajari sejak lama dan dikenal cukup baik. Temperatur efektif permukaan matahari kira-kira 6.000 K, sedang temperatur dalam intinya berkisar antara 10 – 20 juta K. Di bagian inti matahari inilah massa terkonsentrasikan dan sebagian besar produksi energi berlangsung. Kerapatan massa inti matahari $\sim 1,5 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$, kira-kira 13 kali lebih tinggi dibandingkan kerapatan massa timah. Meskipun tekanan di pusat sangat tinggi, namun karena temperaturnya juga sangat tinggi, maka seluruh komponen penyusun tubuh matahari tetap berupa gas.

Dalam inti matahari, inti-inti atom bergerak dengan energi kinetik 1 keV. Inti hanya memiliki energi kinetik 0,025 eV (40.000 kali lebih rendah) jika berada pada temperatur ruang. Temperatur yang demikian tinggi diperlukan agar inti-inti atom yang akan berfusi dapat berinteraksi satu sama lainnya. Dalam inti bintang yang baru lahir, gravitasi menghasilkan suhu sangat tinggi yang dibutuhkan untuk menggabungkan inti-inti atom H. Dalam serangkaian reaksi termonuklir, empat inti ${}^1_1\text{H}$ akan membentuk satu inti ${}^4_2\text{He}$ [12]. Mula-mula dua buah inti H melakukan fusi membentuk inti deuterium (D atau ${}^2_1\text{H}$) disertai pemancaran positron (${}^0_{+1}\beta$) dan *neutrino* (ν) dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:



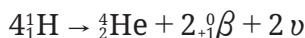
Reaksi tersebut terjadi dua kali sehingga dihasilkan dua buah inti D (langkah-1). Dalam beberapa detik, setiap inti D yang terbentuk itu akan melakukan reaksi fusi dengan inti H sehingga menghasilkan dua buah inti ${}^3_2\text{He}$ (langkah-2) dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut :



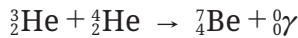
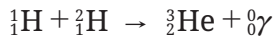
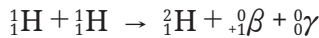
Kedua inti ${}^3_2\text{He}$ selanjutnya melakukan reaksi fusi sehingga menghasilkan inti ${}^4_2\text{He}$ disertai pemancaran dua buah inti H (langkah-3) dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut :



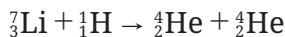
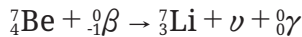
Ketiga langkah rantai reaksi tadi juga disebut siklus hidrogen-hidrogen (siklus H-H), karena reaksinya dimulai dari fusi empat inti H, dan pada akhir siklus dilepaskan dua inti H. Persamaan reaksi fusi di dalam matahari yang merupakan gabungan dari ketiga langkah dalam siklus H-H dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut:



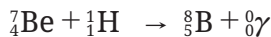
Reaksi fusi dalam bentuk siklus hidrogen diduga cukup memegang peranan pada temperatur yang relatif rendah, yaitu temperatur matahari pada saat baru lahir sekitar 4,5 miliar tahun silam [12]. Untuk kondisi matahari saat ini, dimana temperatur intinya lebih tinggi dan kadar ${}^4\text{He}$ -nya lebih besar, maka reaksi fusi yang lebih berperan adalah pembentukan inti atom beryllium (Be) disertai pancaran radiasi gamma (γ) dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:



Reaksi fusi yang melibatkan *Be* masih dapat berlangsung sehingga menghasilkan inti atom litium (*Li*) melalui penyerapan elektron atau sinar beta (${}^0_{-1}\beta$) dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:



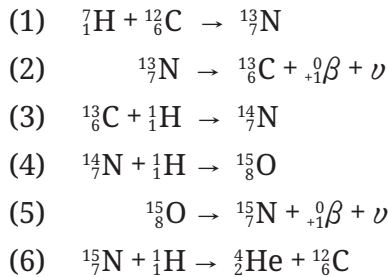
Sedang reaksi fusi lainnya yang juga diperkirakan berlangsung di dalam matahari saat ini adalah proses pembentukan inti atom boron (B) dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut:



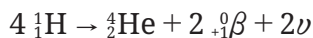
Masih ada kemungkinan lain terjadinya reaksi termonuklir dalam bintang yang menghasilkan energi lebih panas lagi [12]. Reaksi jenis ini disebut siklus karbon karena dimulai dengan karbon (C) dan diakhiri dengan keluarnya karbon. Rangkaian rantai reaksi ini juga disebut siklus Bethe, karena diusulkan pertama kali oleh Hans A. Bethe

(1905-2005), astrofisikawan Jerman-Amerika Serikat. Proses berlangsungnya siklus karbon dimulai dari fusi antara inti H dengan ^{12}C yang menghasilkan nitrogen-13 atau ^{13}N (langkah-1). Sifat ^{13}N yang radioaktif menyebabkan radionuklida tersebut meluruh menjadi karbon-13 (^{13}C) disertai pemancaran positron (langkah-2).

Inti ^{13}C selanjutnya melakukan fusi dengan inti H sehingga menghasilkan ^{14}N (langkah-3). Fusi berikutnya terjadi antara ^{14}N dengan inti H sehingga menghasilkan oksigen-15 atau ^{15}O (langkah-4). Peluruhan ^{15}O menghasilkan ^{15}N disertai pemancaran positron (langkah-5). ^{15}N melakukan fusi dengan inti H sehingga menghasilkan inti ^4He dan ^{12}C (langkah-6). Atas keberhasilannya dalam menerangkan sumber energi bagi matahari ini, maka Bethe dianugerahi hadiah Nobel bidang fisika pada 1967 [18]. Persamaan reaksi inti dari langkah-1 sampai dengan langkah-6 adalah sebagai berikut:



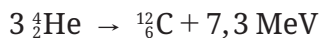
Dari keenam persamaan reaksi tadi, ^{12}C dapat diumpamakan berperan sebagai katalisator, karena ^{12}C yang mula-mula dibakar ternyata muncul lagi pada akhir siklus reaksi [12]. Proses fusi siklus karbon dapat pula ditulis dalam bentuk sederhananya sama seperti siklus hidrogen sebagai berikut :



Selama bertahun-tahun ada anggapan bahwa reaksi fusi siklus karbon berperan sebagai sumber energi bagi hampir semua bintang. Namun akhir-akhir ini diperoleh data

nuklir baru sehingga rantai fusi siklus hidrogen diduga lebih berperan sebagai sumber energi dari pada siklus karbon untuk bintang-bintang yang kurang terang dibandingkan matahari. Sedang untuk bintang-bintang yang lebih terang dibandingkan matahari, siklus karbon diduga lebih berperan dalam memproduksi energi. Sebuah bintang seperti matahari memiliki cukup bahan bakar untuk menghidupi dirinya hingga kira-kira 10 miliar tahun [38]. Karena reaksi nuklir ini terjadi di pusat bintang, maka pada inti bintang tersebut akan banyak sisa hasil pembakaran berupa ${}^4\text{He}$.

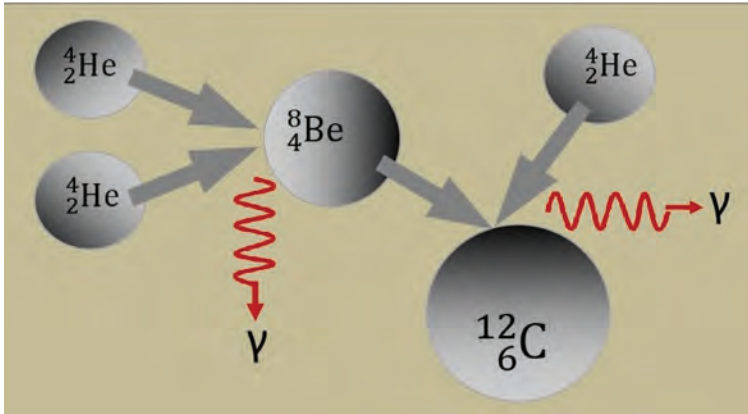
Ketika sebuah bintang telah membakar habis semua H yang ada di dalamnya, maka bintang akan menyusut. Bersamaan dengan peristiwa ini inti matahari akan memanas, sedang bungkus luarnya akan mengembang demikian jauhnya hingga mencapai lintasan bumi. Oleh para ahli astronomi, matahari tersebut dikatakan telah berubah menjadi raksasa merah (*red giant*). Suhu matahari dapat mencapai tingkat yang memungkinkan terjadinya pembakaran He melalui proses fusi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7, dimana tiga inti He melakukan proses fusi membentuk inti C dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut:



Dalam bintang-bintang yang sangat masif, pembakaran He menjadi C bukan merupakan rantai terakhir dari reaksi nuklir yang terjadi di dalamnya. Inti bintang itu masih cukup panas untuk dapat memicu terjadinya fusi nuklir baru dan membentuk inti atom yang lebih berat, seperti magnesium-24 (${}^{24}\text{Mg}$). Proses ini dapat terus berlangsung hingga terbentuklah unsur-unsur baru yang lebih berat, dan berakhir ketika silikon-28 (${}^{28}\text{Si}$) dibakar menjadi ${}^{56}\text{Fe}$ (besi atau ferrum-56).

Besi merupakan unsur paling stabil dimana kita tidak mungkin mengambil energi darinya melalui proses nuklir. Jadi setelah pembentukan ${}^{56}\text{Fe}$ ini tidak akan ada lagi reaksi fusi dalam bintang. Nomor massa (A) 56 menandai puncak kurva

energi ikat inti atom. Atom-atom dengan A di bawah 56 dapat melepaskan energi intinya melalui reaksi fusi, sedang atom-atom dengan A di atas 56 dapat melepaskan energi intinya melalui reaksi fisi [28].



Gambar 3.7. Proses fusi 3 inti ${}^4\text{He}$ membentuk inti ${}^{12}\text{C}$ [12]

BAB 4

TABEL PERIODIK

Para Ilmuwan yang menekuni bidang kimia telah sejak lama 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. 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.

Pada tahap awal perkembangan ilmu materi, para ilmuwan baru mengenal adanya 20 jenis unsur yang dapat digolongkan menjadi logam dan non-logam. Selanjutnya, pada tahun 1869, ilmuwan kimia asal Perancis, Antoine Lavoisier (1743-1794), mengelompokkan 33 unsur kimia yang sudah dikenal pada saat itu ke dalam empat golongan [11]. Dalam bukunya yang berjudul *Traite Elementaire de Chimie*, Lavoisier menggolongkan unsur-unsur tersebut ke dalam kelompok gas, non-logam, logam, dan tanah (logam oksida). Pasca Lavoisier, banyak ilmuwan berupaya untuk menyempurnakan sistem pengelompokan unsur-unsur kimia, di antaranya adalah Johann Wolfgang Dobereiner (1780-1849) dari Perancis, Alexandre-Emile Beguyer de Chancourtois (1820-1886) dari Perancis, John Alexander Reina Newlands (1837-1898) dari Inggris, dan Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) dari Rusia.

4.1. Penemuan Sifat Berkala

Teknik pengelompokan unsur-unsur kimia terus berkembang seiring dengan penemuan unsur-unsur baru dan perkembangan ilmu kimia. Dasar pengelompokan unsur-unsur kimia berkembang pesat setelah John Dalton (1766-1844) mengemukakan teori atom pada 1804. Banyak unsur baru ditemukan dan dipelajari oleh para ilmuwan sejak masa Dalton dan sesudahnya. Teori atom itu selalu dapat digunakan dalam lapangan ilmu kimia, terutama dalam menerangkan kejadian-kejadian reaksi kimia yang baru ditemukan. Penemuan-penemuan berikutnya dalam bidang kimia pada abad ke-19 telah memperkokoh teori atom Dalton.

Pada tahun 1829, Dobereiner mengelompokkan unsur-unsur kimia berdasarkan kemiripan sifat yang ditemukannya [1]. Dalam pengamatan terhadap unsur-unsur yang telah dikenal saat itu, ia menemukan hubungan antara sifat unsur dengan massa atom (A). Dobereiner menemukan bahwa nilai A relatif stronsium (Sr , $A = 88$) berdekatan dengan rata-rata A relatif dua unsur lain yang mirip dengan Sr , yaitu kalsium (Ca , $A = 40$) dan barium (Ba , $A = 137$), yaitu 88,5. Karena itu, Dobereiner mengelompokkan semua unsur dalam bentuk *triade* (pasangan tiga unsur) dimana unsur di tengah memiliki nilai A relatif yang hampir sama dengan rata-rata A relatif dua unsur yang mengapitnya. Pengelompokan yang dilakukan Dobereiner menghasilkan beberapa *triade* yang disusun berdasarkan kenaikan nilai A relatif. Penemuan Dobereiner menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara A relatif dengan sifat-sifat unsur kimia. Atas rintisannya ini, ia dianggap sebagai pelopor penyusunan tabel periodik berdasarkan kenaikan nilai A suatu atom.

Pada 1869, Mendeleev menemukan pola alami tertentu dengan keteraturan yang mendasari perbedaan sifat-sifat berbagai unsur kimia [39]. Ahli kimia itu selanjutnya menerbitkan catatan pendek dengan judul *The Correlation Between Properties of Elements and Their Atomic Weights*.

Catatan itu dibuat setelah ia melakukan pengamatan terhadap 63 unsur kimia yang saat itu sudah dikenali para ilmuwan. Mendeleev menyimpulkan bahwa sifat-sifat unsur adalah fungsi periodik dari A relatifnya. Artinya, jika unsur-unsur disusun menurut kenaikan A relatifnya, maka sifat tertentu akan berulang secara periodik.

Karya yang dihasilkan Mendeleev sangat mendasar baik dalam bidang kimia maupun 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 kenaikan nilai A , dimulai dari unsur dengan A paling ringan. Setiap unsur dalam daftar itu diwakili oleh lambang kimianya sesuai dengan kesepakatan di kalangan ilmuwan, seperti unsur hidrogen ditulis dengan lambang H, helium dengan lambang He, litium dengan lambang Li dan seterusnya.

Mendeleev menempatkan unsur-unsur yang mempunyai kemiripan sifat dalam satu lajur vertikal yang disebut golongan. Lajur-lajur horizontal, yaitu lajur unsur-unsur berdasarkan kenaikan nilai A relatifnya, disebut periode seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 [39]. 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.

G O L O N G A N									
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
H 1,01									
Li 6,94	Be 9,01	B 10,8	C 12,0	N 14,0	O 16,0	F 19,0			
Na 23,0	Mg 24,3	Al 27,0	Si 28,1	P 31,0	S 32,1	Cl 35,5			
K 39,1	Ca 40,1		Ti 47,9	V 50,9	Cr 52,0	Mn 54,9	Fe 55,9	Co 58,9	Ni 58,7
Cu 63,5	Zn 65,4			As 74,9	Se 79,0	Br 79,9			
Rb 85,5	Sr 87,6	Y 88,9	Zr 91,2	Nb 92,9	Mo 95,9		Ru 101	Rh 103	Pd 106
Ag 108	Cd 112	In 115	Sn 119	Sb 122	Te 128	I 127			
Ce 133	Ba 137	La 139		Ta 181	W 184		Os 194	Ir 192	Pt 195
Au 197	Hg 201	Tl 204	Pb 207	Bi 209					
			Th 232		U 238				

Gambar 4.1. Tabel periodik yang pertama kali disusun oleh Dmitri Ivanovich Mendeleev tahun 1869, angka di bawah lambang kimia menyatakan nilai *A* relatif unsur bersangkutan [39]

Karena belum lengkapnya jumlah unsur kimia yang diketahui pada saat itu, Mendeleev sengaja mengkosongkan beberapa tempat dalam kotak tabel periodiknya. Ia 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 [39].

Pasangan unsur-unsur (misal nikel dan kobalt, iodin 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 A dari unsur-unsur tersebut. Secara kebetulan daftar unsur-unsur yang disusun berdasarkan kenaikan nilai A ternyata cocok dengan daftar yang disusun berdasarkan kenaikan nomor atom (Z), kecuali beberapa kasus penyimpangan sebagaimana ditemui oleh Mendeleev [39].

Pada 1913, Ahli kimia Inggris Henry G.J. Moseley (1887-1915) melakukan eksperimen pengukuran panjang gelombang unsur-unsur kimia menggunakan sinar-X. Moseley menyimpulkan bahwa sifat dasar atom bukan didasari oleh A relatif seperti dugaan Mendeleev sebelumnya, melainkan berdasarkan kenaikan jumlah proton dalam inti atomnya [14]. Moseley mengamati adanya unsur-unsur yang memiliki A berbeda, tetapi memiliki jumlah proton sama. Kenaikan jumlah proton ini mencerminkan kenaikan nilai Z unsur tersebut. Berdasarkan percobaan Moseley, para ilmuwan sepatutnya untuk menyempurnakan sistem periodik Mendeleev sehingga lahirlah sistem periodik modern.

4.2. 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 nilai Z dan kemiripan sifat-sifat atom. Kini diketahui bahwa nilai Z merupakan dasar yang tepat untuk menyusun sifat berkala dari unsur-unsur kimia. Lajur-lajur horizontal

yang disebut periode disusun berdasarkan kenaikan nilai Z, sedangkan lajur-lajur vertikal yang disebut golongan disusun berdasarkan kemiripan sifat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 [40].

TABEL PERIODIK UNSUR-UNSUR																						
1 1A	2 2A	METAL										METALOID			NONMETAL		13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A
1 H	2 He											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
3 Li	4 Be											11 Na	12 Mg	8B			13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba	57-71 La-lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn					
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo					
Lantanida		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
Aktinida		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr						

Gambar 4.2. Tabel periodik modern [40]

Tanpa menyertakan dua unsur paling ringan (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, didapatkan pengelompokan unsur-unsur yang disusun horizontal sehingga menghasilkan satu periode sangat pendek yang berisi dua unsur, dua periode pendek (1 dan 2) yang masing-masing berisi delapan unsur serta dua periode panjang (1 dan 2) yang masing-masing berisi 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.

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 flourin (F), klorin (Cl), bromin (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 [11]. 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.

Meski ditemukan kemiripan-kemiripan yang sangat indah antar unsur-unsur yang menempati kolom-kolom sama dalam tabel periodik, namun ada juga keruwetan yang ditemui para ilmuwan dalam menyusun unsur-unsur pada periode panjang ketiga dan keempat [11]. Jika periode panjang

1 dan 2 masing-masing berisi tepat 18 unsur, maka periode panjang ketiga yang dimulai dari unsur ke-55 (cesium, Cs) dan diakhiri pada unsur ke-86 (radon, 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 [41].

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 [41].

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 (Ac), ke-90 (Th), ke-91 (protactinium, Pa) dan ke-92 (uranium, U) yang masih dapat ditemukan di alam, karena meskipun bersifat radioaktif tetapi memiliki umur paruh yang sangat panjang, mencapai miliaran tahun dan lebih panjang dari usia bumi, atau unsur tersebut merupakan hasil anak luruh dari unsur radioaktif berwaktu

paruh sangat panjang [41]. Di alam, unsur U membentuk beberapa jenis inti dengan umur paruhnya bervariasi, yang terpanjang dan dapat dinyatakan dalam satuan waktu geologi adalah ^{238}U (4,5 miliar tahun), diikuti ^{235}U (710 juta tahun). Unsur Th juga memiliki beberapa jenis inti dengan umur paruhnya juga bervariasi, yang terpanjang adalah ^{232}Th (13,9 miliar tahun) [42].

Dua unsur anggota deret aktinida, yaitu Ac dan Pa , membentuk beberapa inti yang umumnya berumur paruh relatif pendek. Untuk Ac , umur paruh terpanjangnya adalah 21,8 tahun (^{227}Ac), sedang untuk Pa umur paruh terpanjangnya adalah 32,8 ribu tahun (^{231}Pa). Meski umur paruh 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 atom induknya ^{238}U (untuk Pa) dan peluruhan thorium dengan atom induknya ^{232}Th (untuk Ac). Karena proses peluruhan kedua atom 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 kesetimbangan dengan induknya masing-masing [12].

