

---

---

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>BAB II PRINSIP DASAR RADIASI .....</b>	<b>3</b>
A. Radiasi.....	3
B. Radiasi Pengion.....	4
C. Sumber Radiasi Pengion.....	4
D. <i>Stopping Power</i> dan <i>LET</i> .....	8
E. Pengertian Iradiasi dan Iradiator.....	9
<b>BAB III INTERAKSI RADIASI DENGAN MATERI.....</b>	<b>11</b>
A. Interaksi Radiasi Partikel Bermuatan dengan Materi .....	11
B. Interaksi Radiasi Partikel Tidak Bermuatan dengan Materi .....	13
C. Interaksi Radiasi Gelombang Elektromagnetik dengan Materi .....	14
<b>BAB IV KIMIA RADIASI.....</b>	<b>17</b>
A. Radiolisis Air .....	18
B. Radiolisis Senyawa Organik dalam Larutan Air .....	20
C. Pengaruh Oksigen Terlarut dalam Larutan Air.....	20
<b>BAB V APLIKASI RADIASI .....</b>	<b>22</b>
A. Aplikasi Radiasi di Bidang Pertanian .....	22
B. Aplikasi Radiasi di Bidang Bahan Kesehatan .....	23
C. Aplikasi Radiasi di Bidang Bahan Industri .....	28
<b>RANGKUMAN.....</b>	<b>31</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>33</b>



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

Fasilitas iradiasi yang terpasang di Batan terdapat di Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR), Pasar Jumat, Jakarta. Fasilitas tersebut adalah iradiator gamma dan mesin berkas elektron. Masing-masing fasilitas iradiasi ini dapat dimanfaatkan untuk aplikasi berbagai proses radiasi seperti polimerisasi, grafting, mutasi tanaman, sterilisasi/pengawetan bahan pangan dan pelapisan permukaan bahan baik dalam skala laboratorium maupun skala pilot. Fasilitas iradiator gamma telah digunakan sejak tahun 1968 sampai saat ini sedangkan mesin berkas elektron mulai dioperasikan pada tahun 1983.

Dengan berkembangnya penelitian aplikasi iradiasi gamma dan berkas elektron oleh para peneliti dilingkungan PAIR maupun di luar PAIR, maka sampai sekarang telah beroperasi 4 iradiator gamma yaitu Gammacell-220, Iradiator panorama serbaguna (IRPASENA), iradiator karet alam (IRKA), iradiator Gamma Chamber 4000-A serta 2 mesin berkas elektron yaitu energi rendah (tipe EPS-300) dan energi medium (tipe GJ-2). Dibandingkan dengan Tiongkok dan India, yang masing-masing memiliki 27 dan 17 iradiator gamma, sampai saat ini, Indonesia hanya mempunyai dua fasilitas iradiator gamma, satu milik BATAN untuk kegiatan riset, dan satu lagi milik PT. Relion Sterilization Services untuk kegiatan komersial yang berlokasi di Cibitung, Jawa Barat.

Untuk memenuhi kebutuhan akan iradiator, BATAN akan membangun fasilitas Iradiator Gamma Merah Putih yang akan dibangun di Puspiptek, Serpong. Iradiator yang diperkirakan akan selesai dibangun pada tahun 2017 dan dapat digunakan pada tahun 2018, merupakan teknologi yang dapat meningkatkan kualitas pangan dan sterilisasi alat kesehatan.

Oleh sebab itu, untuk menjawab tantangan yang ada, maka dibutuhkan petugas iradiator yang memiliki kompetensi yang handal melalui Pelatihan Petugas Iradiator ini. Materi Aplikasi Iradiator merupakan salah satu materi

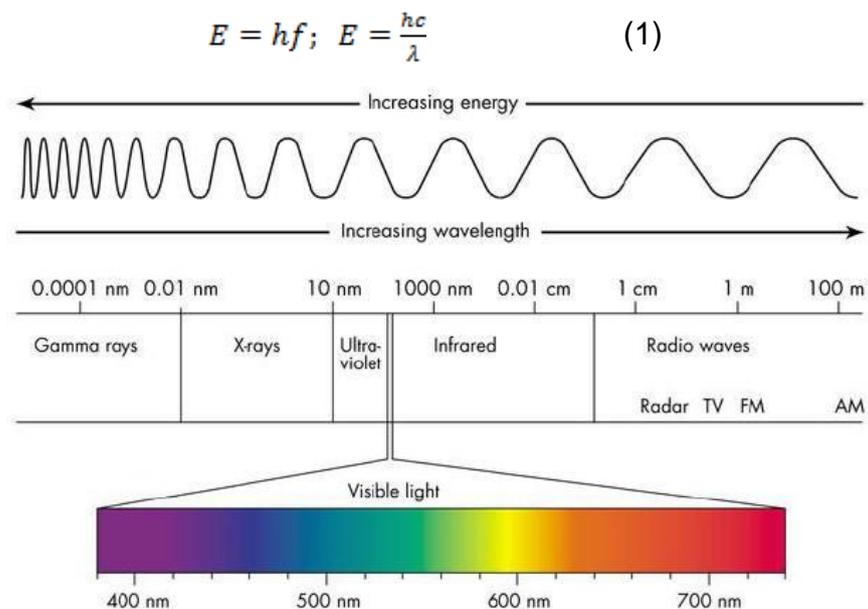
dari Pelatihan Petugas Iradiator Gamma. Manfaat diktat pengajaran Aplikasi Iradiator adalah untuk memperkaya pemahaman peserta Pelatihan Petugas Iradiator Gamma terhadap manfaat aplikasi iradiator yang bermacam-macam. Diktat ini berisi materi Prinsip Dasar Radiasi, Interaksi Radiasi Pengion dengan Materi, Kimia Radiasi dan Aplikasi Radiasi di Bidang Pertanian, Bahan Kesehatan dan Bahan Industri. Tujuan penulisan diktat ini adalah agar peserta pelatihan dapat memahami prinsip dasar radiasi pengion, serta fungsi dan aplikasi iradiator di bidang pertanian, bahan kesehatan dan bahan industri.