Penemuan sifat berkala merupakan penemuan yang paling mendasar baik dalam bidang kimia maupun fisika. Penyusunan unsur-unsur dalam tabel periodik 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 [41].

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 [39]. 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 metaloid. 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 disebabkan oleh jumlah elektron dalam kulit atom terluar. 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 saja yang mengambil bagian pada proses berlangsungnya reaksi kimia antar atom [11].

4.3. Menghadirkan Unsur Hilang

Terdapat 92 jenis atom yang dapat ditemukan di alam. Namun daftar unsur-unsur kimia yang disajikan dalam tabel berkala diakui oleh para ilmuwan memang belum lengkap. Dari jumlah tersebut, ada dua jenis unsur yang sebetulnya sudah tidak pernah lagi dapat ditemukan di alam [41]. Pertama adalah unsur yang seharusnya mengisi kotak nomor 43. Hingga awal tahun 1936, kotak nomor 43 pada tabel periodik unsur-unsur masih kosong, padahal di kiri dan kanan kotak tersebut sudah terisi unsur, masing-masing molybdenum (Mo) untuk kotak nomor 42 dan ruthenium (Ru) untuk kotak nomor 44.

Saat itu, ditengah gencarnya upaya untuk menemukan unsur-unsur baru, para peneliti masih bertanya-tanya, unsur apa yang akan menempati kotak nomor 43 tadi. Pertanyaan yang sama juga ditujukan untuk unsur calon pengisi kotak nomor 61 pada tabel periodik unsur-unsur. Sebuah fakta yang tidak terbayangkan sebelumnya di benak para ilmuwan, bahwa ada unsur dengan Z relatif rendah namun tidak ada di alam. Para peneliti pun mencurahkan perhatiannya pada pencarian kedua unsur tersebut.

Belakangan para ilmuwan akhirnya mengetahui tentang sebab-musabab absennya kedua unsur tersebut, yaitu karena keduanya bersifat radioaktif dengan umur paruhnya jauh lebih pendek dibandingkan dengan usia bumi, sehingga keduanya telah habis meluruh seiring dengan perjalanan waktu [41]. Namun dengan perkembangan teknologi nuklir, kedua unsur tersebut ternyata dapat dihadirkan kembali oleh para ilmuwan di laboratorium melalui proses buatan. Dengan penemuan kembali kedua unsur tersebut, maka tabel berkala menjadi lebih lengkap.

Perkembangan dalam fisika nuklir telah mengantarkan para ilmuwan mampu menghadirkan unsur-unsur baru melalui proses transmudasi inti atom sebagaimana dibahas pada Bab 3. 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 [39].

Unsur pengisi kotak nomor 43 ditemukan pada tahun 1937 oleh ahli kimia Carlo Perrier (1886-1948) dan Emilio Segre, keduanya adalah peneliti di Universitas Palermo di Italia.

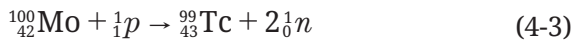
Mereka berhasil menghadirkan unsur buatan secara tidak sengaja melalui penembakan target unsur molybdenum-98 (^{98}Mo) dengan deuteron (d) atau neutron (n) dalam *cyclotron*. Unsur baru yang ditemukan itu ternyata berbeda dengan unsur-unsur lain yang sudah dikenal sebelumnya. Unsur buatan tersebut selanjutnya diberi nama *technetium* (Tc), berasal dari bahasa Yunani yang berarti buatan [43]. Proses transmutasi inti (n, γ) yang mendasari terbentuknya Tc adalah sebagai berikut:



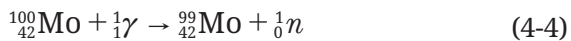
Inti atom ${}_{42}^{99}\text{Mo}$ yang terbentuk bersifat radioaktif dengan umur paruh 66 jam. Inti itu langsung melakukan proses peluruhan beta menghasilkan Tc dengan persamaan transmutasi intinya sebagai berikut:



Selain melalui aktivasi neutron terhadap Mo-98, Tc dapat juga diproduksi melalui penembakan Mo-100 dengan berkas p dalam akselerator [44]. Dari penembakan itu dihasilkan ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ secara langsung melalui proses transmutasi inti sebagai berikut:



Cara lain untuk menghadirkan Tc adalah melalui reaksi fotonuklir di dalam akselerator linier. Target dalam bentuk inti atom ${}_{42}^{100}\text{Mo}$ ditembak dengan sinar-X atau foton gamma energi tinggi sehingga sebuah n terpelempar dari inti ${}_{42}^{100}\text{Mo}$. Reaksi fotonuklir (γ, n) itu dapat menghasilkan inti radioaktif ${}_{42}^{99}\text{Mo}$ dengan persamaan transmutasi inti sebagai berikut:



Inti Mo-99 yang terbentuk langsung melakukan proses peluruhan beta sehingga dihasilkan inti Tc-99 dengan proses

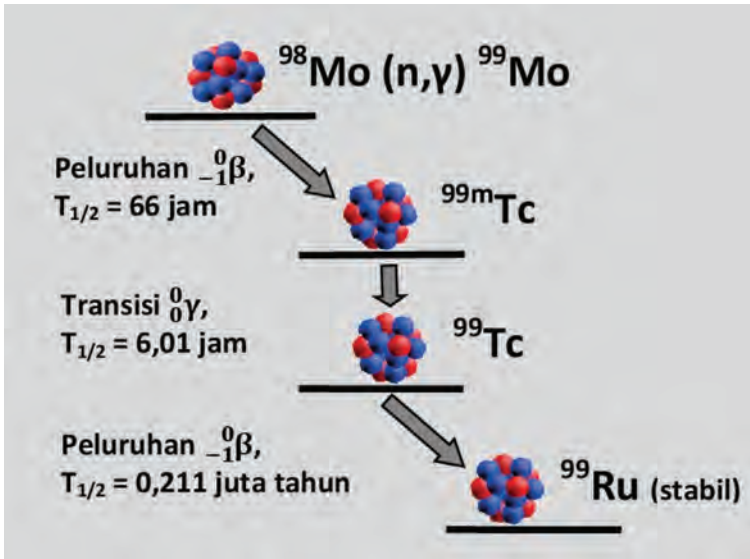
sama seperti peluruhan Mo-99 di atas.

Semua inti Tc-99 yang dihadirkan melalui berbagai cara sebagaimana dikemukakan di atas berada dalam keadaan tereksitasi atau bersifat metastabil sehingga sering ditulis dengan Tc-99m [44]. Inti itu segera melakukan peluruhan atau transisi gamma dengan umur paruh 6,01 jam menjadi inti Tc-99 yang berada dalam keadaan dasar (*ground state*). Inti Tc-99 juga bersifat radioaktif dengan umur paruhnya 0,211 juta tahun. Karena bersifat radioaktif, inti itu langsung melakukan proses peluruhan beta sehingga berubah menjadi inti ruthenium-44 (Ru-44) yang stabil. Proses peluruhannya mengikuti persamaan transmudasi inti sebagai berikut:



Dalam kurun waktu berikutnya, berbagai jenis isotop Tc berhasil dihadirkan melalui proses buatan. Unsur ini diketahui memiliki 21 jenis isotop dengan nomor massa bervariasi dari 90 sampai dengan 110. Semua isotop Tc tersebut bersifat radioaktif dengan umur paruhnya bervariasi dari beberapa detik hingga 4,2 juta tahun. Karena umur paruh terpanjangnya jauh lebih pendek dibandingkan dengan umur bumi (sekitar 4,5 miliar tahun), maka unsur Tc yang dahulu pernah hadir dan terbentuk secara alamiah telah habis meluruh seiring dengan perjalanan waktu [45].

Ilustrasi secara keseluruhan perjalanan dalam menghadirkan atom Tc di alam dari proses produksi hingga peluruhannya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 [46]. Bermula dari inti stabil Mo-98 yang diaktivasi sehingga menghasilkan inti radioaktif Mo-99. Inti itu meluruh menghasilkan inti radioaktif metastabil Tc-99m yang melakukan transisi gamma menghasilkan inti Tc-99 yang bersifat radioaktif sehingga meluruh menjadi inti Ru-99 yang stabil. Dapat difahami jika atom Tc tidak pernah lagi dapat ditemukan di alam.



Gambar 4.3. Perjalanan keberadaan atom technetium-99 di alam [46]

Keberhasilan para ilmuwan dalam menghadirkan kembali unsur Tc ternyata memberi manfaat yang sangat besar, terutama di bidang kedokteran. Dalam perjalanan berikutnya, tepatnya pada tahun 1947, para peneliti berhasil mendapatkan Tc-99 bersifat metastabil ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) yang saat ini merupakan unsur penting dan menjadi ujung tombak di bidang kedokteran, terutama untuk kegiatan radiodiagnostik [45]. Puluhan juta pasien di berbagai penjuru dunia berhasil ditolong kesehatannya melalui radiodiagnostik dalam bidang kedokteran nuklir menggunakan $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Sekitar 80 persen diagnostik dengan kedokteran nuklir dilakukan dengan unsur radioaktif ini. Unsur $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dipilih atas dasar sifatnya yang sangat menguntungkan, yaitu kemudahan produksi untuk mendapatkannya dalam bentuk bebas pengemban. Unsur $^{99\text{m}}\text{Tc}$ memiliki sifat ideal untuk kedokteran nuklir dari segi proteksi dan pencitraan, serta dapat diperoleh secara mudah di tempat pemakai dengan menggunakan sistem generator yang

dirancang khusus untuk maksud tersebut.

Keberhasilan para ilmuwan dalam menghadirkan kembali unsur kimia pengisi kotak tabel periodik nomor 43 segera disusul dengan keberhasilan dalam menghadirkan kembali unsur pengisi kotak tabel periodik nomor 61. Keberadaan unsur ini semula diprediksi oleh ahli kimia Czech, Bohuslav Brauner (1855-1935), pada tahun 1902. Beberapa kelompok mengklaim pernah berhasil memproduksinya, namun mereka tidak dapat mengkonfirmasi hasil temuannya karena mengalami kesulitan dalam memisahkan unsur ini dengan unsur-unsur lainnya.

Bukti-bukti cukup meyakinkan tentang keberadaan unsur kimia nomor 61 diperoleh para peneliti pada tahun 1944 saat mereka bekerja untuk Proyek Manhattan di *Oak Ridge Laboratory* di Tennessee, Amerika Serikat. Mereka adalah ahli kimia Jacob A. Marinsky (1918-2005), Lawrence E. Glendenin (1918-2008), Charles D. Coryell (1912-1971) dan Harold G. Richter (1925-2001). Saat itu, mereka sedang mempelajari pembuatan bahan bakar nuklir untuk bom atom [47]. Namun karena terlalu sibuk dengan riset pembuatan bom atom selama Perang Dunia II, mereka tidak kunjung mengklaim dan mempublikasikan hasil penemuannya itu hingga tahun 1946.

Penemuan unsur kimia nomor 61 berlangsung saat mereka menganalisis produk-produk samping proses fisi *U-235* dari reaktor nuklir di *Clinton Laboratory* di Oak Ridge. Atas usul dari Grace Mary Coryell (1914-1965), istri dari Charles D. Coryell, unsur baru itu diberi nama *promethium* (*Pm*). Nama *promethium* akhirnya diadopsi oleh *International Union of Chemistry* pada 1949 dan menjadi nama resmi untuk unsur kimia nomor 61. Para peneliti berhasil mengisolasi serta mengidentifikasi Pm-147 dan Pm-148, keduanya merupakan unsur radioaktif dengan umur paruh masing-masing 2,62 tahun dan 53 jam. Keduanya muncul sebagai hasil samping proses fisi *U-235*. Unsur Pm-147 dapat secara efektif dipisahkan dari unsur-

unsur tanah jarang hasil samping proses fisi lainnya dengan metode pertukaran ion. Hasil temuannya berhasil dikonfirmasi setelah diuji menggunakan alat spektrometer massa dan baru dipublikasikan pada tahun 1947. Kini fasilitas riset nuklir itu dikenal dengan nama *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL).

Karena bersifat radioaktif, inti Pm-147 melakukan peluruhan beta menghasilkan inti Samarium-147 (Sm-147) yang juga bersifat radioaktif. Inti hasil peluruhan Pm ini selanjutnya melakukan peluruhan alfa menghasilkan inti neodimium-143 (Nd-143). Proses nuklir untuk menerangkan hilangnya unsur Pm-147 dari alam karena peluruhan adalah sebagai berikut:

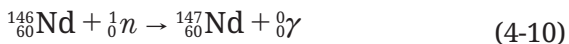


Unsur Pm diketahui membentuk 38 jenis isotop dengan nomor massanya bervariasi dari 126 hingga 163, semuanya bersifat radioaktif dengan umur paruhnya bervariasi dari orde detik hingga yang terpanjang berorde tahun [48]. Umur paruh yang paling pendek adalah satu detik untuk Pm-128, dan yang paling panjang adalah 17,7 tahun untuk Pm-145. Karena umur paruhnya demikian pendek dibandingkan dengan usia alam semesta, maka seiring dengan perjalanan waktu, unsur Pm itupun akhirnya habis meluruh sehingga tidak ditemukan lagi di alam. Inti Pm-145 dalam perjalanannya melakukan peluruhan positron sehingga berubah menjadi inti Nd-145, dan peluruhan alfa sehingga menjadi inti protactinium-141 (Pr-141) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Persamaan proses peluruhannya adalah sebagai berikut:

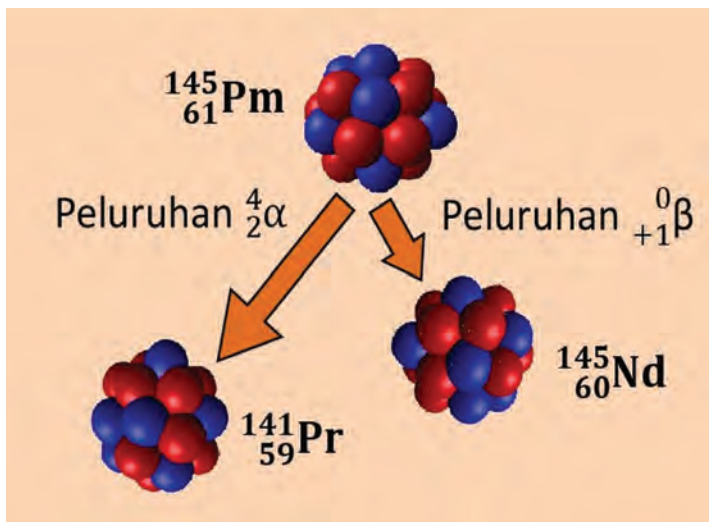


Selain terbentuk melalui proses fisi inti U-235, unsur Pm dapat pula dihasilkan dari penembakan target neodimium-146

(Nd-146) dengan neutron lambat. Dari penembakan itu diperoleh Nd-147 yang melakukan peluruhan beta membentuk Pm-147. Proses nuklir yang mendasari pembentukan Pm-147 adalah sebagai berikut:



Selain masalah kedua unsur yang sudah tidak dapat ditemukan lagi di alam (Tc dan Pm), ketika membahas kelompok unsur halogen yang menempati kolom 17 tabel periodik, biasanya hanya disebut empat unsur pertama dari anggota kelompok itu, yaitu F, Cl, Br, dan I, tanpa menyebut unsur kelima (At) [46]. Hal itu karena atom At yang ada di alam semuanya bersifat radioaktif dengan umur paruh sangat pendek.



Gambar 4.4. Peluruhan inti promethium-145 [48]

Ada empat jenis inti At yang terbentuk secara alamiah dengan komposisi nukleonnya berbeda-beda [42]. Pertama

adalah ^{218}At dengan umur paruhnya 1,5 detik. Atom ini selalu terbentuk sebagai hasil anak luruh dari deret peluruhan uranium dengan atom induknya ^{238}U . Kedua adalah ^{216}At dengan umur paruh 300 mikrodetik. Atom ini selalu terbentuk sebagai hasil anak luruh dari deret peluruhan thorium dengan atom induknya ^{232}Th . Ketiga dan keempat adalah ^{215}At dan ^{219}At dengan umur paruh masing-masing 100 mikrodetik dan 0,9 menit. Kedua atom ini selalu terbentuk sebagai hasil anak luruh dari deret peluruhan aktinida dengan atom induknya ^{235}U . Meskipun umur paruh keempat isotop At sangat pendek, namun karena proses peluruhan radionuklida induknya sudah berlangsung sekian lama sejak bumi terbentuk, maka keempat jenis inti At selalu terbentuk dan ada di alam dalam kesetimbangan dengan atom induknya masing-masing.

4.4. Unsur Transuranium

Unsur yang muncul sesudah uranium ($Z = 92$) dikenal sebagai unsur hasil buatan manusia yang bersifat tidak stabil sehingga meluruh dan berubah menjadi unsur lain. Unsur-unsur kimia yang muncul atau memiliki Z lebih besar dari 92 biasanya dikenal dengan sebutan unsur transuranium, yang berarti “setelah uranium”. Disebut demikian karena unsur-unsur baru itu menempati posisi dalam tabel periodik setelah uranium [49]. Unsur-unsur tersebut dapat dihadirkan oleh para ilmuwan di laboratorium melalui proses transmudasi inti.

Para ilmuwan berspekulasi bahwa masih terdapat kemungkinan beberapa unsur super berat yang berada jauh di belakang uranium. Unsur transuranium itu diduga stabil atau mempunyai waktu paruh sangat panjang dan terjadi secara alamiah. Unsur dengan nomor atom 114 dengan jumlah neutron dalam intinya 184 merupakan salah satu unsur sangat berat yang diramalkan mempunyai sifat fisika seperti itu [50]. Unsur ini diramalkan muncul dalam tabel periodik di bawah dan dalam kolom yang sama dengan timbal (Pb), artinya

mempunyai sifat-sifat yang sama dengan timbal.

Dugaan adanya unsur-unsur super berat yang diperkirakan memiliki waktu hidup cukup panjang telah mendorong munculnya kegiatan penelitian di Amerika Serikat, Eropa Barat dan Rusia untuk membuat unsur super berat dalam akselerator atau mendapatkan unsur itu di alam [41]. Pencarian unsur super berat di alam didasarkan pada teori yang menduga bahwa unsur tersebut telah ada sebelum bumi itu sendiri terbentuk dan hingga kini diperkirakan masih ada asal waktu hidup unsur itu cukup panjang.

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 [42].

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. Pada 1934, ketika Enrico Fermi dan kelompoknya di Roma, Italia, menembaki target U dengan neutron lambat, mereka mengamati adanya unsur-unsur radioaktif baru terbentuk di dalam target U. Mereka menduga adanya peluang bahwa penembakan U dengan neutron dapat dipakai untuk memproduksi unsur-unsur dengan muatan inti lebih besar dari 92 [51].

Antara 1934 hingga 1939, beberapa usaha telah dilakukan untuk membuat dan mengidentifikasi unsur-unsur superberat tersebut. Untuk melakukan analisis kimia terhadap unsur-

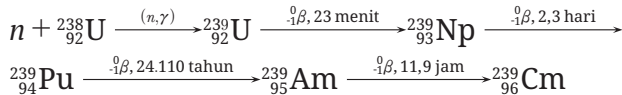
unsur baru yang dihasilkan, tim Fermi juga melibatkan ahli kimia Oscar D'Agostino (1901-1975) [12]. Meski para peneliti telah memperoleh bukti-bukti baru yang cukup meyakinkan tentang adanya unsur-unsur baru, namun masih ada beberapa kesulitan yang ditemui para ilmuwan dalam mengidentifikasi unsur baru tersebut.

Mulai 1940, berbagai spesies unsur radioaktif baru dengan muatan inti lebih besar dari 92 mulai berhasil ditemukan. Unsur-unsur itu melakukan transformasi inti dengan memancarkan sinar beta (${}^0_{-1}\beta$) sehingga menghasilkan unsur baru lainnya dengan muatan inti lebih besar dari U [12]. Melalui analisis kimia diketahui bahwa unsur-unsur baru itu memiliki sifat-sifat kimia yang berbeda dengan unsur-unsur lain yang muncul di sekitar U pada tabel periodik.

Apabila ${}^{238}\text{U}$ ditembaki dengan neutron, maka akan terjadi reaksi (n, γ) sehingga dihasilkan inti ${}^{239}\text{U}$ yang bersifat radioaktif dengan umur paruh 23 menit. Inti atom ini meluruh sambil memancarkan sinar beta menjadi salah satu jenis unsur transuranium dengan muatan intinya (Z) 93. Edwin M. McMillan (1907-1991) dan Philip Aberson (1913-2004) membuktikan bahwa salah satu unsur transuranium itu memiliki umur paruh 2,3 hari [42]. Unsur baru kelompok transuranium itu selanjutnya diberi nama *neptunium* (Np), yang diambil dari Neptunus, salah satu nama planet dalam sistem tatasurya.

Karena bersifat radioaktif, inti atom Np melakukan proses peluruhan sambil memancarkan sinar beta menjadi unsur baru dengan $Z = 94$. Unsur ke 94 itu selanjutnya diberi nama *plutonium* (Pu), diambil dari salah satu nama benda ruang angkasa Pluto. Unsur Pu pertama kali ditemukan oleh Glenn T. Seaborg (1912-1999), Edwin M. McMillan, Joseph W. Kennedy (1916-1957) dan Arthur C. Wahl (1917-2006) [52]. Karena bersifat radioaktif, Pu meluruh sambil memancarkan sinar beta menghasilkan unsur baru dengan $Z = 95$. Unsur ini selanjutnya diberi nama *americium* (Am). Karena bersifat radioaktif, peluruhan beta unsur Am akan

menghasilkan unsur transuranium baru dengan $Z = 96$ yang diberi nama curium (Cm) [12]. Proses kehadiran unsur-unsur transuranium baru dengan Z dari 93 hingga 96 tersebut dapat ditulis dalam bentuk persamaan transmutasi inti sebagai berikut:



Unsur transuranium dengan muatan inti 97 dapat dihadirkan melalui penembakan target ${}^{241}\text{Am}$ dengan partikel alfa. Unsur ke-97 itu diberi nama berkelium (Bk). Unsur-unsur transuranium lainnya telah diproduksi melalui penembakan U dengan inti-inti atom yang dipercepat di dalam akselerator hingga berenergi 100 MeV [12]. Unsur transuranium ke-98 diberi nama *californium* (Cf), ke-99 diberi nama *einsteinium* (Es), ke-100 diberi nama *fermium* (Fm), ke-101 diberi nama *mendelevium* (Md), ke-102 diberi nama *nobelium* (No), dan ke-103 diberi nama *lawrencium* (Lr).

Jumlah unsur dalam tabel periodik yang baru mencapai 103 jenis unsur terdiri atas unsur-unsur alamiah dan buatan, terutama dari produk fisi dan transmutasi inti lainnya. Fermi telah melakukan kerja keras dengan hasil karyanya di bidang radioaktivitas buatan. Penembakan neutron terhadap atom-atom berat dapat menghadirkan berbagai jenis unsur transuranium. Hasil karya ini akhirnya mengantarkan Fermi sebagai pemenang hadiah Nobel Fisika pada 1938 [18].

Setelah deret aktinida pada tabel periodik, para ilmuwan sebenarnya masih mengusulkan adanya satu deret lagi dengan nama deret transaktinida yang dimulai dari unsur ke-104. Muncul konflik antara para peneliti di *Lawrence Berkeley Laboratory* di California dan peneliti di *Dubna Joint Institute for Nuclear Research* di Rusia berkaitan dengan klaim dalam penemuan unsur-unsur baru ke-104 dan 105. Para peneliti di Berkeley mengusulkan nama *rutherfordium* (Rf) untuk

unsur nomor 104 dan *hahnium* (Ha) untuk unsur nomor 105, sementara ilmuwan Rusia mengusulkan nama *kurchatovium* dan *nielsbohrium* [41].

Kontroversi dalam penamaan unsur ke-104 dan 105 menunjukkan perlunya aturan dasar atau kriteria dalam masalah klaim penemuan unsur kimia baru. Terkait dengan masalah klaim tersebut, Darlene C. Hoffman (1926) dari *Los Alamos Scientific Laboratory* mengusulkan kriteria penemuan unsur baru itu didasarkan pada pembuktian dimana nilai Z unsur baru yang diklaim itu betul-betul beda dengan Z dari unsur-unsur yang sudah dikenal sebelumnya [53]. Cara-cara pembuktian nilai Z unsur baru yang dapat diterima oleh kalangan ilmuwan adalah melalui identifikasi kimia, identifikasi pancaran sinar-X karakteristik unsur tersebut, atau proses peluruhannya, serta adanya keterkaitan dengan model peluruhan alfa dari unsur-unsur yang telah dikenal sebelumnya.

Klaim penemuan unsur ke-104 dan 105 oleh para ilmuwan Rusia didasarkan terutama pada penggunaan teknik non-diskriminasi relatif yang biasanya digunakan untuk pencacahan unsur-unsur hasil fisi, tidak menggunakan metode pengujian sebagaimana diusulkan oleh Hoffman. Upaya eksperimen yang sangat hati-hati oleh peneliti di Amerika Serikat untuk meniru dan menguji hasil yang diklaim oleh ilmuwan Rusia ternyata tidak mengkonformasi hasil yang sama [41]. Karena alasan itu, pada tabel periodik dimunculkan nama sesuai dengan yang diusulkan oleh Tim Berkeley, yaitu *Rf* untuk unsur ke-104, sedang untuk unsur ke-105 diberi nama *dubnium* (Db).

Dengan teknik transmudasi inti, penemuan unsur ke-106 juga telah diklaim oleh beberapa kelompok peneliti. Unsur ini akhirnya diberi nama *seaborgium* (Sg). Bukti-bukti awal adanya unsur ke-107, 108, dan 109 telah didapatkan oleh sekelompok peneliti di *Gesellschaft fur Schwerionenforschung* (GSI) di Darmstadt, Jerman [41]. Ketika pertama kali diamati, belum ada nama yang diusulkan untuk unsur-unsur tersebut. Kini, dalam

Tabel Periodik, unsur ke-107 diberi nama *bohrium* (Bh) dan ke-108 diberi nama *hassium* (Hs). Unsur dengan nomor atom 109 berhasil dihadirkan di laboratorium dan diamati para ilmuwan pada 1982. Karena bersifat radioaktif dengan umur paruhnya sangat pendek, unsur itu hanya berhasil bertahan selama 0,005 detik. Kini unsur itu diberi nama *meitnerium* (Mt).

Tiga unsur baru kini telah ditambahkan di Tabel Periodik Unsur. Majelis Umum *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP) telah menyetujui nama-nama untuk ketiga unsur itu. Ketiga unsur memiliki nomor 110, 111 dan 112, masing-masing bernama *darmstadtium* (Ds), *roentgenium* (Rg) dan *copernicium* (Cn) [54]. Majelis umum yang beranggotakan 60 orang menyetujui penamaan dalam rapat di *Institute of Physics* (IOP), London, pada hari Sabtu tanggal 5 November 2011. Kepala IOP dan juga Sekretaris Jenderal IUPAP saat itu menyatakan bahwa penamaan unsur ini telah mendapat persetujuan dalam konsultasi dengan fisikawan dari seluruh dunia [55].

Jurnal ilmiah *Livescience* dalam publikasinya menyatakan bahwa ketiga unsur baru itu disebut elemen superberat. Unsur-unsur itu kemunculannya hanya dapat diusahakan di laboratorium, dan tidak ditemukan di alam. Untuk sementara, para ilmuwan masih mengalami kesulitan dalam mempelajari karakteristiknya karena bersifat radioaktif dengan umur paruh sangat pendek. Unsur-unsur itu cepat sekali meluruh dan berubah menjadi unsur lain. Jadi untuk saat ini, memang belum banyak yang diketahui tentang ketiga unsur baru itu.

Meski baru ditambahkan ke Tabel Periodik Unsur, ketiga unsur itu sebenarnya telah lama ditemukan. Hanya saja, penamaan tak langsung dilakukan sebab harus sesuai persetujuan organisasi ilmuwan. Secara umum, unsur dinamai sesuai penemunya, tempat ditemukan atau nama kehormatan. Keberadaan *copernicium* misalnya, telah diamati sejak 9 Februari 1996 dengan nama ununbium. Nama tidak berubah sampai tahun 2009 saat eksistensi unsur

itu berhasil dibuktikan. Nama copernicium lalu diambil untuk menghormati Copernicus, ilmuwan pertama yang menyatakan bahwa Bumi mengelilingi Matahari. Sementara *roentgenium* telah ditemukan sejak 8 Desember 1994 dengan nama asli *unununium*. Nama *roentgenium* lalu dipakai sebagai penghormatan atas jasa Wilhelm Conrad Roentgen, ilmuwan yang mendeteksi sinar-X dan memenangkan nobel fisika tahun 1901 [55].

Darmstadtium dibuat oleh Peter Armbruster (1931) dan Gottfried Munzenberg (1940) dengan nama awal *ununnilium*. Nama *darmstadtium* diambil sebab pembuatan unsur itu pertama kali dilakukan di fasilitas *GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research* di Jerman yang terletak di dekat kota Darmstadt. Setelah penamaan *darmstadtium*, *roentgenium* dan *copernicium*, ilmuwan kini tengah bekerja untuk menamai unsur 114 dan 116 yang telah ditambahkan di Tabel Periodik unsur sejak bulan Juli 2011 [55].

Kemajuan dalam riset fisika nuklir energi tinggi yang didukung dengan penggunaan mesin pemercepat partikel ukuran super besar telah mengantarkan para ilmuwan mampu menghadirkan unsur-unsur kimia baru dengan nomor atom tinggi pasca uranium. Pintu keberhasilan dalam menghadirkan material-material baru terbuka lebih lebar dan manusiapun berharap suatu ketika akan dapat mengambil manfaat dari hadirnya material-material superberat yang dibuat di laboratorium untuk dimanfaatkan dalam berbagai bidang kehidupan. Terbuka juga kemungkinan untuk memodifikasi atom-atom yang ada di alam ini sehingga diperoleh material baru dengan karakteristik tertentu sesuai dengan yang diinginkan manusia untuk berbagai keperluan dalam kehidupan.

BAB 5

PETA NUKLIDA

Inti atom sebenarnya hanyalah bagian yang sangat kecil dari sebuah atom, sedang atom itu sendiri merupakan bagian yang terkecil dari sebuah materi. Meski demikian, dalam membahas mengenai inti atom, ternyata kita harus berhadapan dengan bidang kajian yang sangat luas. Kajian yang mengkhususkan diri dalam menelaah inti atom itu berada dalam wilayah fisika nuklir. Pada mulanya, perkembangan kajian fisika nuklir menghadapi masalah yang sangat pelik. Namun kini telah banyak sifat-sifat fisika dari inti atom yang berhasil diungkap melalui berbagai penelitian, sehingga pemahaman manusia tentang inti atom sudah demikian tingginya berkat studi intensif yang dilakukan oleh para fisikawan.

Banyak bukti-bukti yang diperoleh dari eksperimen fisika nuklir karena digunakannya peralatan-peralatan khusus [12]. Salah satu peralatan generasi pertama yang digunakan dalam penelitian atom adalah spektrograf massa yang dikembangkan oleh Francis W. Aston (1877-1945). Alat ini dapat dipakai untuk mengukur massa relatif suatu atom. Spektrograf massa mengarahkan ion positif pada pelat fotografi. Perjalanan ion-ion itu akan dibelokkan oleh medan listrik dan medan magnet dalam spektrograf. Ion-ion dengan massa sama akan menuju suatu titik fokus tertentu sehingga membentuk garis tipis. Sementara ion-ion yang lebih berat mengalami pembelokan dengan sudut lebih kecil dibandingkan dengan ion-ion yang lebih ringan. Dengan teknik ini pada pelat fotografi akan

dihasilkan garis-garis tipis yang disebut spektrum massa. Dari penelitian ini para ilmuwan akhirnya mengetahui bahwa atom-atom yang sama ternyata dapat memiliki massa inti yang berbeda-beda. Banyak atom sejenis yang telah dikenal pada saat itu ternyata menunjukkan fenomena seperti itu.

5.1. Mengenal Isotop

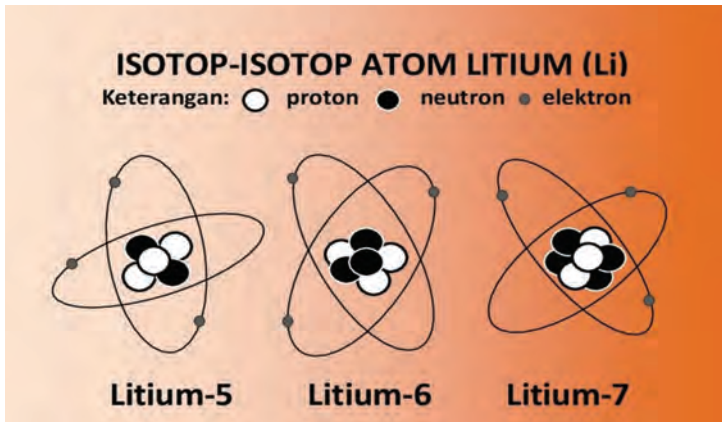
Dengan menggunakan spektrograf massa para peneliti menemukan beberapa unsur kimia yang mempunyai dua atau lebih komponen, masing-masing mempunyai massa yang berbeda. Hal ini disebabkan jumlah neutron di dalam inti atomnya tidak sama [12]. Atom oksigen (O) misalnya, dapat membentuk tiga jenis inti, yaitu inti dengan delapan, sembilan dan sepuluh buah neutron di dalamnya. Nomor massa dari ketiga jenis inti oksigen tersebut masing-masing 16, 17 dan 18. Terkait dengan penemuan tiga jenis inti dari atom O ini, para ilmuwan biasanya menyatakan bahwa atom O dapat membentuk tiga macam isotop.

Isotop adalah unsur-unsur dengan Z sama tetapi A berbeda. Karena Z nya sama, berarti inti atom tersebut mempunyai jumlah proton yang sama. Perbedaan nilai A tidak lain karena perbedaan jumlah neutron (N) dalam inti atomnya. Jadi isotop terbentuk karena perbedaan kandungan jumlah neutron dalam inti suatu atom. Sebagian besar unsur-unsur kimia yang ada di alam ini dapat membentuk beberapa isotop. Namun antar isotop-isotop ini tidak dapat dibedakan secara kimia karena mereka mempunyai struktur elektron yang sama [22], sehingga mengalami reaksi kimia yang sama pula.

Cara penulisan suatu nuklida sebagaimana dibahas pada bagian 2.4 dinilai cukup informatif karena banyak atom-atom yang telah diketahui ternyata dapat membentuk isotop, baik secara alamiah maupun setelah melalui proses transmudasi inti di laboratorium. Dengan penyertaan data nuklir Z dan A maka antara isotop yang satu dengan isotop yang lain dapat

dibedakan. Sebagai contoh, ketiga jenis isotop *O* sebagaimana dikemukakan di atas hanya dapat dibedakan apabila penulisannya menyertakan data *Z* dan *A* yang dimiliki unsur tersebut, yaitu: $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$. Contoh lain adalah atom *U* yang dapat membentuk tiga macam isotop alam. Dalam setiap inti isotop *U* terdapat 141, 143 dan 146 buah neutron, sedang jumlah proton dalam ketiga inti isotop itu sama, yaitu 92. Ketiga isotop *U* tersebut dapat dibedakan dari cara penulisan nuklidanya, yaitu: $^{233}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ dan $^{238}_{92}\text{U}$. Pada gambar 5.1 disajikan struktur inti atom 3 jenis isotop litium (*Li*), yaitu *Li*-5, *Li*-6, dan *Li*-7.

Untuk penggunaan yang lebih praktis, seringkali dalam penulisan lambang atom suatu nuklida cukup disertakan nomor massanya saja, tanpa disertai penulisan nomor atomnya. Untuk nuklida *U* misalnya, biasanya cukup ditulis dengan lambang ^{233}U , ^{235}U , dan ^{238}U atau *U*-233, *U*-235 dan *U*-238. Penulisan ini sudah memberi pengertian bahwa setiap nuklida *U* bernomor atom 92. Demikian pula untuk nuklida *O*, cukup ditulis ^{16}O , ^{17}O , dan ^{18}O , atau *O*-16, *O*-17 dan *O*-18, dengan pengertian setiap nuklida *O* bernomor atom 8.



Gambar 5.1. Struktur atom isotop-isotop ^5Li dengan 3 proton dan 2 neutron, ^6Li dengan 3 proton dan 3 neutron, dan ^7Li dengan 3 proton dan 4 neutron [22]

Suatu isotop merupakan satu kelompok dari dua atau lebih nuklida yang mempunyai nomor atom sama. Ambil contoh unsur yang mempunyai isotop sangat banyak, seperti timah (Sn). Unsur kimia bernomor atom 50 ini membentuk 10 macam isotop secara alamiah, dengan nilai A bervariasi dari 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, dan 124 [41]. 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.

Dengan spektrograf massa, Fancis W. 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 klorin (Cl) tidak ada yang sesuai dengan berat atom Cl, 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 yang ditemukan di alam umumnya merupakan campuran antara dua jenis isotop yang terbentuk secara alamiah, yaitu ^{35}Cl dan ^{37}Cl dengan kelimpahan masing-masing 75,4% dan 24,6% [12]. Komposisi kedua isotop itu membentuk massa atom Cl berupa pecahan sebesar 35,46 sma.

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) [41]. Untuk unsur yang lain, distribusi isotopnya mungkin berbeda.

Kelimpahan isotop karbon 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 karbon yang ada di alam, 98,89% berada dalam bentuk ^{12}C [22]. Variasi yang cukup lebar dalam kelimpahan isotop timbal (Pb) juga ditemukan, dan besarnya variasi ini biasanya dihubungkan dengan sumber dari mana sampel tersebut diperoleh. Bagi Pb pada umumnya, sulit mendapatkan kelimpahan isotop secara pasti tanpa menentukan asal sumber bahan tersebut.

Sebagian besar unsur yang ada di alam ini terdapat dalam dua atau lebih isotop dan hanya 20 unsur alamiah (kira-kira seperempat dari seluruh unsur) yang memiliki satu bentuk inti saja, seperti aluminium (Al), kobalt (Co) dan emas (Au). Pada unsur tersebut tidak dikatakan membentuk satu isotop stabil. Dari 20 unsur tersebut, hanya Be yang memiliki Z genap, sementara 19 unsur lainnya memiliki Z ganjil [41]. 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:

1. Unsur-unsur dengan Z ganjil biasanya hanya mempunyai satu inti stabil, sedang unsur dengan Z genap biasanya mempunyai lebih dari satu isotop stabil. Sebagai contoh adalah $^{12}_6\text{C}$ (karbon) yang terdapat dalam jumlah banyak dan mudah ditemukan di alam ini. Karbon memiliki Z genap, yaitu 6.
2. Unsur dengan Z dan A genap (berarti N nya juga genap) banyak terdapat di alam dan umumnya berada di kulit

atau kerak bumi. Keberadaan ${}_{14}^{28}\text{Si}$ dan ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ dapat dipakai sebagai contoh unsur-unsur jenis ini.

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

Selain istilah isotop, sering juga dijumpai istilah isoton dan isobar. Isoton adalah unsur-unsur dengan N sama tetapi Z berbeda, dengan demikian A nya 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 ${}^{28}_{14}\text{Si}$, dengan nilai N pada masing-masing unsur tersebut adalah 14 buah. Contoh lainnya adalah ${}^{13}_6\text{C}$ dan ${}^{14}_7\text{N}$ yang keduanya mempunyai N di dalam inti masing-masing sebanyak tujuh buah. Sedang yang disebut isobar adalah unsur-unsur dengan A sama tetapi Z berbeda, demikian juga N 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 A yang sama, yaitu 31. Contoh lainnya adalah ${}^{14}_6\text{C}$ dan ${}^{14}_7\text{N}$, masing-masing unsur mempunyai A sama, yaitu 14.