## BAB II

### PRINSIP DASAR RADIASI

#### A. Radiasi

Radiasi adalah emisi dan propagasi energi dalam bentuk partikel atau gelombang. Setiap radiasi memiliki panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu yaitu jarak dari suatu puncak gelombang ke puncak gelombang lainnya dimana besarnya nilai panjang gelombang berbanding terbalik dengan besarnya energi yang dimiliki oleh radiasi tersebut seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 1 dan Gambar 1.



Gambar 1. Panjang Gelombang Radiasi

Sumber:

<http://anthonysaba.wikispaces.com/Electromagnetic+Wavelengths+%26+Radiation>  
(Juli 2015)

Berdasarkan panjang gelombangnya, radiasi diklasifikasikan menjadi gelombang radio, gelombang mikro, infra merah, cahaya tampak, ultra violet, sinar-x, sinar gamma, sinar kosmik, partikel alfa, partikel beta dan neutron.

Berdasarkan massanya, radiasi bisa dikelompokkan menjadi radiasi yang tidak memiliki massa (gelombang radio, gelombang mikro, infra merah, cahaya tampak, ultra violet, sinar-x, sinar gamma dan sinar kosmik) serta radiasi yang memiliki massa (alfa, beta, dan neutron).

Berdasarkan muatan listriknya radiasi bisa digolongkan menjadi radiasi non pengion (gelombang radio, gelombang mikro, infra merah, cahaya tampak, ultra violet) dan radiasi pengion (sinar-x, sinar gamma, sinar kosmik, partikel alfa, partikel beta dan neutron).

## **B. Radiasi Pengion**

Radiasi Pengion adalah radiasi yang dapat mengionisasi dan mengeksitasi suatu target. Ionisasi adalah proses pelepasan elektron (umumnya elektron yang terikat paling lemah) dari orbital suatu atom atau molekul netral sehingga menghasilkan ion positif dan elektron bebas. Sedangkan eksitasi adalah proses perpindahan elektron dari tingkat energi (orbital) rendah menuju ke tingkat energi lebih tinggi di dalam suatu atom/molekul netral. Keadaan elektron tereksitasi ini tidak stabil sehingga elektron akan menstabilkan diri dengan cara kembali dari tingkat energi tinggi menuju tingkat energi rendah (*ground state*) dengan mengemisikan cahaya atau terjadi pemutusan ikatan yang terlemah menghasilkan radikal bebas (homolisis).

## **C. Sumber Radiasi Pengion**

Radiasi pengion dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Partikel bermuatan (alfa, beta, **elektron**, dan proton).
2. Partikel tidak bermuatan (neutron).
3. Gelombang elektromagnetik atau foton (**sinar- $\gamma$**  dan **sinar-X**).

Di dalam diktat ini akan dibahas sumber radiasi pengion yang biasa digunakan oleh industri yaitu sinar- $\gamma$ , berkas elektron, dan sinar-X.

**Sinar- $\gamma$ .** Radiasi gamma adalah jenis radiasi elektromagnetik yang diproduksi oleh radioaktif atau proses nuklir atau proses subatomik lainnya seperti penghancuran elektron-positron. Sinar gamma memiliki tingkat energi

tertinggi dari semua radiasi yang diketahui saat ini. Sinar gamma tidak dapat dibelokkan oleh medan magnet dan memiliki daya tembus terkuat. Serupa dengan sinar X, sinar gamma juga bisa melewati berbagai bahan bahkan yang terpadat sekalipun, sehingga dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan. Sumber radiasi gamma yang sering digunakan adalah Co-60 dan Ce-137. Co-60 memiliki dua macam energi yaitu 1,173 MeV dan 1,333 MeV, sedangkan Ce-137 memiliki energi sebesar 0,66 MeV. Salah satu keterbatasan iradiasi gamma dengan menggunakan sumber Co-60 yaitu laju dosis yang rendah, bahkan sangat rendah dibandingkan dengan laju dosis berkas elektron, tetapi memiliki penetrasi yang tinggi dibandingkan dengan berkas elektron sehingga menguntungkan untuk meradiasi bahan-bahan yang tebal dengan volume yang besar dan bentuk yang tidak beraturan. Sebuah fasilitas iradiasi gamma dari Co-60 untuk skala industri diantaranya terdiri dari ruang iradiasi, ruang penyimpanan sumber, sistem pengangkutan dan pengendalian barang, sistem kontrol, sistem pengamanan, sistem perisai dan lain sebagainya. Sumber Co-60 di dalam rak sumber yang biasanya berbentuk segi-empat dinaikkan ke ruang iradiasi selama proses radiasi berlangsung dan diturunkan ke ruang penyimpanan di bawah tanah, biasanya direndam dalam air (sistem basah) untuk memerisai radiasi yang dipancarkan agar pekerja di ruang radiasi dapat bekerja dengan aman.

**Elektron.** Berkas elektron dihasilkan oleh mesin pemercepat elektron dimana elektron berenergi yang dihasilkan oleh sumber elektron yang berupa filamen yang dialiri arus listrik, dipercepat melalui medan elektrostatik atau elektromagnet. Mesin pemercepat elektron skala industri terdiri dari senapan elektron sebagai sumber elektron, tabung pemercepat elektron, sumber tegangan tinggi, sistem pengendali, sistem vakum, sistem optik, jendela (*window*) dan *scanner*. Pemercepat elektron dapat menggunakan sumber daya baik sumber daya *direct current* (DC) maupun sumber daya *radiofrequency* (RF). Berbagai jenis mesin berkas elektron (MBE) ditunjukkan oleh Tabel 1. Klasifikasi MBE berdasarkan tingkat energinya adalah MBE

energi rendah (80 ~ 300 keV), sedang (300 keV- 5 MeV) dan tinggi (5 - 10 MeV). Karakteristik MBE dan aplikasi utamanya ditampilkan oleh Tabel 2.

**Tabel 1. Jenis-jenis Mesin Pemercepat Elektron Industri (Makuuchi, 2012)**

Kategori	Jenis	Selang Energi (Mev)
Pemercepat DC	Cockcroft-Walton	<5
	Shenkel	<5
	<i>Insulating core transformer</i>	<1
	<i>Iron core at ground potential</i>	<1
Pemercepat RF	Dynamitron	5
	<i>Linear accelerator (LINAC)</i>	10
	Rhodotron	10

**Tabel 2. Karakteristik Mesin Pemercepat Elektron berdasarkan Tingkat Energinya (Makuuchi, 2012)**

Jenis	Selang Energi	Ciri-ciri	Aplikasi Utama
Energi rendah	80 – 300 keV	Penetrasi rendah Perisai mudah Ukuran mesin kecil	Pelapisan permukaan Pengikatan silang film tipis
Energi sedang	300 keV- 5 MeV	Penetrasi sedang	Pengikatan silang sebagian plastik
Energi tinggi	5 - 10 MeV	Penetrasi tinggi Perisai berat	Sterilisasi Pengikatan silang dan degradasi polimer

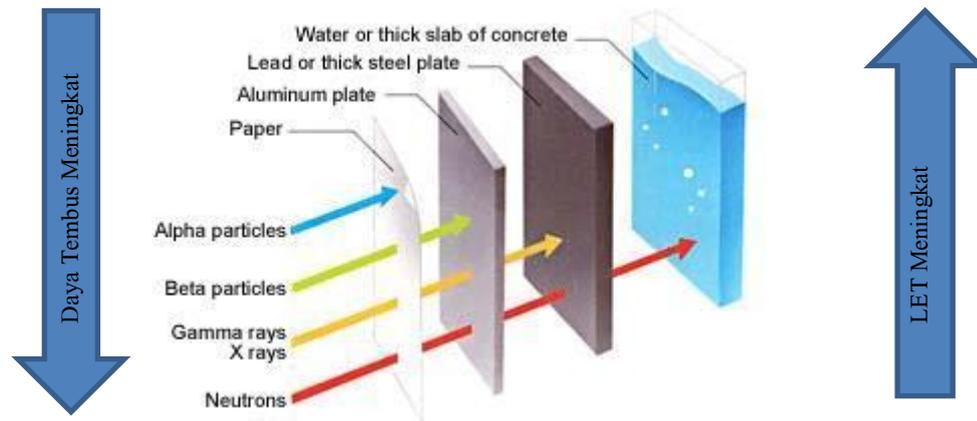
**Sinar-X.** Seperti yang sudah didiskusikan sebelumnya, kelebihan berkas elektron adalah memiliki daya dan laju dosis yang tinggi tetapi memiliki keterbatasan yaitu penetrasi yang rendah dimana hal ini kurang cocok untuk produk-produk yang cukup tebal. Merubah berkas elektron menjadi sinar-X dapat mengatasi persoalan keterbatasan penetrasi berkas elektron ini, bahkan sinar-X mampu menyediakan absorpsi dosis yang lebih seragam. Namun dikarenakan proses konversi dari berkas elektron menjadi sinar-X memiliki efisiensi yang rendah, maka iradiasi dengan sinar-X akan ekonomis secara komersial seiring dengan perkembangan pemercepat elektron yang maju, berenergi tinggi, dengan daya berkas elektron yang tinggi pula. Sinar-X dihasilkan ketika elektron berenergi mengenai material logam. Material logam akan menyerap berkas elektron dan menghasilkan spektrum sinar-X yang lebar dalam bentuk radiasi Bremsstrahlung (foton) yang dipancarkan oleh target. Besarnya Bremsstrahlung ditentukan oleh nomer atom dan ketebalan target serta energi dan arus dari berkas elektron asal (*incident electron*). Semakin tinggi nomer atom target, semakin tinggi intensitas sinar-X. Timbal, tantalum, tungsten, emas dlsb dapat digunakan sebagai material target dimana tantalum lebih direkomendasikan karena memiliki rasio efisiensi terhadap biaya yang tinggi. Semakin tinggi energi berkas elektron awal maka semakin tinggi intensitas sinar-X yang dihasilkan. Foton Bremsstrahlung yang dihasilkan tidak monoenergetik tetapi memiliki distribusi selang energi. Penetrasi sinar-X pada material yang diradiasi menyerupai penetrasi sinar gamma tetapi distribusi dosisnya lebih rumit. Perbandingan teknologi iradiasi gamma, berkas elektron dan sinar-X ditunjukkan oleh Tabel 3.