Dilihat dari kestabilan inti atomnya, kita dapat menemukan dua jenis inti atom yang membentuk isotop. Pertama adalah isotop yang inti atomnya tidak mampu memancarkan radiasi. Inti atom isotop jenis ini bersifat stabil atau tidak radioaktif. Kedua adalah isotop yang inti atomnya mampu memancarkan radiasi. Inti atom isotop jenis ini tidak stabil sehingga bersifat radioaktif. Isotop dengan inti yang mampu memancarkan radiasi ini biasanya disebut radioisotop. Radioisotop ini dapat terjadi secara alamiah atau sengaja dibuat

oleh manusia dalam suatu reaktor nuklir, akselerator maupun irradiator.

Dalam penggunaan sehari-hari, sering dikatakan bahwa unsur yang terjadi secara alamiah disebut sebagai nuklida alam, sedang unsur yang dibuat misal dengan akselerator maupun reaktor nuklir disebut nuklida buatan. Unsur alamiah dengan A paling berat dan masih termasuk sebagai nuklida stabil adalah ^{208}Bi (Bismut), sedang unsur-unsur dengan A lebih besar dari 208 umumnya merupakan nuklida radioaktif [46]. Untuk membedakan dengan nuklida yang stabil, sering digunakan istilah radionuklida untuk menyatakan isotop atau nuklida yang bersifat radioaktif.

5.2. Teknik Penyajian Nuklida

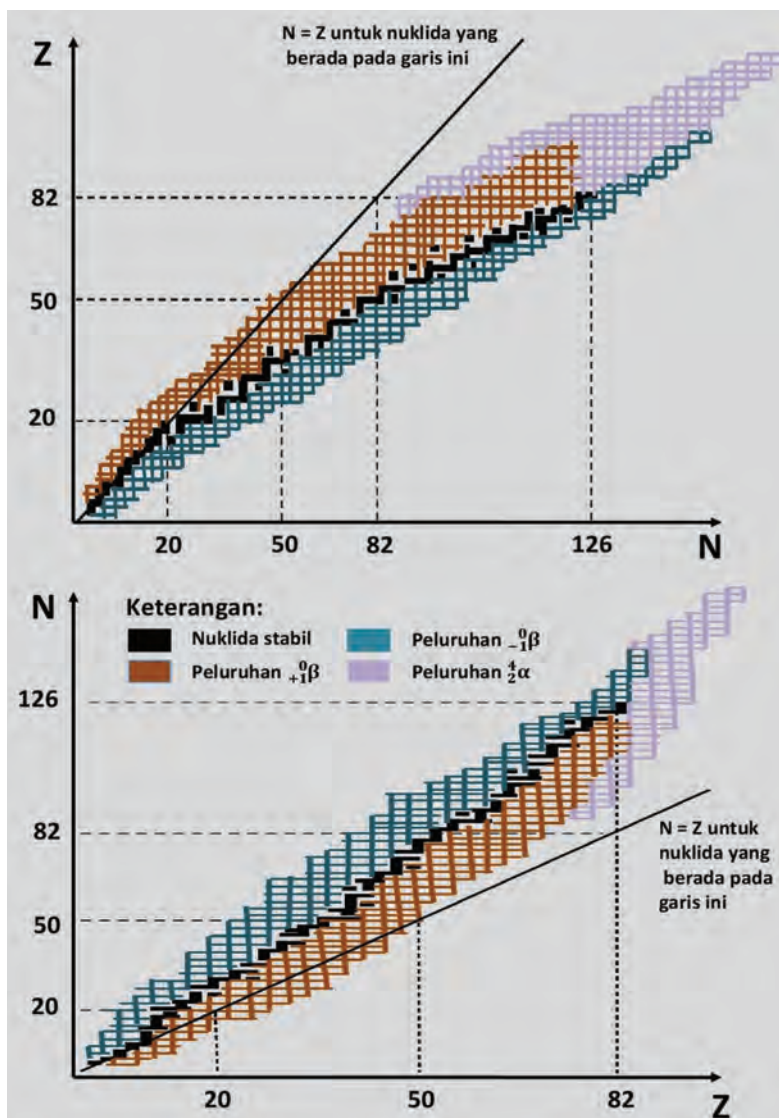
Penyajian unsur-unsur pada tabel periodik sebagaimana dibahas pada Bab 4 dapat memudahkan kita dalam mengenali sifat unsur-unsur tersebut. Meski dalam tabel periodik modern baru dikenal adanya 112 jenis unsur yang terdiri atas unsur-unsur alamiah dan buatan, namun karena banyak di antara unsur-unsur itu yang dapat membentuk isotop, maka kini umat manusia telah berhasil mengenali sekitar 1440 macam isotop, 340 di antaranya terdapat di alam dan sekitar 1100 diproduksi di laboratorium, reaktor nuklir dan ledakan senjata nuklir [46]. Sebagian besar dari unsur-unsur tersebut bersifat radioaktif, namun beberapa di antaranya (284 jenis unsur) bersifat stabil.

Keberadaan unsur beserta isotop-isotopnya yang jumlahnya mencapai sekitar 1440 macam itu ternyata tidak dapat ditampilkan seluruhnya secara bersamaan pada tabel periodik. Karena itu diperlukan cara lain untuk menyajikan berbagai jenis unsur beserta isotop-isotopnya dalam satu bentuk sajian yang terpadu, sehingga karakteristik dari unsur-unsur itu dapat dikenali secara lengkap [42]. Untuk keperluan tersebut, para ilmuwan telah menghadirkan cara penyajian data unsur beserta isotop-isotopnya dalam bentuk peta nuklida.

Peta nuklida menggambarkan distribusi nuklida dalam bentuk grafik Cartesien berdasarkan data jumlah proton (Z) dan jumlah neutron (N) dalam inti suatu unsur bersangkutan. Pada peta nuklida, setiap unsur yang sudah dikenal disajikan menempati kotak sendiri-sendiri sesuai dengan data N dan Z masing-masing. Ada dua versi cara penyajian data suatu unsur beserta isotop-isotopnya pada peta nuklida. Pertama adalah peta nuklida yang menyajikan data unsur dengan Z sebagai absis (sumbu- X) dan N sebagai ordinat (sumbu- Y) yang selanjutnya dikenal sebagai peta Z - N . Kedua adalah peta nuklida yang penyajian data unsurnya kebalikan dari cara pertama, yaitu N sebagai absis dan Z sebagai ordinat yang selanjutnya dikenal sebagai peta N - Z .

Gambar 5.2 menyajikan perbedaan tampilan distribusi unsur dan isotop-isotopnya pada suatu peta nuklida karena perbedaan versi penyajiannya (peta N - Z dan peta Z - N). Dari teknik penyajian unsur pada peta nuklida, kita dapat mengamati dan membedakan distribusi isotop-isotop beserta karakteristik masing-masing isotop berdasarkan perbedaan warna seperti tampak pada Gambar. Garis lurus diagonal miring ke kanan merupakan garis di mana nuklida-nuklida yang berada pada garis itu memiliki N dan Z yang sama ($N = Z$ atau $N/Z = 1$). Unsur-unsur ringan yang berada pada garis ini merupakan nuklida stabil.

Seringkali peta nuklida juga menyajikan garis-garis diagonal miring ke kiri yang disebut garis-garis isobar. Nuklida-nuklida yang berada pada garis itu membentuk satu kelompok isobar, yaitu nuklida-nuklida dengan massa (A) sama. Dalam hal ini A menunjukkan jumlah proton dan neutron dalam inti ($A = N+Z$). Jika garis diagonal itu tidak disajikan, kita bisa membuat sendiri atau cukup membayangkan keberadaan garis isobar itu untuk mengamati deretan nuklida-nuklida yang membentuk isobar. Untuk selanjutnya, pembahasan dalam Bab 5 ini selalu mengacu pada penyajian data unsur dengan peta nuklida jenis N - Z .



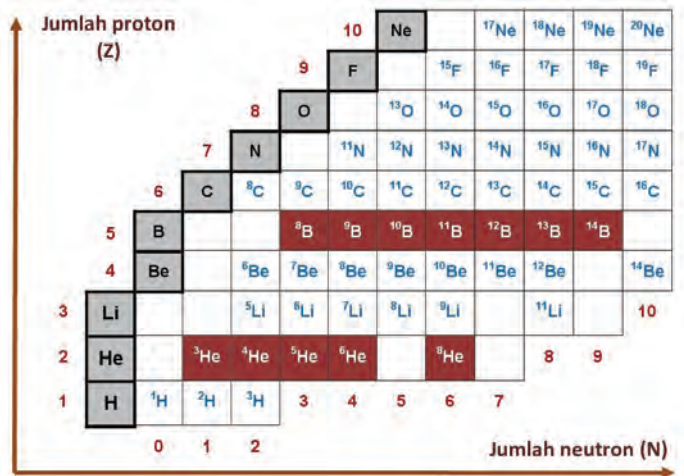
Gambar 5.2. Teknik penyajian sebaran unsur beserta isotop-isotopnya pada peta nuklida tipe N - Z (atas) dan tipe Z - N (bawah) [56]

Buku ini tidak diperjualbelikan.

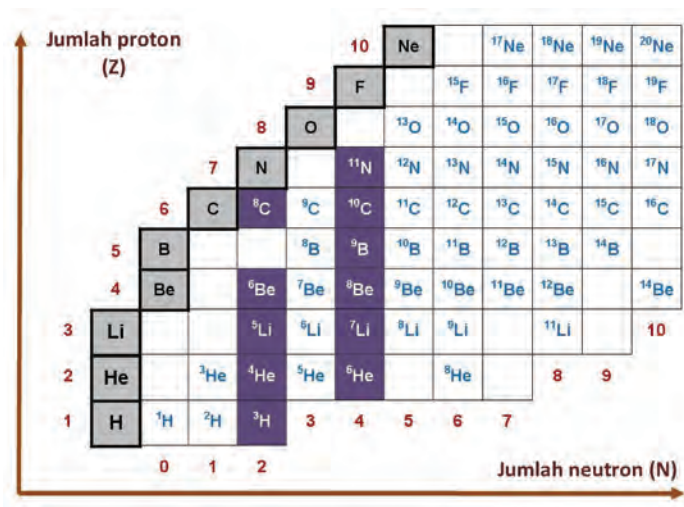
Pada Gambar 5.3 disajikan potongan peta nuklida sebagai contoh untuk analisis dalam rangka menggali informasi data suatu nuklida yang dapat diperoleh dari peta nuklida. Pada Gambar 5.3a dapat ditemukan nuklida-nuklida yang berada pada satu baris horizontal dimana inti atomnya memiliki Z sama dan N yang berbeda-beda sehingga nuklida-nuklida itu membentuk isotop. Ambil contoh atom helium (He) dengan $Z = 2$. Berdasarkan informasi yang tersaji pada peta nuklida, atom He dapat membentuk 5 jenis isotop, yaitu: ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$, ${}^6\text{He}$ dan ${}^8\text{He}$. Inti masing-masing isotop He itu berturut-turut mengandung 1, 2, 3, 4 dan 6 buah neutron. Contoh lain mengenai isotop dapat kita temukan pada unsur boron (B) dengan $Z = 5$.

Dari Gambar 5.3a terlihat bahwa unsur B dapat membentuk 7 jenis isotop, masing-masing adalah ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{B}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{13}\text{B}$ dan ${}^{14}\text{B}$, dengan kandungan neutron dalam masing-masing intinya berturut-turut adalah 3, 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 buah. Unsur Li dengan $Z = 3$ dapat membentuk 6 jenis isotop, sedang unsur Be dengan $Z = 4$ dapat membentuk 8 jenis isotop. Pada Gambar 5.3b, nuklida-nuklida yang berada pada satu kolom verikal inti atomnya memiliki N yang sama dengan Z yang berbeda-beda sehingga nuklida-nuklida itu membentuk isoton. Ambil contoh isotop ${}^3\text{H}$ ($Z = 1$ dan $A = 3$), membentuk isoton dengan nuklida ${}^4\text{He}$ ($Z = 2$ dan $A = 4$), ${}^5\text{Li}$ ($Z = 3$ dan $A = 5$), ${}^6\text{Be}$ ($Z = 4$ dan $A = 6$) dan ${}^8\text{C}$ ($Z = 6$ dan $A = 8$). Jumlah neutron dalam masing-masing inti nuklida tersebut adalah $N = A - Z = 2$ buah.

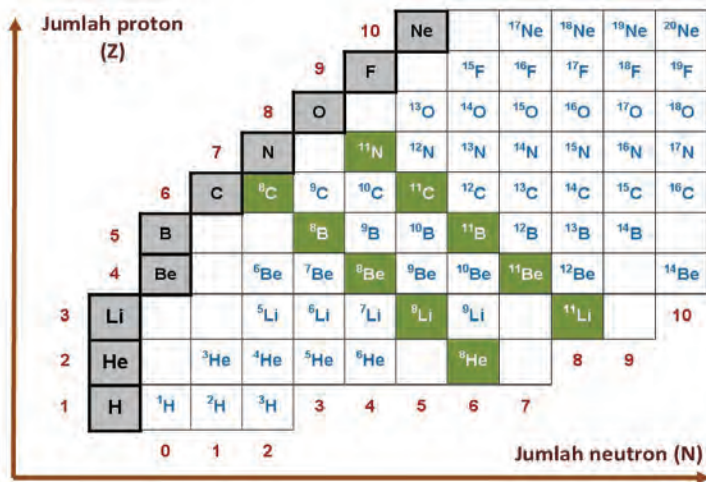
Contoh lainnya adalah isotop ${}^6\text{He}$ ($Z = 2$ dan $N = 4$), membentuk isoton dengan ${}^7\text{Li}$ ($Z = 3$ dan $A = 7$), ${}^8\text{Be}$ ($Z = 4$ dan $A = 8$), ${}^9\text{B}$ ($Z = 5$ dan $A = 9$), ${}^{10}\text{C}$ ($Z = 6$ dan $A = 10$) dan ${}^{11}\text{N}$ ($Z = 7$ dan $A = 11$). Jumlah neutron dalam masing-masing inti nuklida tersebut adalah $N = A - Z = 4$ buah. Atom-atom yang membentuk isobar dapat ditentukan dengan cara menarik garis diagonal miring ke kiri yang menghubungkan kotak-kotak yang ditempat nuklida-nuklida dengan nilai A sama seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3c.



Gambar 5.3a. Deretan nuklida-nuklida membentuk isotop [56]



Gambar 5.3b. Deretan nuklida-nuklida membentuk isoton [56]



Gambar 5.3c. Deretan nuklida-nuklida membentuk isobar [56]

Misal kita menarik garis diagonal yang menghubungkan kotak-kotak yang ditempati nuklida dengan $A = 8$. Garis tersebut akan melewati kotak-kotak yang berisi nuklida ${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ dan ${}^8\text{C}$. Kelima jenis nuklida tersebut membentuk isobar dengan $A = 8$. Contoh lainnya adalah garis diagonal yang menghubungkan kotak-kotak dengan nilai $A = 11$. Garis tersebut akan melewati kotak-kotak berisi nuklida ${}^{11}\text{N}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{11}\text{Be}$ dan ${}^{11}\text{Li}$. Kelima nuklida tersebut membentuk isobar dengan $A = 11$.

5.3. Model Peluruhan

Selain masalah isotop, isoton dan isobar sebagaimana dibahas di atas, masih ada informasi lain yang dapat diperoleh dari peta nuklida. Proses-proses fisika dalam inti atom sebagaimana telah diuraikan sebelumnya pada Bab 3 mampu menghadirkan nuklida-nuklida baru dalam jumlah banyak. Di antara nuklida-nuklida baru itu, banyak di antaranya yang bersifat radioaktif dan lebih dikenal dengan sebutan radionuklida. karakteristik radionuklida dapat dipelajari

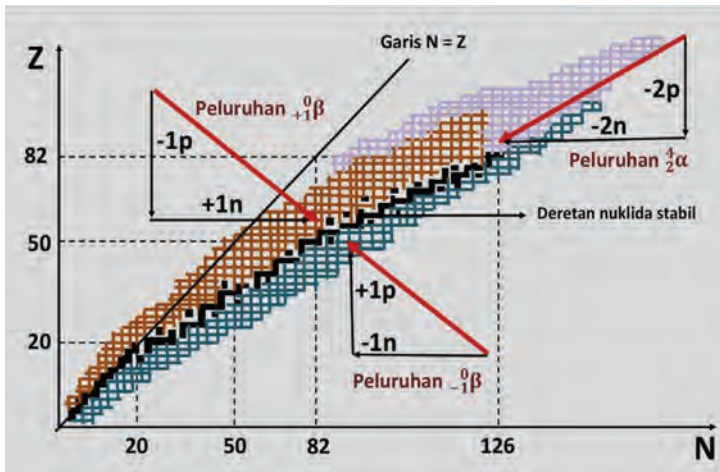
dengan membaca peta nuklida dan menganalisis informasi yang terkandung di dalamnya. Peta ini dapat memberikan gambaran karakteristik radionuklida berdasarkan pola sebaran atau posisi radionuklida tersebut pada peta. Terkait dengan masalah keradioaktifan ini, peta nuklida dapat memberi informasi mengenai jenis radiasi yang dipancarkan oleh suatu radionuklida.

Dari peta tipe $N-Z$ sebagaimana disajikan pada Gambar 5.2 dapat dilihat pola sebaran dan posisi setiap nuklida. Pertama, kita perhatikan distribusi nuklida-nuklida stabil (rangkaian kotak-kotak berwarna hitam) pada peta. Nuklida-nuklida stabil itu mengisi kotak-kotak bagian tengah dan membentuk wilayah sempit berbentuk kurva yang dikenal sebagai lembah kestabilan (*valley of stability*), ada juga yang menyebutnya sebagai pita kestabilan (*band of stability*) [42]. Kurva distribusi nuklida stabil itu membentang dari bawah ke atas dengan posisi berada di bawah garis lurus $N = Z$ dan mencapai posisi maksimum pada nilai $Z = 82$ (unsur timbal). Artinya, tidak ada lagi unsur dengan Z lebih besar dari 82 ($Z > 82$) yang intinya stabil. Di sekitar lembah atau pita kestabilan terdistribusi radionuklida yang dapat dibagi ke dalam tiga kelompok, yaitu kelompok radionuklida yang terdistribusi di sebelah kiri, kanan dan atas kurva.

Pada prinsipnya, peluruhan yang dilakukan oleh suatu radionuklida adalah dalam rangka mendekati posisi lembah kestabilan. Karena setiap kelompok radionuklida menempati posisi yang berbeda-beda di sekitar lembah (posisi sebelah kiri, kanan dan atas), maka setiap kelompok radionuklida itu menempuh pola yang berbeda dalam cara mendekati lembah kestabilan [42]. Artinya, masing-masing kelompok radionuklida memiliki pola peluruhan yang berbeda antara satu dengan yang lainnya. Pada Gambar 5.4 disajikan tiga pola peluruhan untuk setiap kelompok radionuklida.

Berdasarkan pola penyebarannya, peta nuklida memberi informasi yang cukup bagus mengenai landasan fisika yang

dapat dipakai untuk menjelaskan kenapa suatu kelompok radionuklida melakukan proses peluruhan dengan cara yang berbeda-beda [46]. Sebagaimana telah dibahas pada subbab 3.1, pola peluruhan radionuklida bergantung pada komposisi nukleon (proton dan neutron) dalam intinya.



Gambar 5.4. Distribusi radionuklida pada peta nuklida dan pola peluruhannya [42, 56]

Dari Gambar 5.4 dapat diuraikan tiga jenis pola peluruhan radionuklida sebagai berikut:

1. Radionuklida yang terdistribusi di sebelah kiri lembah kestabilan merupakan radionuklida yang kelebihan proton dan kekurangan neutron, sehingga pola peluruhan yang ditempuhnya adalah dengan mengurangi satu buah proton dan menambah satu buah neutron dalam intinya. Dengan kata lain, dalam inti atom radionuklida tersebut terjadi perubahan proton menjadi neutron disertai pemancaran positron (${}_{+1}^0\beta$).
2. Radionuklida yang terdistribusi di sebelah kanan

lembah kestabilan merupakan radionuklida yang kelebihan neutron dan kekurangan proton, sehingga pola peluruhan yang ditempuhnya adalah dengan mengurangi satu buah neutron dan menambah satu buah proton dalam intinya. Dengan kata lain, dalam inti atom radionuklida tersebut terjadi perubahan neutron menjadi proton disertai pemancaran elektron (${}^0_1\beta$).