**Tabel 3. Perbandingan Teknologi Sinar Gamma, Berkas Elektron dan Sinar-X (Makuuchi, 2012)**

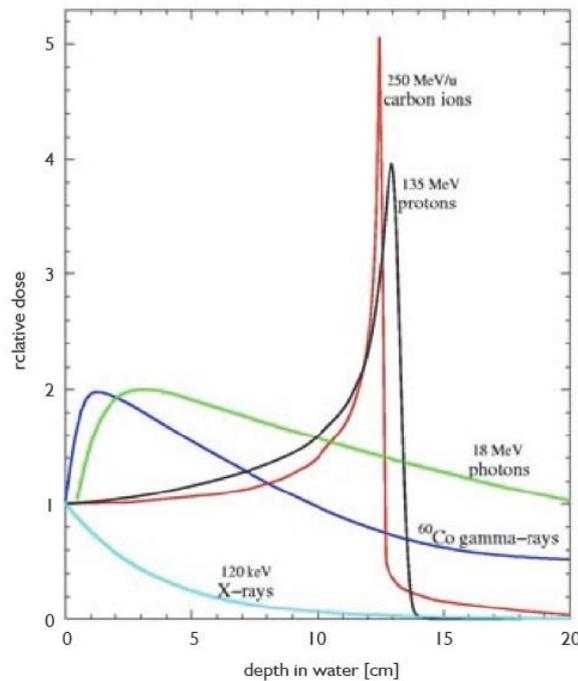
Karakteristik	Sinar gamma	Berkas elektron	Sinar-X
Penetrasi	Kuat, atenuasi eksponensial	Selang terbatas	Kuat, atenuasi eksponensial
Daya	Rendah	Tinggi	Rendah
Biaya operasi	Tinggi	Rendah	Tinggi
Laju dosis	Rendah	Tinggi	Rendah
Sumber daya	Isotop radioaktif	Listrik	Listrik
Peralatan	Operasi dan perawatan mudah	Operasi dan perawatan rumit	Operasi dan perawatan rumit
Perisai	Radiasi yang kontinu membutuhkan perisai yang lebih banyak	Dapat dinyalakan dan dimatikan, kebutuhan perisai lebih sedikit	Dapat dinyalakan dan dimatikan, kebutuhan perisai lebih sedikit
Atenuasi sumber	Atenuasi yang kontinu membutuhkan penambahan sumber yang teratur	Tidak ada atenuasi	Tidak ada atenuasi

#### **D. Stopping Power dan LET**

Radiasi pengion memiliki daya tembus dan *depth dose profile*. Daya tembus radiasi pengion tergantung pada jenis radiasi, energi partikel/foton dan kerapatan target. Banyaknya energi yang hilang per satuan panjang trek partikel dinamakan *stopping power* atau *Linear Energy Transfer* atau LET (keV/ $\mu\text{m}$ ). LET berhubungan dengan daya tembus dari radiasi pengion. Semakin tinggi daya tembus radiasi pengion maka LET-nya semakin kecil.



Gambar 2. Hubungan Daya Tembus dan LET Radiasi Pengion  
 Sumber: [http://www.physics.isu.edu/health-physics/tso/rad\\_training/ussconcepts.html](http://www.physics.isu.edu/health-physics/tso/rad_training/ussconcepts.html) (Juli 2015)



Gambar 3. *Depth dose profile* Radiasi  
 Sumber: <http://www.thetcr.org/article/view/595/html> (Juli, 2015)

### E. Pengertian Iradiasi dan Iradiator

Iradiasi (*Irradiation*) adalah paparan terhadap radiasi pengion (berdaya tembus) sedangkan Iradiator (*Irradiator*) adalah fasilitas untuk melakukan irradiasi.



## BAB III

### INTERAKSI RADIASI PENGION DENGAN MATERI

#### A. Interaksi Radiasi Partikel Bermuatan dengan Materi

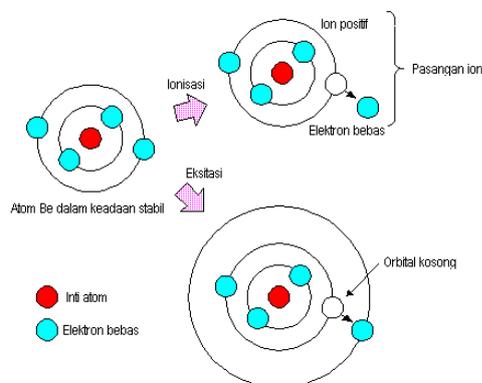
Interaksi radiasi partikel bermuatan ketika mengenai materi adalah proses ionisasi, eksitasi Bremsstrahlung dan reaksi inti.

##### 1. Ionisasi.

Ionisasi adalah peristiwa lepasnya elektron dari orbitnya karena ditarik atau ditolak oleh radiasi partikel bermuatan. Elektron yang lepas menjadi elektron bebas sedang sisa atomnya menjadi ion positif. Setelah melakukan ionisasi energi radiasi akan berkurang sebesar energi ionisasi elektron. Peristiwa ini akan berlangsung terus sampai energi radiasi partikel bermuatan habis terserap. Radiasi alpha yang mempunyai massa maupun muatan lebih besar mempunyai daya ionisasi yang lebih besar daripada radiasi yang lain.

##### 2. Eksitasi.

Proses eksitasi adalah peristiwa “loncatnya” (tidak sampai lepas) elektron dari orbit yang dalam ke orbit yang lebih luar karena gaya tarik atau gaya tolak radiasi partikel bermuatan. Atom yang mengalami eksitasi ini disebut dalam keadaan tereksitasi (*excited state*) dan akan kembali ke keadaan dasar (*ground state*) dengan memancarkan radiasi sinar-X.

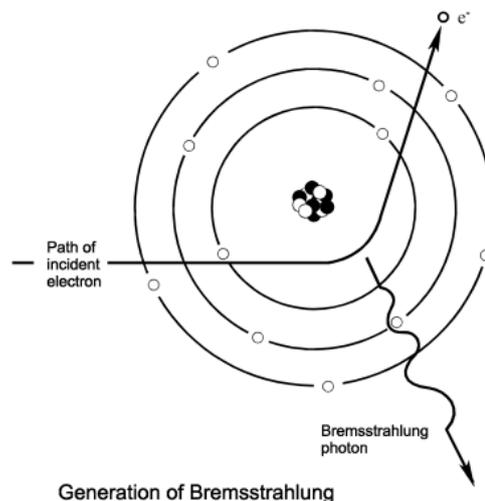


Gambar 4. Reaksi Ionisasi dan Eksitasi

Sumber: <https://www.batan.go.id/ensiklopedi/08/01/02/02/02.gif> (Juli 2015)

### 3. Bremsstrahlung.

Proses Bremsstrahlung adalah peristiwa dibelokkannya atau bahkan dipantulkannya radiasi partikel bermuatan oleh inti atom dari suatu bahan. Ketika radiasi tersebut dibelokkan atau dipantulkan maka akan timbul perubahan momentum sehingga terjadi pemancaran energi berbentuk gelombang elektromagnetik yang disebut sebagai Bremsstrahlung.



Gambar 5. Bremsstrahlung

Sumber: [http://ehs.unc.edu/training/self\\_study/xray/7.shtm](http://ehs.unc.edu/training/self_study/xray/7.shtm) (Juli 2015)

### 4. Reaksi Inti

Dalam peristiwa ini, radiasi partikel bermuatan berhasil “masuk” dan ditangkap oleh inti atom bahan, sehingga inti atom bahan akan berubah, mungkin menjadi inti atom yang tidak stabil. Fenomena ini disebut sebagai proses aktivasi. Akan tetapi ada juga yang hanya sekedar bereaksi tanpa menghasilkan inti yang tidak stabil seperti reaksi partikel alpha bila mengenai bahan Berilium akan menghasilkan unsur Lithium dan radiasi neutron.



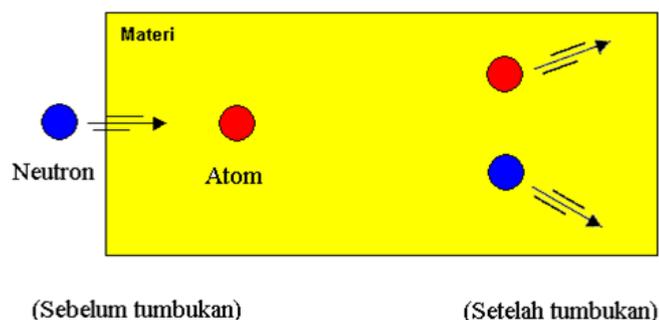
Berbeda dengan tiga peristiwa di atas, peristiwa reaksi inti ini tidak terjadi pada semua jenis materi.

## B. Interaksi Radiasi Partikel Tidak Bermuatan dengan Materi

Radiasi ini merupakan pancaran energi dalam bentuk partikel neutron yang tidak bermuatan listrik dan mempunyai massa 1 sma (satuan massa atom). Radiasi ini lebih banyak dihasilkan bukan oleh inti atom yang tidak stabil (radioisotop) melainkan oleh proses reaksi inti seperti contoh sumber AmBe di atas ataupun reaksi fisi di reaktor nuklir. Karena tidak bermuatan listrik, mekanisme interaksi radiasi neutron lebih dominan secara mekanik, yaitu peristiwa tumbukan baik secara elastik maupun tidak elastik. Sebagaimana radiasi partikel bermuatan, radiasi neutron juga mempunyai potensi melakukan reaksi inti.

### 1. Tumbukan elastik

Tumbukan elastik adalah tumbukan di mana total energi kinetik partikel-partikel sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah. Dalam tumbukan elastik antara neutron dan atom bahan penyerap, sebagian energi neutron diberikan ke inti atom yang ditumbuknya sehingga atom tersebut terpental sedangkan neutronnya dibelokkan/dihamburkan. Tumbukan elastik terjadi bila atom yang ditumbuk neutron mempunyai massa yang sama, atau hampir sama dengan massa neutron (misalnya atom Hidrogen), sehingga fraksi energi neutron yang terserap oleh atom tersebut cukup besar.