3. Radionuklida yang terdistribusi di sebelah atas pita kestabilan merupakan unsur-unsur berat yang kelebihan proton dan neutron, sehingga pola peluruhan yang ditempuhnya adalah dengan mengurangi dua buah proton dan dua buah neutron sekaligus dari dalam intinya dalam bentuk pancaran partikel $\frac{4}{2}\alpha$.

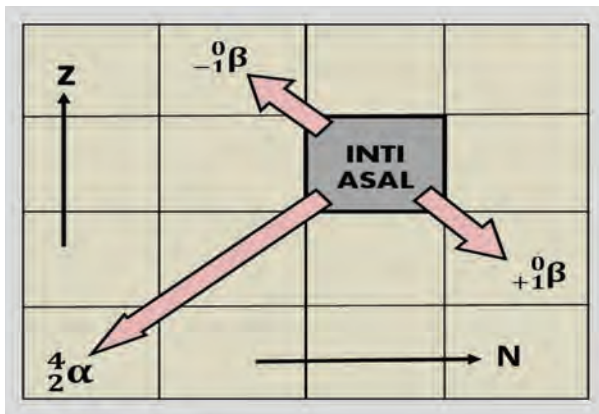
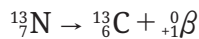
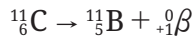
Karena terjadi perubahan komposisi nukleon dalam inti atom, maka setiap proses peluruhan akan menghasilkan inti baru yang berbeda dengan inti asal atau induknya. Melalui peta nuklida kita dapat menentukan jenis nuklida yang dihasilkan jika suatu radionuklida melakukan proses peluruhan. Peluruhan ${}^0_1\beta$ menghasilkan nuklida baru dengan nilai Z bertambah satu dan A tetap. Peluruhan ${}^0_1\beta$ menghasilkan nuklida dengan nilai Z berkurang satu dan A tetap. Sedangkan peluruhan $\frac{4}{2}\alpha$ menghasilkan nuklida baru dengan nilai Z berkurang dua dan A berkurang empat.

Untuk sebaran radionuklida yang disajikan pada peta nuklida tipe $N-Z$, maka denah lokasi yang menunjukkan posisi nuklida hasil peluruhan mengikuti aturan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5 [27]. Sebuah kotak yang ditempati radionuklida induk (inti asal) dilengkapi tiga anak panah dengan arah masing-masing menuju ke lokasi kotak yang akan ditempati oleh nuklida baru hasil peluruhan sesuai dengan jenis peluruhan yang terjadi pada radionuklida induknya.

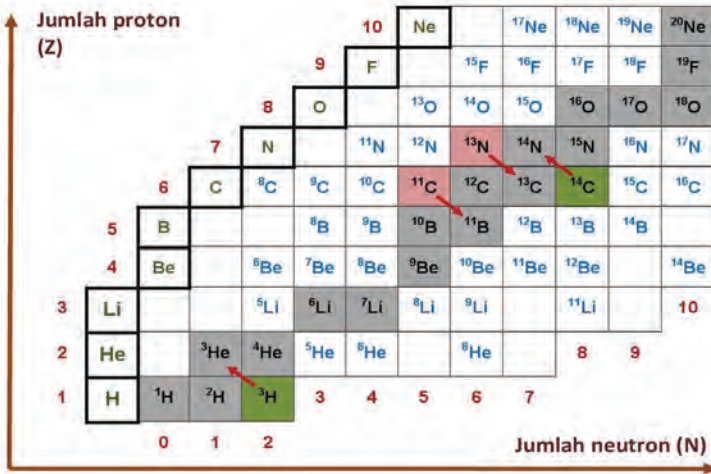
Sebagai gambaran, dari potongan peta nuklida yang disajikan pada Gambar 5.6, kita dapat menemukan beberapa jenis radionuklida, baik yang tersebar di sebelah kiri maupun

kanan lembah kestabilan. Lembah ini diisi oleh kotak-kotak nuklida dengan latar gelap. Pertama, kita coba menganalisis pola peluruhan dari dua jenis radionuklida yang berada di sebelah kiri lembah kestabilan, yaitu ^{11}C yang menempati posisi kotak dengan $N = 5$ dan $Z = 6$ serta ^{13}N yang menempati posisi kotak dengan $N = 6$ dan $Z = 7$. Berdasarkan posisinya pada peta nuklida, kedua radionuklida itu dapat dipastikan akan melakukan peluruhan ${}_{+1}^0\beta$.

Dengan mengikuti aturan pola peluruhan seperti disajikan pada Gambar 5.5, kita dapat menentukan posisi relatif terhadap radionuklida induk dan menemukan jenis nuklida hasil peluruhannya. Dari Gambar 5.6 kita dapatkan nuklida hasil peluruhannya, yaitu ^{11}B ($N = 6$ dan $Z = 5$) untuk ^{11}C dan ^{13}C ($N = 7$ dan $Z = 6$) untuk ^{13}N . Persamaan reaksi inti untuk kedua proses peluruhan tersebut adalah sebagai berikut:

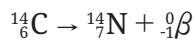


Gambar 5.5. Denah posisi nuklida baru hasil peluruhan relatif terhadap posisi radionuklida induk [27]



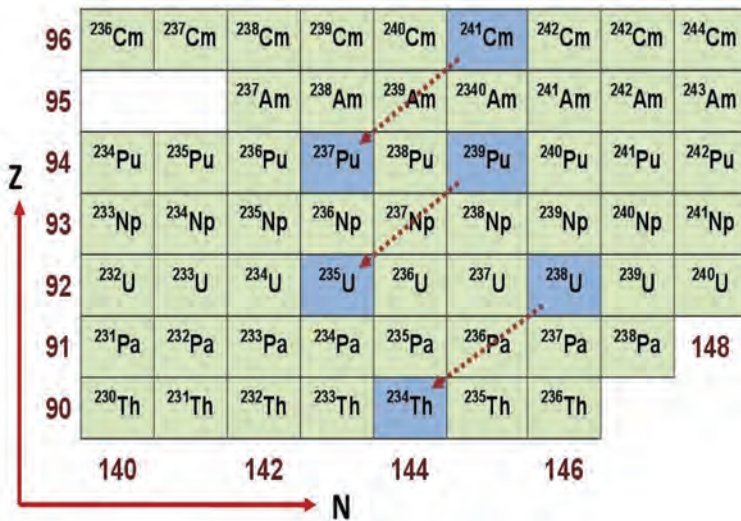
Gambar 5.6. Sebaran radionuklida di sekitar lembah kestabilan untuk $Z = 1$ sampai dengan 10 [41]

Berikutnya marilah kita coba menganalisa pola peluruhan dari radionuklida yang berada di sebelah kanan lembah kestabilan. Kita ambil radionuklida ${}^3\text{H}$ (posisi $N = 2$ dan $Z = 1$) dan ${}^{14}\text{C}$ (posisi $N = 8$ dan $Z = 6$). Berdasarkan posisinya pada peta nuklida, kedua radionuklida itu dapat dipastikan akan melakukan peluruhan ${}^0_{-1}\beta$. Dengan mengikuti aturan pola peluruhan seperti disajikan pada Gambar 5.5, dari Gambar 5.6 kita dapatkan nuklida hasil peluruhannya, yaitu ${}^3\text{He}$ (posisi $N = 1$ dan $Z = 2$) untuk peluruhan ${}^3\text{H}$ dan ${}^{14}\text{N}$ (posisi $N = 7$ dan $Z = 7$) untuk peluruhan ${}^{14}\text{C}$. Persamaan reaksi inti untuk kedua proses peluruhan tersebut adalah sebagai berikut:



Radionuklida ${}^3\text{H}$ dan ${}^{14}\text{C}$ merupakan contoh radionuklida yang terbentuk secara alamiah. Namun kini para ilmuwan juga berhasil menghadirkan berbagai jenis unsur secara buatan

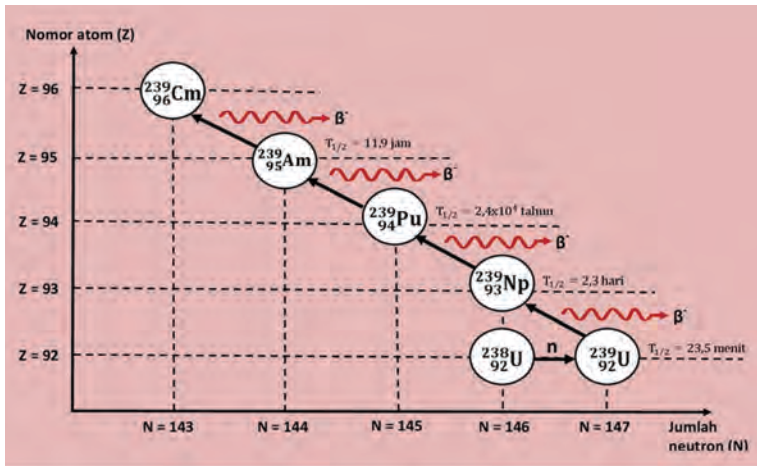
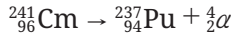
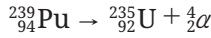
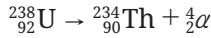
di laboratorium. Melalui proses aktivasi misalnya, atom ${}^7\text{Li}$ ($N = 4$ dan $Z = 3$) dapat diubah menjadi ${}^8\text{Li}$ dan ${}^9\text{Li}$ yang bersifat radioaktif. Keduanya dapat melakukan peluruhan ${}_{-1}^0\beta$. Sedang dari atom ${}^{11}\text{B}$ ($N = 6$ dan $Z = 5$) dapat dihasilkan atom-atom buatan ${}^{12}\text{B}$, ${}^{13}\text{B}$, dan ${}^{14}\text{B}$ semuanya bersifat radioaktif yang melakukan peluruhan ${}_{-1}^0\beta$.



Gambar 5.7. Potongan peta nuklida yang menyajikan unsur-unsur berat [41]

Pada Gambar 5.7 disajikan potongan peta nuklida untuk unsur-unsur berat. Sebagaimana dikemukakan sebelumnya, radionuklida dari kelompok unsur berat pada umumnya merupakan pemancar ${}_{2}^4\alpha$. Dari gambar 5.7 dapat ditemukan beberapa unsur berat yang dapat melakukan peluruhan ${}_{2}^4\alpha$. Berdasarkan aturan pola peluruhan sebagaimana disajikan pada Gambar 5.5, peluruhan ${}_{2}^4\alpha$ yang terjadi dalam inti ${}^{238}\text{U}$ (posisi $N = 146$ dan $Z = 92$) akan menghasilkan inti baru ${}^{234}\text{Th}$ (posisi $N = 144$ dan $Z = 90$), inti ${}^{239}\text{Pu}$ (posisi $N = 154$ dan $Z = 94$) menghasilkan inti baru ${}^{235}\text{U}$ (posisi $N = 143$ dan $Z = 92$), dan inti

$^{241}_{96}\text{Cm}$ (posisi $N = 145$ dan $Z = 96$) menghasilkan inti baru $^{237}_{94}\text{Pu}$ (posisi $N = 143$ dan $Z = 94$). Persamaan transmudasi inti dari ketiga proses peluruhan tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 5.8. Proses kehadiran unsur transuranium dengan $Z = 93$ sampai dengan 96 [53]

Dari gambar 5.7 kita juga bisa merunut proses terbentuknya empat unsur transuranium pertama setelah uranium (U , $Z = 92$), yaitu neptunium (Np , $Z = 93$), plutonium (Pu , $Z = 94$), americium (Am , $Z = 95$) dan curium (Cm , $Z = 96$). Sebagaimana dikemukakan pada bagian 4.4, unsur-unsur itu terbentuk melalui deret peluruhan $^0_{-1}\beta$ dari radionuklida induk $^{239}_{92}\text{U}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.

Beberapa jenis radionuklida alam selalu meluruh menghasilkan radionuklida baru yang disebut radionuklida

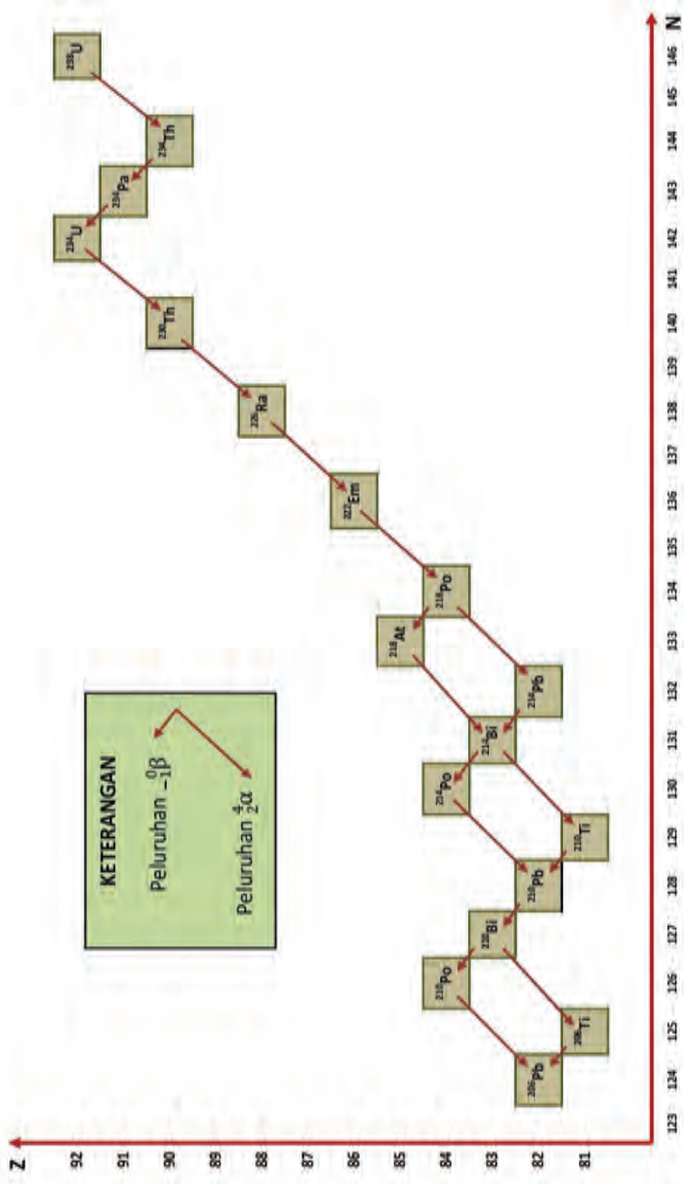
Buku ini tidak diperjualbelikan.

anak. Radionuklida anak ini juga dapat meluruh dan menghasilkan radionuklida lainnya, sehingga membentuk suatu deret peluruhan yang sangat panjang. Deret peluruhan dari radionuklida alam ini dapat dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu [19]:

1. **Deret uranium (U)**, dimulai dari ^{238}U dan berakhir pada timah hitam (^{206}Pb) yang stabil. Deret ini juga disebut deret $(4n + 2)$ karena A dari radionuklida anggota yang terdapat dalam deret ini habis dibagi 4 dengan sisa 2. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini adalah seperti disajikan pada Tabel 5.1, sedang skema rantai peluruhan yang menggambarkan posisi anak luruhnya pada peta nuklida adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9.
2. **Deret thorium (Th)**, mulai dari ^{232}Th dan berakhir pada ^{208}Pb yang stabil. Disebut juga deret $4n$ karena A dari radionuklida anggota yang terdapat dalam deret ini selalu habis dibagi 4. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini adalah seperti disajikan pada Tabel 5.2, sedang skema rantai peluruhan yang menggambarkan posisi anak luruhnya pada peta nuklida adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.10.
3. **Deret actinium**, mulai dari ^{235}U dan berakhir pada ^{207}Pb yang stabil. Deret ini juga disebut deret $(4n + 3)$ karena radionuklida anggota yang terdapat dalam deret yang dihasilkannya memiliki A yang habis dibagi 4 dengan sisa 3. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini adalah seperti disajikan pada Tabel 5.3, sedang skema rantai peluruhan yang menggambarkan posisi anak luruhnya pada peta nuklida adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11.

Tabel 5.1. Radionuklida anggota deret uranium (deret $4n + 2$) [12, 42]

Nama Radionuklida	Lambang	$N = A - Z$	Peluruhan
Uranium I (UI)	${}^{238}_{92}\text{U}$	146	α
Uranium X1 (UX1)	${}^{234}_{90}\text{Th}$	144	β
Uranium X2 (UX2)	${}^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$	143	β
Uranium Z (UZ)	${}^{234\text{g}}_{91}\text{Pa}$	143	β
Uranium II (UII)	${}^{234}_{92}\text{U}$	142	α
Ionium (Io)	${}^{230}_{90}\text{Th}$	140	α
Radium (Ra)	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	138	α
Ra Emanation (Rn)	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	136	α
Radium A (RaA)	${}^{218}_{84}\text{Po}$	134	α dan β
Radium B (RaB)	${}^{214}_{82}\text{Pb}$	132	β
Astatine 218	${}^{218}_{85}\text{At}$	133	α
Radium C (RaC)	${}^{214}_{83}\text{Bi}$	131	α dan β
Radium C' (RaC')	${}^{214}_{84}\text{Po}$	130	α
Radium C'' (RaC'')	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	129	β
Radium D (RaD)	${}^{210}_{82}\text{Pb}$	128	α dan β
Radium E (RaE)	${}^{210}_{83}\text{Bi}$	127	α dan β
Radium F (RaF)	${}^{210}_{84}\text{Po}$	126	α
Thalium 206	${}^{206}_{81}\text{Tl}$	125	β
Radium G (RaG)	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	124	stabil

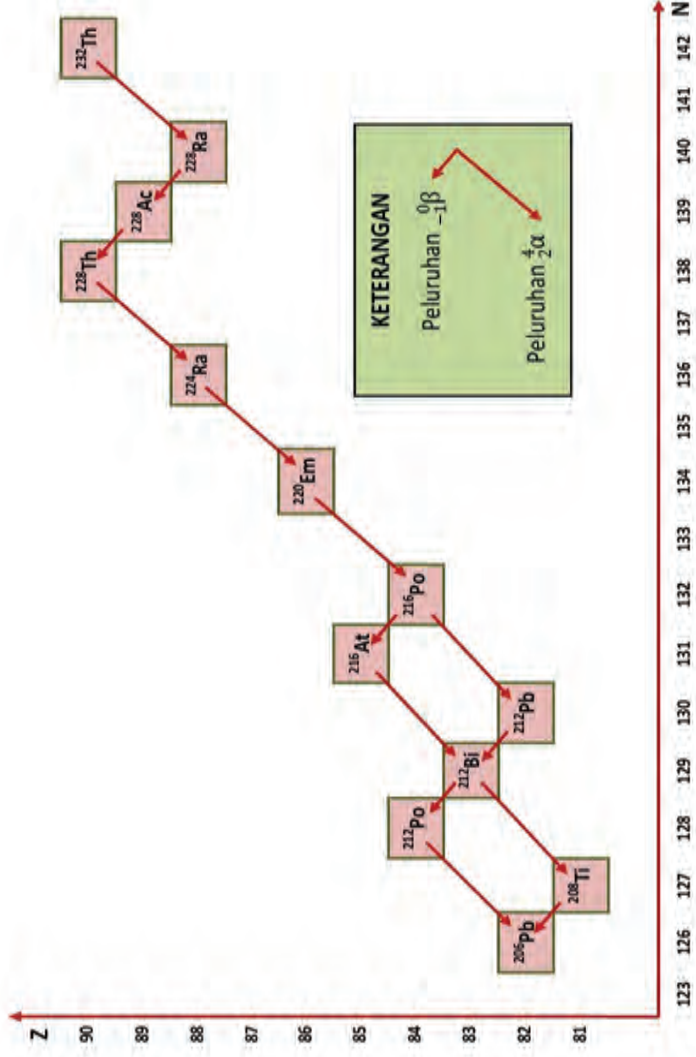


Gambar 5.9. Skema peluruhan deret uranium [42]

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 5.2. Radionuklida anggota deret thorium (deret 4n) [12, 42]

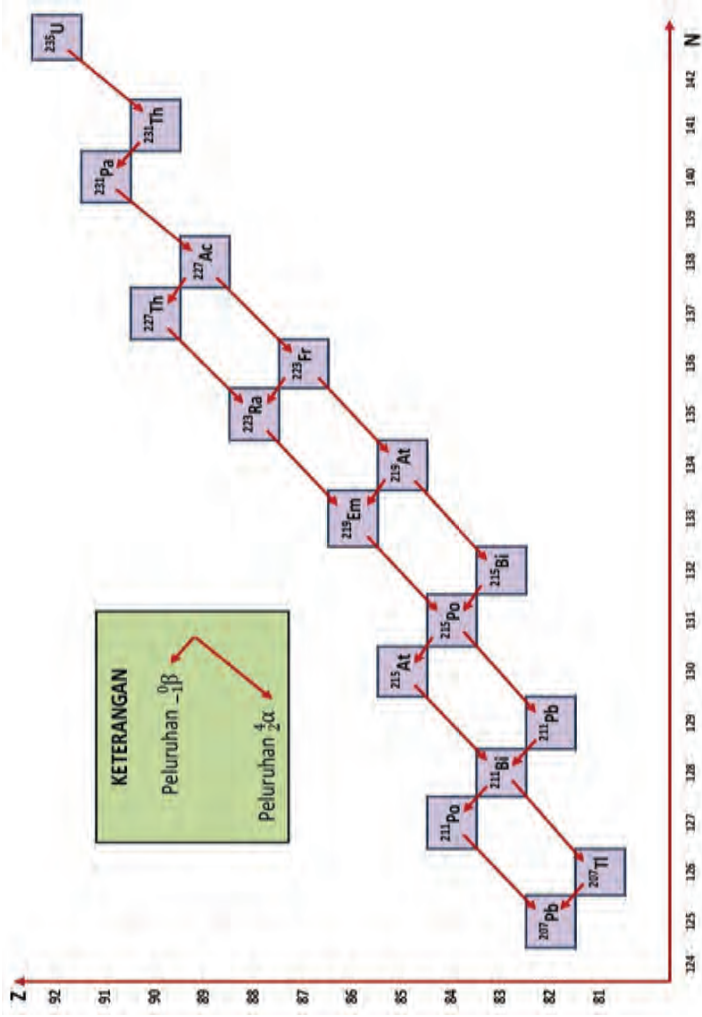
Nama Radionuklida	Lambang	$N = A - Z$	Peluruhan
Thorium (Th)	${}^{232}_{90}\text{Th}$	142	α
Mesothorium 1 (MsTh1)	${}^{228}_{88}\text{Ra}$	140	β
Mesothorium 2 (MsTh2)	${}^{228}_{89}\text{Ac}$	139	β
Radiothorium (RdTh)	${}^{228}_{90}\text{Th}$	138	α
Thorium X (ThX)	${}^{224}_{88}\text{Ra}$	136	α
Th Emanation (Tn)	${}^{220}_{86}\text{Em}$	134	α
Thorium A (ThA)	${}^{216}_{84}\text{Po}$	132	α dan β
Thorium B (ThB)	${}^{212}_{82}\text{Pb}$	130	β
Astatine 216	${}^{216}_{85}\text{At}$	131	α
Thorium C (ThC)	${}^{212}_{83}\text{Bi}$	129	α dan β
Thorium C' (ThC')	${}^{212}_{84}\text{Po}$	128	α
Thorium C'' (ThC'')	${}^{208}_{81}\text{Tl}$	127	β
Thorium D (ThD)	${}^{208}_{82}\text{Pb}$	126	stabil



Gambar 5.10. Skema peluruhan deret thorium [42]

Tabel 5.3. Radionuklida anggota deret actinium (deret $4n + 3$) [12, 42]

Nama Radionuklida	Lambang	$N = A - Z$	Peluruhan
Actinouranium (AcU)	${}^{235}_{92}\text{U}$	143	α
Uranium Y (UY)	${}^{231}_{90}\text{Th}$	141	β
Protactinium (Pa)	${}^{231}_{91}\text{Pa}$	140	α
Actinium (Ac)	${}^{227}_{89}\text{Ac}$	138	α dan β
Radioactinium (RdAc)	${}^{227}_{90}\text{Th}$	137	α
Actinium K (AcK)	${}^{223}_{87}\text{Fr}$	136	α dan β
Actinium X (AcX)	${}^{223}_{88}\text{Ra}$	135	α
Astatine 219	${}^{219}_{85}\text{At}$	134	α dan β
Ac Emanation (An)	${}^{219}_{86}\text{Em}$	133	α
Bismuth 215	${}^{215}_{83}\text{Bi}$	132	α dan β
Actinium A (AcA)	${}^{215}_{84}\text{Po}$	131	α dan β
Actinium B (AcB)	${}^{211}_{82}\text{Pb}$	129	β
Astatine 215	${}^{215}_{85}\text{At}$	130	α
Actinium C (AcC)	${}^{211}_{83}\text{Bi}$	128	α dan β
Actinium C' (AcC')	${}^{211}_{84}\text{Po}$	127	α
Actinium C'' (AcC'')	${}^{207}_{81}\text{Tl}$	126	α
Actinium D (AcD)	${}^{207}_{82}\text{Pb}$	125	stabil



Gambar 5.11. Skema peluruhan deret actinium [42]

5.4. Model Transmutasi Inti

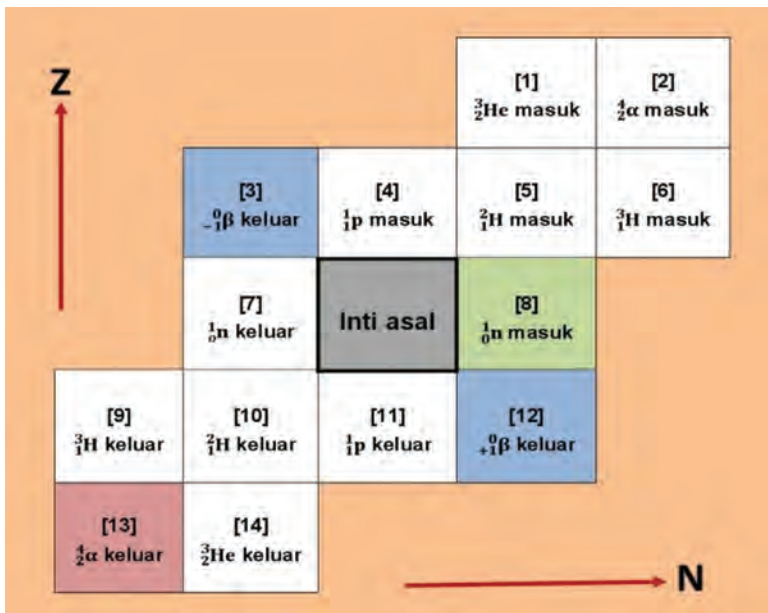
Selain peluruhan, dari peta nuklida kita juga dapat mempelajari hasil dari berbagai jenis transmutasi inti lainnya. Mengambil pola grafik *Cartesian* untuk peta nuklida tipe *N-Z*, pada Gambar 5.12 disajikan denah lokasi inti baru relatif terhadap inti asal apabila inti atom asal menyerap atau melepaskan partikel atau inti ringan lainnya [27,41]. Informasi yang tertera pada masing-masing kotak menunjukkan jenis proses yang terjadi di dalam inti atom asal. Untuk proses peluruhan, kotak nomor (3) merupakan kotak yang akan ditempati oleh inti atom baru setelah inti asalnya memancarkan sinar beta (${}_{-1}^0\beta$ keluar atau peluruhan ${}_{-1}^0\beta$). Proses yang terjadi dalam inti asal sehingga menghasilkan inti baru pengisi kotak nomor (8) dikenal sebagai proses pengaktifan neutron. Posisi kotak nomor (12) akan ditempati oleh inti atom baru setelah inti asalnya memancarkan positron (${}_{+1}^0\beta$ keluar atau peluruhan ${}_{+1}^0\beta$). Sedang inti asal yang melakukan peluruhan alfa (${}_{-2}^4\alpha$ keluar) menghasilkan anak luruh berupa inti baru yang menempati kotak nomor (13), relatif terhadap inti asal.

Suatu inti baru dapat terbentuk melalui beberapa proses reaksi nuklir yang berbeda. Begitu banyak variasi reaksi nuklir yang dapat berlangsung melalui kombinasi antara variasi inti atom target, jenis partikel untuk proyektil, energi yang dimiliki proyektil karena dipercepat di dalam berbagai jenis akselerator dengan kemampuan memberi energi kinetik pada partikel yang berbeda-beda, serta berbagai jenis sumber proyektil yang saat ini telah tersedia. Proses-proses nuklir yang mungkin terjadi pada suatu inti target yang ditembak proyektil itu dapat dipelajari melalui peta nuklida.

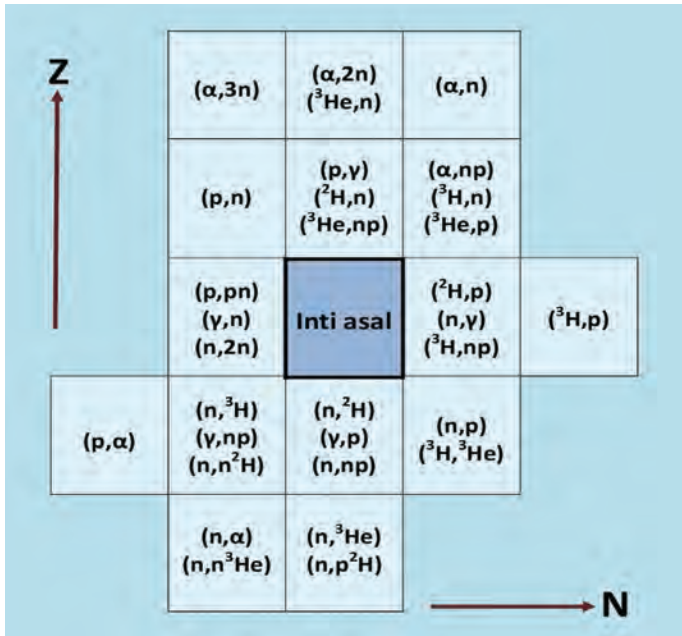
Secara umum, jenis-jenis proses nuklir yang dapat terjadi pada suatu inti atom adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.13. Dalam peta nuklida, posisi inti atom baru yang dihasilkan dari proses-proses nuklir tersebut menempati kotak-kotak di sekeliling inti asal, posisinya bergantung pada proses nuklir yang berlangsung pada inti asal, sebagaimana dinyatakan

dalam masing-masing kotak. Berbagai jenis transmudasi inti sebagaimana disajikan pada Gambar 5.13 merupakan jenis-jenis transmudasi nuklir yang saat ini telah berhasil dilakukan oleh para ilmuwan di laboratorium.

Suatu inti dapat mengalami transmudasi inti melalui beberapa cara, misal transmudasi melalui reaksi nuklir jenis (α, p) maupun (α, n) . Inti dari ^{23}Na dan ^{27}Al dapat memancarkan p atau n apabila ditembaki dengan partikel α . Untuk mempelajari perbedaan antara kedua jenis reaksi nuklir tersebut, pada Gambar 5.14 ditampilkan potongan peta nuklida untuk posisi atom Na dan Al, masing-masing dengan nomor atom 11 dan 13. Keduanya berperan sebagai inti asal. Untuk mengetahui posisi inti hasil transmudasi relatif terhadap posisi inti asal, digunakan denah posisi seperti disajikan pada Gambar 5.13.

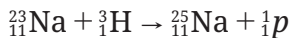
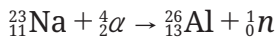


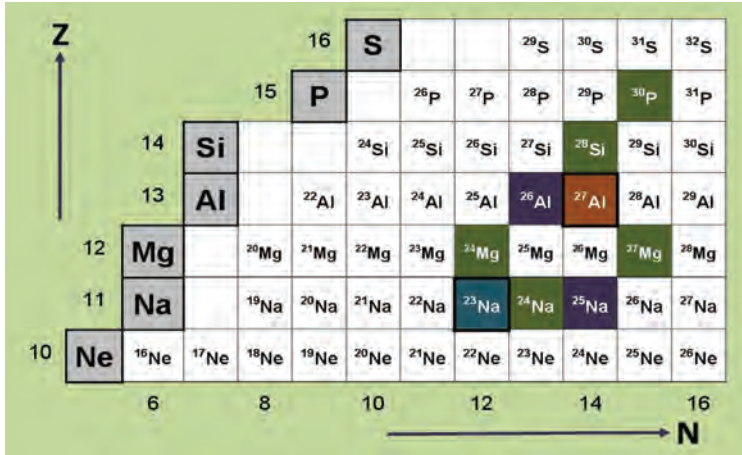
Gambar 5.12. Denah lokasi inti baru relatif terhadap inti asal yang menyerap atau melepaskan berbagai jenis partikel atau inti ringan [27,41]



Gambar 5.13. Denah lokasi inti baru dalam peta nuklida relatif terhadap inti asal yang melakukan berbagai jenis transmudasi inti seperti tertulis dalam kotak [41]

Jika ${}^{23}\text{Na}$ menjalani reaksi (α, n), maka inti baru yang dihasilkannya memiliki nomor atom naik dua satuan dan massanya naik tiga satuan. Dengan bantuan Gambar 5.13, pada Gambar 5.14 terlihat bahwa posisi itu ditempati oleh ${}^{26}\text{Al}$. Sedangkan jika ${}^{23}\text{Na}$ menjalani reaksi (${}^3\text{H}, p$), maka inti baru yang dihasilkan memiliki nomor atom sama dengan inti asal dan massanya naik dua satuan. Dengan bantuan Gambar 5.13 dan data pada Gambar 5.14, posisi itu ditempati oleh ${}^{25}\text{Na}$. Persamaan transmudasi inti yang melibatkan nuklida ${}^{23}\text{Na}$ tersebut adalah sebagai berikut:





Gambar 5.14. Potongan peta nuklida yang menampilkan nuklida Na dan Al [41]

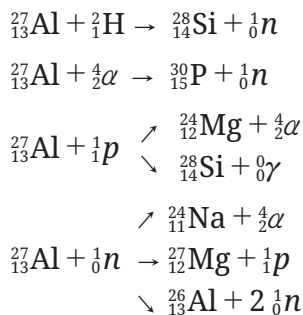
Pada inti Al, jika ^{27}Al menjalani reaksi (α, n) , maka inti baru yang dihasilkannya memiliki nomor atom naik dua satuan dan massanya naik tiga satuan. Pada Gambar 5.14 terlihat bahwa posisi itu ditempati oleh nuklida ^{30}P . Transmutasi inti lainnya yang masih dapat terjadi pada inti ^{27}Al adalah menjalani reaksi (p, α) sehingga menghasilkan inti baru ^{24}Mg , dan menjalani reaksi (n, α) sehingga menghasilkan inti baru ^{24}Na . Ketiga nuklida baru yang dihasilkan dari transmutasi inti ^{27}Al itu dapat ditemukan posisinya pada peta nuklida Gambar 5.14 dengan bantuan Gambar 5.13.

Selain reaksi-reaksi nuklir di atas, inti ^{27}Al masih bisa menjalani transmutasi inti jenis lainnya, seperti reaksi penangkapan p atau reaksi (p, γ) . Dari reaksi ini akan dihasilkan inti baru yang nomor atom dan nomor massanya bertambah satu satuan. Berdasarkan ketentuan pola reaksi sebagaimana disajikan pada Gambar 5.13, pada peta nuklida Gambar 5.14 dapat ditemukan inti baru yang dihasilkan, yaitu ^{28}Si . Inti ^{27}Al juga bisa menjalani transmutasi inti melalui reaksi nuklir jenis (d, n) sehingga menghasilkan inti baru yang nomor

atom maupun nomor massanya bertambah satu satuan. Dari Gambar 5.14 bisa ditentukan inti baru yang dihasilkan, yaitu ^{28}Si .

Reaksi inti jenis lain yang dapat terjadi pada ^{27}Al adalah reaksi (n,p) . Reaksi ini pada prinsipnya adalah reaksi penggantian p dengan n sehingga tidak mengubah nilai A namun Z inti yang dihasilkannya berkurang satu satuan. Dari Gambar 5.14 dapat ditemukan inti baru yang dihasilkan, yaitu ^{27}Mg . Reaksi nuklir jenis $(n, 2n)$ yang terjadi pada inti ^{27}Al menghasilkan inti baru ^{26}Al karena tidak terjadi perubahan muatan di dalam inti, namun terjadi penurunan satu buah n sehingga massanya susut satu satuan. Jika ^{27}Al menjalani reaksi (n, d) , maka inti baru yang dihasilkannya memiliki nomor atom turun satu satuan dan massanya naik satu satuan. Pada Gambar 5.14, posisi itu ditempati oleh ^{26}Mg .

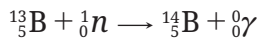
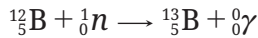
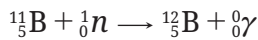
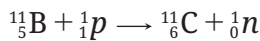
Dari uraian di atas, terlihat bahwa nuklida ^{27}Al dapat mengalami berbagai jenis transmudasi inti menghasilkan berbagai jenis nuklida baru. Transmudasi yang terjadi pada nuklida ^{27}Al tersebut dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut:



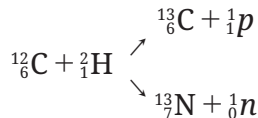
Sebagaimana disajikan pada Gambar 5.13, selain beberapa contoh transmudasi inti seperti diuraikan di atas, masih ada beberapa contoh transmudasi inti lainnya yang dapat dikemukakan pada pembahasan berikut. Untuk mempelajari

pola transmudasi inti yang sangat beragam, perhatikan potongan peta nuklida seperti disajikan pada Gambar 5.15. Inti target ^{11}B ($N = 6$ dan $Z = 5$) dapat menjalani transmudasi inti melalui reaksi (p, n) sehingga menyebabkan kenaikan Z inti baru yang dihasilkan sebesar satu satuan namun A -nya tidak berubah. Dengan bantuan denah posisi relatif seperti disajikan Gambar 5.13, dari Gambar 5.15 dapat diketahui inti baru yang dihasilkannya, yaitu ^{11}C . Sedang proses aktivasi atau reaksi (n, γ) terhadap inti ^{11}B dapat menghasilkan atom-atom buatan ^{12}B , ^{13}B , dan ^{14}B .