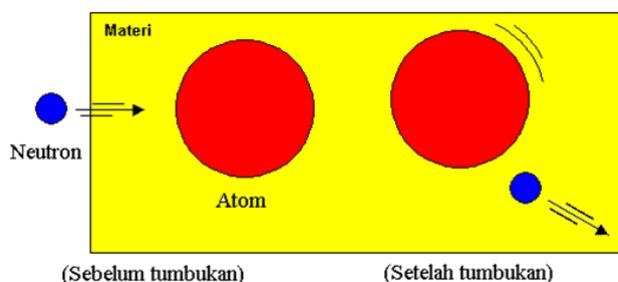
Gambar 6. Tumbukan Elastik Neutron

Sumber: <http://kreatif-sains-madina.blogspot.com/2010/09/radiasi-partikel-tak-bermuatan-neutron.html> (Juli 2015)

### 2. Tumbukan Tidak Elastik

Proses tumbukan tak elastik sebenarnya sama saja dengan tumbukan elastik, tetapi energi kinetik sebelum dan sesudah tumbukan berbeda. Ini terjadi bila

massa atom yang ditumbuk neutron jauh lebih besar dari massa neutron. Setelah tumbukan, atom tersebut tidak terpental, hanya bergetar, sedang neutronnya terhamburkan. Dalam peristiwa ini, energi neutron yang diberikan ke atom yang ditumbuknya tidak terlalu besar sehingga setelah tumbukan, energi neutron tidak banyak berkurang. Oleh karena itu, bahan yang mengandung atom-atom dengan nomor atom besar tidak efektif sebagai penahan radiasi neutron.



Gambar 7. Tumbukan Non Elastik

Sumber: <http://kreatif-sains-madina.blogspot.com/2010/09/radiasi-partikel-tak-bermuatan-neutron.html> (Juli 2015)

### 3. Reaksi Inti

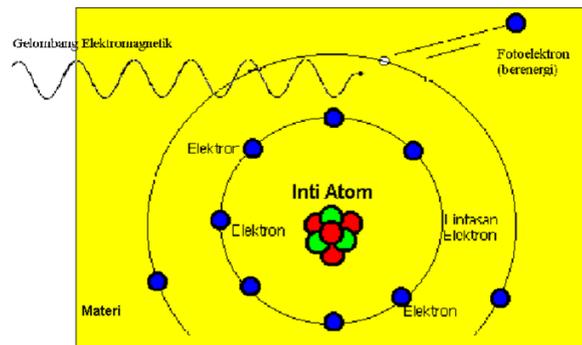
Bila energi neutron sudah sangat rendah atau sering disebut sebagai neutron termal ( $E_n < 0,025$  eV), maka kemungkinan neutron tersebut “ditangkap” oleh inti atom bahan penyerap akan dominan sehingga membentuk inti atom baru, yang biasanya merupakan inti atom yang tidak stabil. Peristiwa ini yang disebut sebagai proses aktivasi neutron, yaitu mengubah bahan yang stabil menjadi bahan radioaktif. Peristiwa aktivasi neutron ini juga dapat disebabkan oleh neutron cepat meskipun dengan probabilitas kejadian yang lebih rendah.

#### C. Interaksi Radiasi Gelombang Elektromagnetik dengan Materi

Interaksi radiasi gelombang elektromagnetik ketika mengenai materi lebih menunjukkan sifat dualisme gelombang partikel yaitu efek foto listrik, efek Compton, dan produksi pasangan.

##### 1. Efek Fotolistrik

Dalam peristiwa efek foto listrik, foton yang mengenai materi akan diserap sepenuhnya dan salah satu elektron orbital akan dipancarkan dengan energi kinetik yang hampir sama dengan energi foton yang mengenainya.

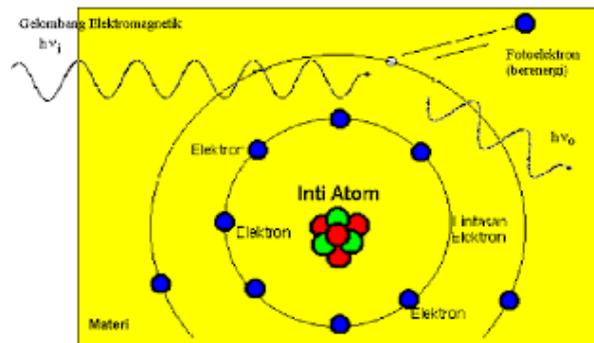


Gambar 8. Efek Fotolistrik

Sumber: <http://kreatif-sains-madina.blogspot.com/2010/09/interaksi-radiasi-gelombang.html>  
(Juli 2015)

## 2. Efek Compton

Peristiwa efek Compton sangat menyerupai efek foto listrik kecuali energi foton yang mengenai materi tidak diserap sepenuhnya sehingga masih ada sisa energi foton yang dipantulkan atau dibelokkan.

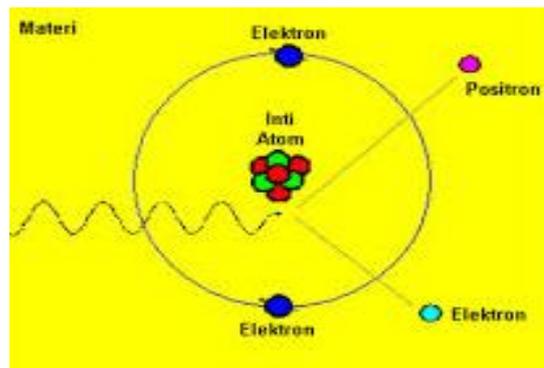


Gambar 9. Efek Compton

Sumber: <http://kreatif-sains-madina.blogspot.com/2010/09/interaksi-radiasi-gelombang.html>  
(Juli 2015)

## 3. Produksi Pasangan

Peristiwa ini menunjukkan kesetaraan antara massa dengan energi sebagaimana diperkenalkan pertama kali oleh Einstein. Bila sebuah foton yang mengenai materi berhasil “masuk” sampai ke daerah medan inti (*nuclear field*) dan mempunyai energi lebih besar dari 1,022 MeV maka foton tersebut akan diserap habis dan akan dipancarkan pasangan elektron – positron. Positron adalah anti partikel dari elektron, yang mempunyai karakteristik sama dengan elektron tetapi bermuatan positif.