Persamaan transmudasi inti yang menunjukkan perubahan inti ^{11}B menjadi inti ^{11}C , ^{12}B , ^{13}B dan ^{14}B adalah sebagai berikut:

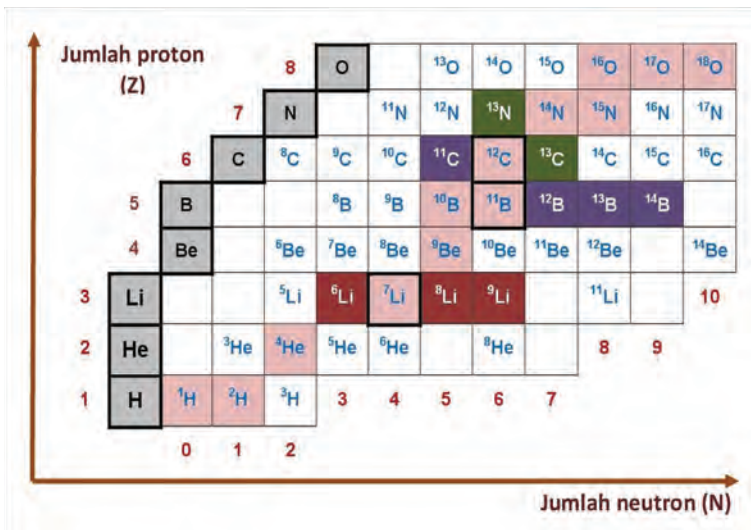
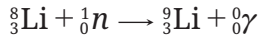
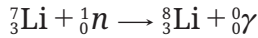
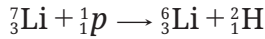


Reaksi (d, p) dapat terjadi pada target ^{12}C ($N = 6$ dan $Z = 6$) dengan hasil akhir transmudasinya adalah inti baru ^{13}C dengan Z tetap dan A -nya bertambah satu satuan dibanding inti asal. Inti target ^{12}C juga dapat menjalani transmudasi inti jenis (d, n) yang menghasilkan inti baru ^{13}N dengan Z dan A masing-masing bertambah satu satuan dibanding inti asal. Persamaan transmudasi inti yang menunjukkan perubahan inti ^{12}C menjadi inti ^{13}C dan ^{13}N adalah sebagai berikut:



Transmudasi inti melalui reaksi nuklir jenis (p, d) atau (p, pn) dapat terjadi pada inti atom target ^7Li ($N = 4$ dan $Z = 3$). Reaksi ini tidak menaikkan Z inti tetapi mengurangi A inti sebesar satu satuan. Berdasarkan data pada Gambar

5.15, dapat diketahui inti atom baru yang dihasilkan, yaitu ${}^6\text{Li}$. Melalui proses aktivasi, atom ${}^7\text{Li}$ dapat diubah menjadi ${}^8\text{Li}$ dan ${}^9\text{Li}$. Persamaan transmudasi inti yang menunjukkan perubahan inti ${}^7\text{Li}$ menjadi inti ${}^6\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$, dan ${}^9\text{Li}$ adalah sebagai berikut:



Gambar 5.15. Potongan peta nuklida untuk posisi atom Li, B, dan C [41]

5.5. Data Nuklir Lain

Peta nuklida pada prinsipnya adalah teknik dan seni penyajian nuklida-nuklida yang ditampilkan sedemikian rupa sehingga setiap nuklida dapat dikenali dan dibedakan antara satu dengan yang lainnya. Untuk keperluan tersebut, beberapa tanda pembeda beserta keterangan-keterangan khusus sering

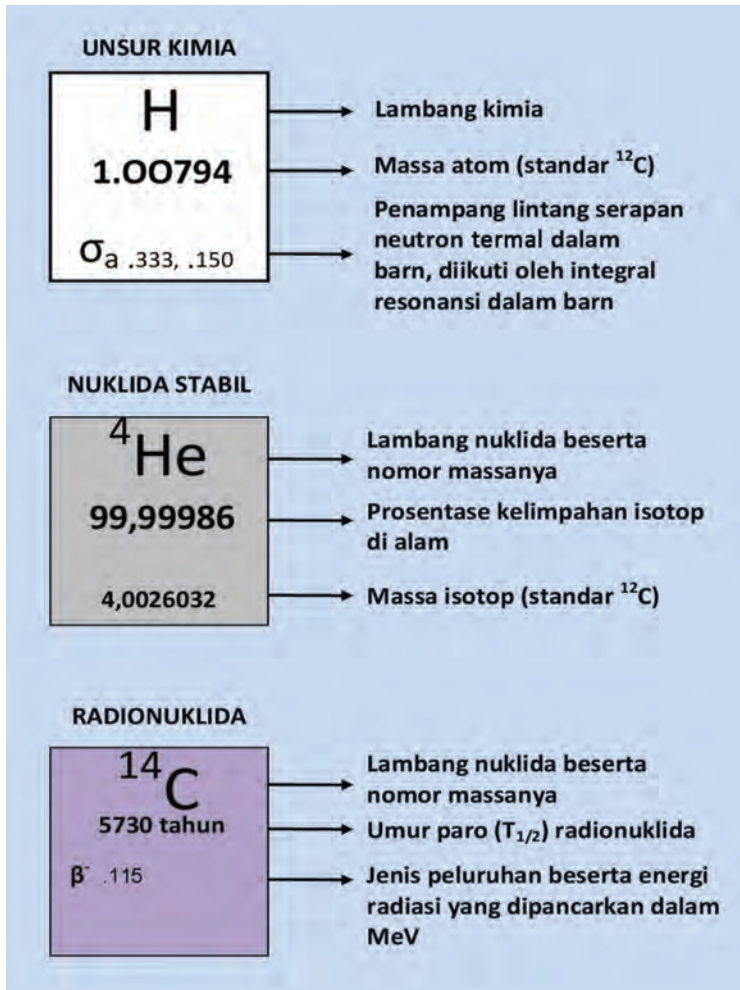
digunakan dalam penyajian peta nuklida. Sebagai contoh [12], ada peta nuklida yang menyajikan distribusi nuklida-nuklida stabil dengan notasi kotak hitam (■), radionuklida pemancar elektron (${}_{-1}^0\beta$) dengan notasi lingkaran kosong (o), radionuklida pemancar positron (${}_{+1}^0\beta$) dengan notasi tanda plus (+), radionuklida pemancar radiasi campuran $\frac{1}{2}\alpha$ dengan ${}_{-1}^0\beta$ atau ${}_{+1}^0\beta$ dengan notasi segitiga (Δ) dan radionuklida pemancar $\frac{4}{2}\alpha$ murni dengan notasi kotak putih (□).

Tidak jarang suatu peta nuklida juga menyajikan data nuklir terkait dengan karakteristik nuklida yang bersangkutan. Data yang disertakan itu meliputi kelimpahan isotopnya di alam, umur paruh untuk radionuklida, penampang lintang serapan neutron termik, simbol lama yang pernah digunakan untuk nuklida tertentu, massa atom relatif, jenis peluruhan dan energi radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida, serta data terkait lainnya seperti disajikan pada Gambar 5.16 [41].

Ada juga peta yang mengklasifikasikan nuklida berdasarkan perbedaan warna dasar untuk masing-masing kotak nuklidanya. Dengan cara ini dapat dibedakan antara nuklida alam dan buatan, nuklida stabil dan radioaktif, panjang pendek umur paruh suatu radionuklida dan sebagainya. Sebagai contoh, peta nuklida yang dikeluarkan oleh *General Electric Company (Nuclear Energy Operations, 175 Currier Avenue, MIC 684 San Jose, California 95125, USA)* membagi umur paruh radionuklida ke dalam empat kelompok dan menandainya dengan warna yang berbeda-beda pada bagian atas kotak nuklida [41], masing-masing warna mewakili umur paruh antara 1 sampai 10 hari (warna kuning tua), 10 sampai 100 hari (warna kuning muda), 100 hari sampai 10 tahun (warna hijau muda), dan 10 tahun sampai 10.000 tahun (warna biru muda).

Peta nuklida ini juga menggunakan empat kelompok warna di setengah bagian bawah kotak untuk menandai perbedaan karakteristik serapan neutron masing-masing nuklida. Keempat kelompok warna itu digunakan untuk

menandai nuklida-nuklida dengan penampang lintang serapan neutron termiknya berkisar antara 10 hingga 100 barn (berwarna biru muda), 100 hingga 500 barn (berwarna hijau muda), 500 hingga 1000 barn (berwarna kuning muda), dan lebih besar dari 1000 barn (berwarna kuning tua).



Gambar 5.16. Penyajian data nuklir dalam kotak-kotak peta nuklida [41]

Untuk mendapatkan gambaran mengenai data nuklir yang disajikan dalam peta nuklida, pada Gambar 5.17 disajikan potongan peta nuklida untuk atom He beserta isotop-isotopnya. Berdasarkan data yang tersaji dalam peta nuklida itu, atom He secara alamiah membentuk dua jenis isotop (kotak berlatar agak gelap), yaitu ^3He dengan kelimpahan isotopnya hanya 0,00014 (%) dan ^4He dengan kelimpahan isotopnya mencapai 99,99986 (%). Pada kotak yang ditempati isotop stabil disertakan data massa isotop, masing-masing 3,01602929 (satuan massa atom atau u) untuk ^3He dan 4,0026032 (u) untuk ^4He [41].

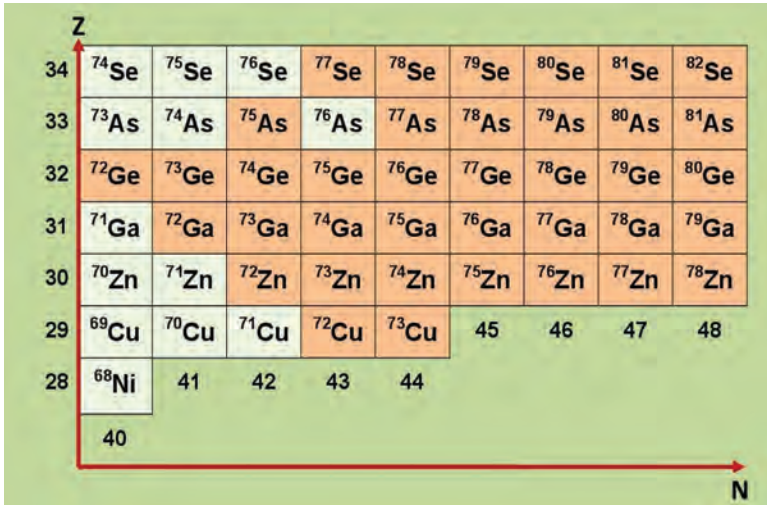
	^3He 0,00014 3,01602929	^4He 99,99986 4,0026032	^5He 2×10^{-21} s	^6He 8,05 ms		^8He 119 ms	
--	--	--	--	--------------------------	--	-------------------------	--

Gambar 5.17. Potongan peta nuklida untuk atom helium [41]

Proses nuklir telah berhasil menghadirkan tiga isotop buatan He lainnya (kotak putih/polos) yang semuanya bersifat radioaktif, yaitu ^5He , ^6He , dan ^8He . Karena itu, dalam potongan peta nuklida Gambar 5.17 disajikan pula data nuklir yang melekat pada radionuklida, yaitu waktu paruh ($T_{1/2}$) dari ketiga isotop buatan tersebut, masing-masing adalah : ^5He dengan $T_{1/2} = 2 \times 10^{-21}$ detik, ^6He dengan $T_{1/2} = 805$ milidetik, dan ^8He dengan $T_{1/2} = 119$ milidetik.

Dalam peta nuklida, radionuklida yang terbentuk sebagai hasil dari proses fisi (misal fisi yang berlangsung pada inti ^{235}U) dapat ditampilkan dengan tanda khusus agar dapat dikenal dan dibedakan dari nuklida-nuklida lainnya. Peta nuklida yang dikeluarkan oleh *General Electric Company* memberi tanda khusus terhadap radionuklida-radionuklida hasil fisi dengan segitiga hitam di pojok kanan bawah kotak nuklida yang bersangkutan [41]. Pada Gambar 5.18 disajikan potongan peta nuklida yang memuat radionuklida-radionuklida hasil

fisi, dibedakan berdasarkan perbedaan warna dasar pada kotak nuklida. Untuk radionuklida hasil fisi, warna dasar kotak nuklidanya lebih gelap. Dari potongan peta nuklida itu kita dapat mengenali radionuklida hasil fisi seperti ^{72}Cu dan ^{73}Cu , juga radionuklida dari ^{72}Zn hingga ^{78}Zn , dari ^{72}Ga hingga ^{79}Ga dan sebagainya.



Gambar 5.18. potongan peta nuklida yang menyajikan radionuklida hasil fisi [41]

BAB 6

PENUTUP

Studi tentang materi merupakan salah satu kegiatan penting dalam kehidupan manusia. Bukan hanya karena manusia hidup di dalam lingkungan yang tersusun atas berbagai jenis materi, melainkan karena materi itulah yang menopang kehidupan manusia. Alam telah menyediakan berbagai jenis materi yang diperlukan oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari, baik sebagai bahan makanan atau sumber energi, maupun sebagai sarana yang memungkinkan manusia melakukan aktivitas dalam rangka mempertahankan dan memaknai kehidupannya.

Jika materi ditinjau sampai sebatas atom, maka dalam pelajaran tentang materi dikenal adanya sifat intensif materi, yaitu sifat yang tidak bergantung pada jumlah dan ukuran materi. Sifat intensif ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu sifat fisika dan kimia. Sifat fisika merupakan sifat materi yang dapat diamati tanpa materi itu mengalami perubahan secara kekal, seperti warna, bau, rasa, kekerasan, titik didih, dan titik leleh yang melekat pada materi tertentu. Sedangkan sifat kimia merupakan sifat materi yang dapat diamati hanya jika materi tersebut mengalami perubahan kekal, seperti perubahan warna, reaktivitas kimia, kestabilan ikatan kimia, dan lain-lain.

Karena merupakan bagian yang sangat penting bagi kehidupan, sudah sewajarnya jika keberadaan materi

penyusun alam semesta ini menarik perhatian umat manusia sejak zaman dahulu. Itulah sebabnya, sifat ingin tahu manusia terhadap materi selalu muncul dan pengetahuan manusia tentang materi pun selalu bertambah seiring dengan perjalanan sejarah perkembangan ilmu pengetahuan. Jika semula manusia hanya mempelajari sifat-sifat fisika dan kimia suatu materi hingga sebatas atom, maka dalam perkembangan berikutnya sampailah pemahaman manusia tentang materi itu menjangkau ke tingkatan yang lebih kecil lagi, yaitu inti atom.

Ketika materi ditinjau sampai ke level inti atom, maka tingkat keberagaman materi terlihat semakin lebar. Atom-atom sejenis bisa memperlihatkan atau memiliki karakteristik fisika yang berbeda-beda karena perbedaan struktur inti atomnya. Jika semula para ilmuwan bisa mengenali dan mengelompokkan atom-atom cukup dengan tabel periodik unsur-unsur, keragaman pada level inti atom ternyata tidak dapat ditampilkan seluruhnya secara bersamaan dalam tabel periodik. Karena itu, teknik penyajian atom-atom beralih ke penyajian dalam bentuk peta nuklida. Dengan peta nuklida, keadaan setiap jenis inti suatu atom terdefiniskan dengan jelas dan setiap atom dapat dikenali dengan baik.

Peta nuklida ternyata bisa memberikan informasi yang lebih banyak tentang sifat-sifat inti atom. Keberadaan isotop, isoton dan isobar terbaca dengan jelas pada peta nuklida. Sebaran atom-atom stabil dan radioaktif juga tergambar dengan jelas di dalamnya. Bahkan jenis peluruhan kelompok radionuklida pun tergambar dengan jelas pada peta nuklida. Peta itu menempatkan kelompok radionuklida pemancar elektron, positron dan alfa pada posisi yang berbeda-beda. Selain jenis peluruhan, dengan peta nuklida kita juga bisa menentukan hasil dari proses peluruhan suatu radionuklida.

Ada berbagai macam fenomena fisika yang dapat terjadi yang melibatkan inti atom, misal kehadiran nuklida-nuklida buatan yang dihasilkan dari transmudasi inti. Hingga kini sudah cukup banyak informasi berkaitan dengan inti atom

yang berhasil diungkap para ilmuwan. Ada berbagai jenis transmudasi inti yang telah berhasil diupayakan oleh para ilmuwan di laboratorium. Kehadiran nuklida-nuklida baru itu dapat dipelajari secara baik dengan memanfaatkan peta nuklida.

Hasil dari suatu proses transmudasi inti dapat dibaca langsung pada peta nuklida, atau diramalkan keberadaannya dengan peta nuklida. Dalam peta nuklida juga sering disertakan data nuklir untuk nuklida tertentu. Data nuklir adalah data yang diperoleh dari inti atom yang dapat dipakai untuk menggambarkan karakteristik inti atom tersebut. Data ini berhubungan sangat erat dengan peristiwa fisika yang dapat terjadi pada level inti atom. Data nuklir dapat dipakai untuk mengenali kestabilan maupun keradioaktifan suatu bahan. Pada atom radioaktif, data nuklir dapat dipakai untuk menentukan jenis maupun energi radiasi yang dipancarkan serta usia hidup rata-rata atom tersebut. Pada atom-atom tertentu, data nuklir juga menggambarkan peluang terjadinya reaksi atom tersebut dengan partikel-partikel tertentu. Pada atom-atom berat, data nuklir berkaitan dengan peluang terjadinya reaksi pembelahan inti atom maupun kemampuan inti dalam menyerap partikel. Melalui peta nuklida, berbagai kemungkinan proses nuklir yang terjadi di dalam inti atom dapat diketahui atau ditentukan produk akhirnya.

Uraian dalam buku ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca dalam mengenali atom secara detil. Ada banyak informasi tentang atom yang dapat digali dari peta nuklida, serta banyak manfaat yang dapat diperoleh seseorang dengan membaca peta nuklida. Pemahaman yang baik terhadap cara membaca peta nuklida dapat mempermudah seseorang dalam menemukan informasi maupun data mengenai suatu nuklida. Informasi dasar dari suatu nuklida ini sangat diperlukan bagi mereka yang berkecimpung dalam studi radioaktivitas lingkungan, radiokimia, fisika lingkungan dan kesehatan, serta bidang-bidang terkait lainnya. Bagi para

peneliti fisika nuklir, peta nuklida sangat membantu dalam meramal kemungkinan munculnya atom-atom buatan melalui proses transmutasi inti di laboratorium. Kehadiran atom-atom baru itu tentu memiliki implikasi yang sangat luas bagi perkembangan ilmu pengetahuan pada masa yang akan datang.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Keenan CW, Kleinfelter DC, Wood JH. Kimia untuk universitas (Alih Bahasa Handyana Pudjaatmaka). Edisi keenam, jilid 1. Jakarta: Penerbit Erlangga; 1989.
2. Honour H, Fleming J. A world history of art. London: Laurence King; 2009.
3. Soejono RP. Tinjauan tentang pengkerangkaan prasejarah Indonesia. Aspek-aspek Arkeologi Indonesia No. 5. Jakarta: Pusat Arkeologi; 2000.
4. Hanny W. Nekara: peninggalan seni budaya dari zaman perunggu. *Humaniora*. April 2013, 4(1): 212-220.
5. Erlangga AM. Sejarah & kebudayaan dunia. Yogyakarta: Familia; 2013.
6. Norris G and Wagner M. Boeing 787 Dreamliner. Voyageur Press; 2009.
7. Wospakrik HJ. Dari atomos hingga quark. Jakarta 12210: Penerbit Universitas Atma Jaya/Kepustakaan Populer Gramedia; Mei 2005.
8. Santoso RSI. Kapita selecta sejarah perkembangan ilmu pengetahuan. Jakarta: Sinar Hudaya; 1977.
9. George J. Structure of atom: the space inside of an atom is not empty. Createspace Independent Pub; 2010.
10. Young HD, Freedman RA. University physics. 9th ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company; 1998.

11. Chang R. Kimia dasar: konsep-konsep inti. Edisi ketiga, jilid 1. Jakarta: Penerbit Erlangga; 2004.
12. Kaplan I. Nuclear physics. 2nd ed. London: Addison-Wesley Publishing Company; 1979.
13. J.J. Thomson's cathode rays tube: Why does the magnetic field bend the cathode ray downward? Tersedia di: <https://physics.stackexchange.com/questions/149803/j-j-thomsons-cathode-ray-tube-why-does-the-magnetic-field-bend-the-cathode-ra>. Dikunjungi: 19 Maret 2018.
14. Krane KS. Fisika modern. Terjemahan oleh HJ Wospakrik & S Niksolihin. Salemba 4, Jakarta 10430: Penerbit Universitas Indonesia; 1992.
15. Balchin J. Quantum leaps, 100 ilmuwan besar paling berpengaruh di dunia. Jakarta Selatan 12520: Ufuk Press; Maret 2012.
16. Taylor JR, Zafiratos CD. Modern physics for scientist and engineers. New Jersey: Prentice Hall; 1991.
17. Millikan's oil drop experiment. Tersedia di: <https://www.thoughtco.com/millikan-oil-drop-experiment-606460>. Dikunjungi: 19 Maret 2018.
18. Wilopo AC, editor. Seabad pemenang hadiah nobel fisika. Jakarta: Abdi Tandur; 2002.
19. Chember H, Johnson TE. Introduction of health physics. 4th ed. New York: Pergamon Press; 2009.
20. Cohen BL. Concept of nuclear physics. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd; 1982.
21. Gautreau R, Savin W. Fisika modern. Terjemahan oleh Hans J. Wospakirk. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga; 1995.
22. Arnikar HJ. Essentials of nuclear chemistry. 4th ed. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers; 1996.
23. Keenan CW, Kleinfelter DC, Wood JH. Kimia untuk universitas (Alih Bahasa Handyana Pudjaatmaka). Edisi keenam, jilid 2. Jakarta: Penerbit Erlangga; 1989.