Gambar 10. Efek Produksi Pasangan

Sumber: <http://kreatif-sains-madina.blogspot.com/2010/09/interaksi-radiasi-gelombang.html>  
(Juli 2015)

## BAB IV

### KIMIA RADIASI

Kimia radiasi adalah proses kimia yang diinisiasi oleh interaksi foton berenergi tinggi dan partikel-partikel atomik yang disebut dengan radiasi pengion, dengan materi. Sumber yang biasa digunakan sebagai radiasi pengion adalah sinar- $\gamma$  dari Cobalt-60 dimana fotonnya memiliki energi sebesar 1,17 dan 1,33 MeV ( $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ) atau elektron cepat yang berasal dari sebuah aselerator yang memiliki kisaran energi sebesar 2 - 20 MeV. Dosis radiasi yang diabsorpsi oleh material dinyatakan dalam grays ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ) dan laju dosis radiasi dinyatakan dengan Gy/det. Dalam setiap kasus, hasil dari interaksi partikel berenergi tinggi dengan molekul adalah sebuah elektron yang terlempar, yang disebut dengan elektron sekunder, yang memiliki energi yang cukup untuk menyebabkan proses ionisasi selanjutnya, tetapi dapat mencapai kesetimbangan termal di dalam larutan dengan cepat ( $< 10^{-12}$  detik) dan selanjutnya terjebak di dalamnya yang disebut sebagai elektron terlarut atau solvated electron ( $e_s^-$ ). Dengan cara inilah molekul yang stabil (M) dirubah menjadi elektron terlarut dan radikal bebas yang sangat reaktif ( $M^{\bullet+}$ ):



Karakteristik atau sifat yang penting dari radiasi pengion yaitu tidak dapat diabsorpsi secara selektif sehingga molekul-molekul diionisasi berdasarkan kelimpahan relatifnya di dalam media. Sebagai contoh, di dalam larutan yang sangat encer ( $[\text{material terlarut}] \leq 0,1 \text{ mol/dm}^3$ ) molekul yang terionisasi (M) yang sangat penting adalah pelarutnya (solvent) sehingga pengetahuan kimia radiasi dari pelarut adalah faktor yang sangat penting untuk memahami proses kimia yang diinisiasi oleh radiasi pengion. Bagaimanapun laju energi yang hilang dari sebuah partikel aktif ketika melalui suatu larutan tidak seragam; dimana laju energi yang hilang akan naik seiring dengan turunnya energi kinetik partikel. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, laju energi

yang hilang per satuan panjang jalur yang dilalui partikel dikenal sebagai *stopping power* atau *linear energy transfer (LET)*. Ketika partikel pengionnya adalah elektron berenergi tinggi, proses ionisasi terjadi di dalam klaster yang kecil yang disebut sebagai *spurs* yang terpisah-pisah cukup luas sepanjang jalur, dan radiasinya diklasifikasikan sebagai *low LET*. Untuk inti ion-ion yang aktif (*energetic nuclear ions*) seperti  $H^+$ ,  $He^{2+}$ ,  $Li^+$  dlsb, laju kecepatan energi yang hilang lebih besar sehingga *spurs* menjadi sangat berdekatan dan dapat saling tumpang tindih membentuk kolom silindris dari molekul yang terionisasi di dalam larutan. Dalam kasus ini, radiasi diklasifikasikan sebagai *high LET*. Pada kasus sinar- $\gamma$  dari Cobalt-60, sebagian besar elektron sekundernyalah yang menyebabkan proses ionisasi, tetapi karena foton- $\gamma$  tidak bermuatan, menjadikannya lebih penetratif dibandingkan elektron yang memiliki energi yang sama.

### A. Radiolisis Air

Konsep tentang *spurs* dikembangkan pada saat awal studi tentang radiolisis air. Pengetahuan terkini radiolisis air dapat dirangkum berdasarkan reaksi-reaksi sebagai berikut (waktu dimana setiap kejadian diperkirakan berlangsung dengan sempurna juga ditunjukkan):