24. Halliday D, Resnic R. Fisika modern. Alih bahasa oleh P. Silaban. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga; 1990.
25. Birch B. Marie Curie. Alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama; 1993.
26. Amirudin A. Kimia inti dan radiokimia. Jakarta: PDIN-BATAN; 2009.
27. Martin A, Harbinson SA. An introduction to radiation protection. 3rd ed. London: Chapman and Hall; 1986.
28. Alonso M, Finn EJ. Fundamental university physics volume III. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1980.
29. Knief RA. Nuclear energy technology, theory and practice of commercial nuclear power. London: McGraw-Hill Book Company; 1981.
30. Watson GW. A brief history of element discovery, synthesis, and analysis. India: Open Knowledge Foundation Network, 2011.
31. 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.
32. Herman A. The new physics, the route into atomic age. Federal Republic of Germany: International Bonn-bad Godesberg, 1979.
33. Allison SK. Enrico Fermi 1901—1954. Washington DC: National Academy Of Sciences, 1995.
34. The History of Nuclear Energy. Washington DC: US Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 1990.
35. Macdonald F. Albert Einstein. Alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1996.
36. The First Reactor. Washington DC 20585: US Department of Energy, December 1982.
37. Nuclear weapons: a comprehensive study, report of the

- secretary-general United Nation. New York: Department for Disarmament Affairs, 1991.
38. White OR. Matahari. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 65-78.
 39. 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; hal. 139-161.
 40. Modern periodic table. Tersedia di: <https://www.ck12.org/chemistry/modern-periodic-table/lesson/Modern-Periodic-Table-MS-PS/>. Dikunjungi: 20 April 2015.
 41. Walker FW, Miller DG, Feiner F. Nuclides and isotopes. 14th ed. California: GE Nuclear Energy; 1989.
 42. Friedlander G, Kennedy JW, Macias ES. Nuclear and radiochemistry. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1981.
 43. Fontani M, Costa M, Orna MV. The lost elements: the periodic table's shadow side. Oxford: Oxford University Press; 2015.
 44. Life science. Facts about technetium. Tersedia di: <https://www.livescience.com/34774-technetium.html>. Dikunjungi: 2 Januari 2018.
 45. Technetium 99, a pure gamma emitter widely used in nuclear medicine. Tersedia di: http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Technetium_99.htm. Dikunjungi: 2 Januari 2018.
 46. Konya J, Nagy NM. Nuclear and radiochemistry. 1st ed. London: Elsevier; 2012.
 47. Life science. Facts about promethium. Tersedia di: <https://www.livescience.com/38128-promethium.html>. Dikunjungi: 2 Januari 2018.
 48. Isotope data for promethium-142 in the periodic table. Tersedia di: <http://www.periodictable.com/Isotopes/061.142/index.dm.html>. Dikunjungi: 2 Januari 2018.

49. Nagane Y, Hirata M. Production and properties of transuranium elements. *Radiochim Acta*. 2011; 98: 1-17.
50. 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.
51. Andraos J. Names of scientists associated with discoveries of elements of periodic table. Ontario: Department of Chemistry, York University, 2014.
52. Seaborg GT. Transuranium elements: past, present, and future. *Acc. Chem. Res.* 1995; 28: 257-264.
53. Seaborg GT. Nuclear fission and transuranium elements-50 years ago. *Journal of Chemical Education*; May 1989; 66(5): 379-384.
54. Hoffman DC. The transuranium elements: from neptunium and plutonium to element 112. Lawrence Livermore National Laboratory; 1996. Tersedia di: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/017/28017156.pdf. Dikunjungi: 5 Februari 2018.
55. TEMPO.CO. Tiga pendatang baru di tabel periodik unsur. Tersedia di: <https://tekno.tempo.co/read/365399/tiga-pendatang-baru-di-tabel-periodik-unsur>. Dikunjungi: 12 Februari 2018.
56. Wikimedia Commons. File: table isotope en.svg. Tersedia di: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table_isotopes_en.svg. Dikunjungi: 8 Maret 2018.

INDEKS

A

Aberson, Philip 100
akselerator 52, 55, 56-60, 73,
92, 99, 101, 111, 131
akselerator linier 92
aluminium 5, 28, 29, 51, 109
Amaldi, Edoardo 53
americium 51, 100, 123
Anderson, Carl D. 43
Anderson, Herbert 67
anoda 10, 11
Aristoteles 4, 5
Aston, Fancis W. 105, 108
atom 6-10, 15, 18-29, 31-41, 43-46,
48-52, 54-56, 60, 62, 63, 68,
69, 71, 73-75, 82, 85, 89, 90, 93,
95, 97-99, 101, 103-108, 114,
122, 132-138, 140, 143-146
atom H 28, 30, 55, 76
atom target 48-52, 58, 131, 136
atomic mass unit 34
atomos 6

B

barium 64, 66, 82
Becker, Herbert 29
Becquerel, Antoine Henri 37

berkelium 101
berilium 29, 31, 50, 53
Bethe, Hans A. 77
Bohr, Niels Henrik 24-26, 65
bohrium 103
bola atom 23
boron 29, 51, 53, 77, 110, 114
Bothe, Walther 29, 30
Brauner, Bohuslav 95

C

californium 52, 101
Cambridge, Universitas 11, 56
Cavendish, Laboratorium
11, 28, 29, 56
Chadwick, Sir James 29-32, 51
charge concentration 23
Chicago, Universitas 16
Cockcroft, John D. 56, 58
Columbia, Universitas 67
copernicium 103, 104
corpuscular 15
Coryell, Charles D. 95
Coulomb 17, 24, 25, 31, 36,
48, 50, 55, 58, 72-74
curium 101, 123
cyclotron 58, 73, 92

D

Dalton, John 9, 10, 18, 82
data nuklir 32, 106, 137-140, 145
de Chancourtois, Alexandre-
Emile Beguyer 81
deeksitasi 49
Demokritos 4, 6
deret aktinida 88, 89, 101
deret actinium 124
deret lantanida 88
deret peluruhan 89, 98, 123, 124
deret thorium 124
deret uranium 124
deret transaktinida 101
deuterium 47, 73, 76, 109, 110
deuteron 47, 73, 92
Hukum Stokes 16
Dirac, Paul AM. 43
Dobereiner, Johann Wolfgang 81, 82
Darmstadt 102, 104
darmstadtium 103, 104
*Dubna Joint Institute for
Nuclear Research* 101
dubnium 102
Dunning, John R. 67

E

Einstein, Albert 57
eksitasi 45, 46, 49, 93
elektroda 15, 16
elektrolisa 15
elektromagnetik 25, 26, 40, 47, 71
elektrostatik 73
elektron 10, 15, 16-19, 21-29,
32-34, 36, 40-44, 46, 47, 55,
56, 59, 61, 74, 75, 77, 90,
106, 108, 119, 138, 144
elektron Volt, eV 36, 55, 58, 74
elektron orbital 36, 43

elemen 3, 9, 103

Empedokles 5
energi ikat 36, 45, 47, 51, 80
energi kinetik 47, 49, 51, 56,
58, 59, 72-76, 131

F

Fermi, Enrico 53, 54, 59, 67, 99-101
Fermi Lab 59
fermium 101
fisi 52, 63, 64, 66-70, 72, 73, 80,
95, 96, 101, 102, 140, 141
fisika nuklir 7, 32, 38, 47, 56,
91, 104, 105, 146
fluoresens 11
Frisch, Otto Robert 65, 66, 67
fusi nuklir 72, 73, 79

G

gaya inti kuat 71-73
gaya inti lemah 71, 72
gaya listrik 14, 16
garam uranium 37, 38
gaya Lorentz 14
gaya magnet 12-14
gaya sentripetal 13
Geiger, Hans 20-22
generator neutron 52
*Gesellschaft fur
Schwerionenfarschung* 102
Giga elektron Volt, GeV 58
Glendenin, Lawrence E. 95

H

hadiah Nobel 15, 17, 26,
39, 56, 67, 78, 101
Hahn, Otto 64
Halban, Hans von 68
hamburan elastis 49

hamburan inelastis 49
hamburan partikel 20, 21, 23, 24
Harkins, William D. 29, 30
hassium 103
Heisenberg, Werner 32
hidrogen 14, 15, 24, 26, 27, 33, 53,
55, 74, 76-79, 83, 108-110
Hoffman, Darlene C. 102

I

ilmu bahan 3
Institut Kaiser Wilhelm 64
Institut Niels Bohr 65
Institut Teknologi Massachusetts 58
Institute of Physics, IOP 103
International Union of Chemistry 95
inti atom 7, 8, 20, 23, 24, 26-29, 31,
32, 34-45, 47-52, 54-56, 58,
60, 62-66, 68-77, 79, 80, 90-92,
100, 101, 105-107, 110, 116,
118, 119, 131, 136, 144, 145
inti gabungan 48, 49
inti tereksitasi 446
ion 14-16, 61, 96, 105
ion hidrogen 14, 15
Irene Joliot-Curie 50, 60-62
isobar 8, 110, 112, 114, 116, 144
isoton 8, 110, 114, 116, 144
isotop 8, 93, 96, 98, 106-115, 140, 144
IUPAP 103

J

Jean Frederic Joliot 29, 50, 60

K

Kalckar, Fritz 65
kamar kabut Wilson 37
kapasitor 14
katoda 10-12, 15

keradioaktifan 37-39, 62, 117, 145
kerak bumi 5, 110
karbon 31, 53, 77, 78, 79, 109
kondensasi 16, 61
konduktivitas listrik 15
konstanta Boltzmann 75
Kowarski, Lew 68
kuantum 24-26, 71
kulit K 26, 43, 44, 47

L

lanthanum 64, 88
Lavoisier, Antoine 81
Lawrence Berkeley Laboratory 101
lawrencium 88, 101
lembah kestabilan 117, 118, 119-121
lempengan emas 20-23
LINAC 58, 59
lintasan stasioner 25
litium 29, 53, 57, 77, 83, 107, 110

M

Manchester, Universitas 20
Marie Curie 38, 39
Marsden, Ernest 20-22
matahari 5, 23, 24, 37, 75-79, 99, 104
McMillan, Edwin M. 100
magnesium 5, 51, 79
materi canggih 3
medan listrik 12, 14, 16, 40, 56, 105
medan magnet 12-14, 40, 56, 105
Mega elektron Volt, MeV 36, 55
Meitner, Lise 66, 103
Meitnerium 103
meluruh 39, 78, 91, 93, 98,
100, 103, 123, 124
Mendelev, Dmitri Ivanovic
70, 81-86, 90
mendelevium 101

metaloid 90
metastabil 93, 94
meteor 5, 6, 99
mikroskop 16
Millikan, Robert A. 16, 17
model atom 18-24, 26, 27
model tetes cairan 65
moderator 55
molekul 9, 35, 37, 55
molybdenum-98 92
Moseley, Henry G.J. 85
muatan elementer 11, 14-17, 28, 74
Mussolini, Benito 67

N
nature 30, 66
neptunium 100, 123
neutrino 76
neutron 29-36, 39, 41-43,
45, 47, 49, 50, 53-55, 63-70, 72,
73, 92, 97-101, 106-109, 112,
114, 118, 119, 131, 138, 139
neutron cepat 52, 54
neutron termik 54, 64, 65, 138
Newlands, John Alexander Reina 81
Nobel Fisika 15, 32, 39, 67, 101, 104
nobelium 101
Nobel Kimia 63
nomor atom, Z 32, 33, 40, 44,
48, 69, 85, 98, 103, 104,
108, 132, 133, 134, 135
nomor massa, A 33, 34, 64, 71,
81, 95, 98, 108-110, 137
nucleus 23, 49
nukleon 32, 36, 37, 39,
45, 65, 118, 119
nuklida 7, 8, 32, 33, 34, 106-108,
110-122, 124, 131-141, 144-146
nuklida alam 111, 138

nuklida buatan 7, 111, 144
nuklida stabil 111, 112, 117, 138

O

Oak Ridge Laboratory 95
Oak Ridge National Laboratory
(ORNL) 96

P

Palermo, Universitas 91
parafin 30, 31, 54, 55
partikel alfa 20-24, 29, 30, 40, 47, 57
partikel α 47-50, 55, 57-62, 132
partikel elementer 7, 13, 14, 16, 34
partikel netral 28-30
partikel sub atomik 15
pelat deflektor 11, 12
pelat elektroda 16
peluruhan 35-37, 39, 42-44, 46, 52,
62, 70-72, 78, 88, 89, 91-93,
96-98, 102, 116-131, 138, 144
pengaktifan 63, 64, 131
periode panjang 86-88
periode pendek 88, 87
peta nuklida 8, 111-122, 124,
131-134, 136-141, 144-146
Pierre Curie 38, 39
pita kestabilan 117, 1119
Planck, Max 25
plasma 75
plutonium 51, 100, 123
pola peluruhan 117-120, 122
polonium 29, 38, 50
positron 41-43, 61, 62, 76,
78, 96, 118, 131, 144
postulat 25
proton 28-36, 39, 41-43, 45, 47,
56, 58, 60, 62, 65, 72, 73, 85,
90, 106-109, 112, 118-119

Proust, Joseph L. 9
proyektil 35, 36, 47, 48, 49, 50,
51, 55, 57, 59, 60, 131
Perrier, Carlo 91
Promethium 88, 95, 97
Proyek Manhattan 95

R

radiasi 8, 25, 29, 30, 37-42, 45,
47, 48, 57, 61, 63, 64, 72,
77, 110, 117, 138, 145
radiasi gamma 30, 77
radioaktif 8, 20, 29, 35-49, 52, 53, 62-
64, 70-72, 78, 88, 91-97, 99, 100,
103, 110, 111, 116, 138, 144, 145
radioaktivitas 37-39, 60,
62, 63, 101, 145
radioisotop 63, 110
radionuklida 48, 78, 98, 111,
116-124, 138, 140, 141, 144
radionuklida anak 124
radionuklida induk 119, 120, 123
radium 38, 48
reaksi fisi 64, 67-69, 72, 80
reaksi fotonuklir 52
reaksi fusi 71, 72, 74-80
reaksi kimia 7, 9, 10, 35,
36, 69, 82, 90, 106
reaksi tangkapan 51
reaksi termonuklir 74, 76
rekayasa bahan 3
Richter, Harold G. 95
Roentgen, Wilhelm C. 37, 104
Roentgenium 103, 104
Roma, Universitas 53, 67
Rutherford, Ernest 20-30, 47, 48

S

seaborgium 102

Segre, Emilio 53, 91
seng sulfida 57
serapan neutron 138
siklus karbon 77-79
siklus H-H 76
sinar alfa 40, 50-52
sinar Becquerel 38
sinar beta 40, 41, 77, 100, 131
sinar gamma 29, 40, 45, 46, 52
skema peluruhan 126, 128, 130
spektrograf massa 28, 105, 106, 108

T

tabel berkala 33, 34, 90, 91
tabel periodik 8, 45, 70, 82,
83, 84, 86-90, 95, 97, 98,
100-104, 111, 144
tabung Geissler 10
technetium 92, 94
teori atom 10, 18, 23, 25, 26, 82
teori kuantum 24, 25
tereksitasi 45, 46, 49, 93
tetes minyak 16, 17
Thales 4
Thomson, Joseph J. 10, 11,
12, 14, 15, 17-23, 28
transuranium 98, 100, 101, 123
transmutasi inti 7, 35-37, 47-50,
52, 53, 55, 57, 59, 60, 62, 64,
91-93, 98, 99, 101, 102, 106,
123, 131-137, 144-146
triade 82
TRISTAN 59
tritium 47
triton 47

U

Unsur 4-10, 18, 26, 29, 37, 38,
40, 44, 49, 51-54, 60-64,

68-70, 79, 81-104, 106-114,
117, 119, 121-123, 144
unsur super berat 99
unsur tanah jarang 88, 96
unsur transuranium 98,
100, 101, 123
uranium 34, 37, 38, 64-70, 88, 98,
104, 123, 124, 125, 126, 129
uranium-235 68-70

V

Van de Graaff, Robert J. 58

W

waktu geologi 89
waktu paruh 39, 98, 140
Walton, Ernest T.S. 56, 58
Wideroe, Rolf 58

Wilson, Charles T.R. 61

Z

zaman batu 1, 2
zaman besi 2, 3
zaman logam 1
zaman perunggu 2, 3

BIODATA PENULIS



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

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

Mewakili BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standars* (BSS) di Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Vienna (Austria 1994). Ditunjuk BATAN menjadi anggota *Radiation*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Safety Standards Committee (RASSC) di bawah koordinasi IAEA periode 2005-2007. Mengikuti kegiatan Forum for Nuclear Cooperation in Asia (FNCA) on QA/QC radiation dosimetry for radiotherapeutic of cancer di Cina tahun 2006. Sebagai partisipan dalam Technical Meeting to Develop a Draft Text for the Revision of the BSS di IAEA (Austria 2007).

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

Membaca Peta Nuklida

Berbagai upaya telah ditempuh oleh para ilmuwan untuk mengklasifikasikan berbagai jenis atom yang sudah berhasil diidentifikasi pada saat itu. Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) dari Rusia pada 1869 menemukan pola alami tertentu dengan keteraturan yang mendasari perbedaan sifat berbagai jenis atom. Lahirlah Tabel periodik modern yang mampu membedakan berbagai jenis unsur dan menyajikannya ke dalam sebuah tabel yang cukup mudah untuk dipelajari.

Perkembangan penelitian dalam fisika nuklir ternyata memberikan sumbangan yang sangat berarti terhadap pemahaman materi. Jika ilmu kimia mengidentifikasi materi pada level atom, maka fisika nuklir mampu mengidentifikasi materi hingga ke level inti atom. Dari sini para ilmuwan mengetahui bahwa atom-atom sejenis ternyata dapat membentuk isotop dengan struktur inti atom yang berbeda-beda. Karena itu, jika pada 2011 tabel periodik modern menyajikan data 112 unsur kimia, para ilmuwan sebenarnya sudah mengenali adanya sekitar 1440 jenis isotop dari berbagai unsur kimia. Karena itu, diperlukan cara lain untuk menyajikan berbagai jenis unsur beserta isotop-isotopnya dalam satu bentuk sajian yang terpadu, sehingga karakteristik dari unsur-unsur itu dapat dikenali secara lengkap. Untuk keperluan tersebut, para ilmuwan telah menghadirkan cara penyajian data unsur beserta isotop-isotopnya dalam bentuk peta nuklida.

Buku yang ada di tangan pembaca ini membahas tentang peta nuklida dan cara membacanya. Ada banyak informasi yang dapat digali dari peta nuklida, serta banyak manfaat yang dapat diperoleh seseorang dengan membaca peta nuklida. Lingkup bahasanya meliputi pengetahuan dasar mengenai struktur inti atom serta proses-proses fisika yang dapat terjadi di dalamnya. Keduanya diperlukan sebagai pendukung agar seseorang dapat membaca dan memahami sistem penyajian atom beserta isotopnya dalam peta nuklida. Pemahaman yang baik terhadap cara membaca peta nuklida dapat mempermudah seseorang dalam menemukan informasi data mengenai suatu nuklida.

Buku ini tidak diperjualbelikan.