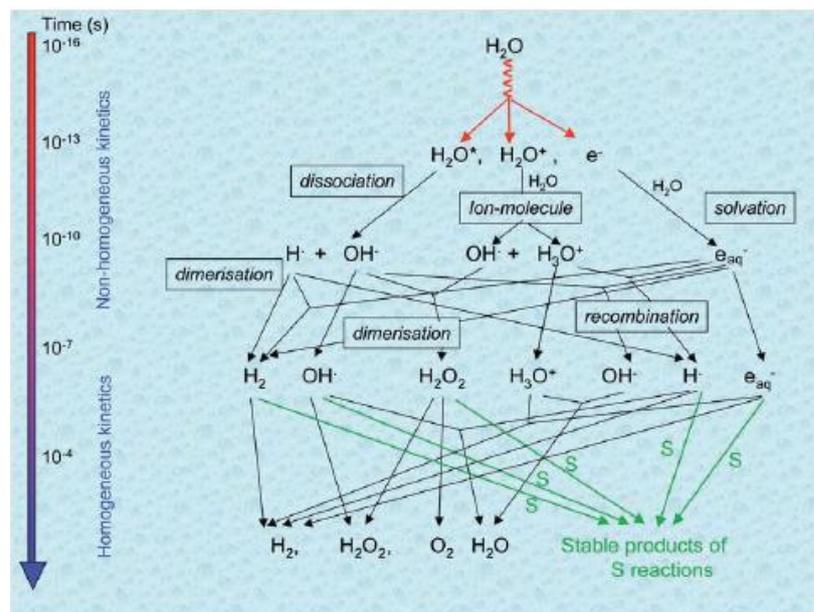


Reaksi (2) menunjukkan proses ionisasi dan eksitasi elektronik dari molekul air; hal ini terjadi pada skala waktu transisi elektronik. Ion radikal positif  $H_2O^{*+}$  diyakini berubah menjadi ion molekul seperti reaksi (3) dalam waktu  $\sim 10^{-14}$  detik. Keadaan  $H_2O^*$  yang tereksitasi secara elektronik diketahui terdisosiasi dalam fasa uap dalam reaksi (4), dan elektron yang terilis dalam reaksi (1) diketahui terlarut pada  $\sim 10^{-12}$  detik. Pada waktu ini, untuk radiasi low LET seperti sinar- $\gamma$  dari Cobalt-60 dan elektron cepat dari sebuah akselerator, produk-produk dari reaksi 3 – 5 berkelompok bersama dalam *spurs* yang kecil yang terpisah secara luas, yang rata-rata mengandung 2 sampai 3 pasangan

ion. Selanjutnya produk-produk ini mulai berdifusi secara acak dimana hasilnya, suatu fraksi dari mereka saling bertemu dan bereaksi membentuk produk-produk molekular dan radikal sekunder, sementara sisanya pergi ke bagian besar cairan dan reaksinya dengan solut yang bertindak sebagai radical scavenger terdistribusi dengan homogen secara efektif. Proses-proses spurs dari reaksi dan difusi ini selesai dalam waktu  $10^{-7}$  detik, dimana waktu radiolisis air untuk radiasi low LET (mis:  $0,23 \text{ eV/nm}^{-1}$ ) dapat ditunjukkan sebagai reaksi (6) dan Gambar 2.

$\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{radiasi}} 0,28e_{\text{aq}}^-, 0,062\text{H}^{\cdot}, 0,28\text{OH}^{\cdot}, 0,047\text{H}_2, 0,073\text{H}_2\text{O}_2, 0,28\text{H}_3\text{O}^+$  (6)

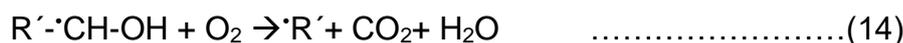
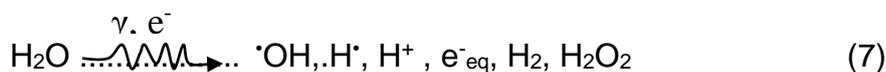
Bilangan-bilangan yang dinyatakan di atas adalah hasil proses kimia radiasi (dikenal sebagai *G values*) dalam satuan  $\mu\text{mol/J}$ . Pada literatur-literatur terdahulu dan bahkan sebagian saat ini, *G values* ditulis sebagai molekul/100 eV, atau hanya sebagai bilangan dimana satuan molekul/100 eV diartikan. Faktor konversinya adalah:  $1 \text{ molekul/100 eV} = 1,036 \times 10^{-7} \text{ mol/J}$  (atau  $0,1036 \mu\text{mol/J}$ ).



Gambar 11. Skema reaksi-reaksi dari spesi-spesi sementara yang dihasilkan oleh iradiasi dalam air, tanpa atau dengan sebuah solut (S) yang sangat encer yang berperan sebagai sebuah *radical scavenger* (Proses-proses reaksi (2) dinyatakan dengan warna merah), Buxton, 2012

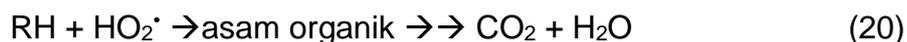
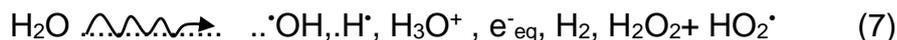
### B. Radiolisis Senyawa Organik dalam Larutan Air

Kompleksitas molekul organik lebih besar dibandingkan dengan H<sub>2</sub>O sehingga produk yang dihasilkan dari reaksi-reaksi yang menyertai proses ionisasi yang terjadi pada reaksi (1) menjadi lebih beragam.



### C. Pengaruh Oksigen Terlarut dalam Larutan Air

Di dalam air, oksigen terlarut bereaksi dengan radikal hidrogen H<sup>·</sup>, e<sup>-</sup><sub>eq</sub> dan H<sup>+</sup> membentuk radikal peroksid (HO<sub>2</sub><sup>·</sup>) yang akan berfungsi sebagai spesi oksidator tambahan. Selanjutnya spesi ini bisa bereaksi molekul lain misalnya dengan polutan organik yang menyebabkan meningkatkan proses degradasi polutan.





## **BAB V**

### **APLIKASI RADIASI**

#### **A. Aplikasi Radiasi di Bidang Pertanian**

##### **1. Pemuliaan Tanaman**

Di bidang pertanian, untuk mendapatkan varietas unggul baru, teknik yang digunakan adalah pemuliaan tanaman dengan teknik mutasi radiasi. Secara singkat prosesnya adalah benih induk disinari dengan radiasi gamma Cobalt-60 dengan dosis 0,20 kilogray (satuan radiasi yang aman untuk bahan makanan). Radiasi mampu menembus biji tanaman sampai ke lapisan kromosom. Struktur kromosom pada biji tanaman dapat dipengaruhi dengan sinar radiasi ini. Perubahan struktur karena radiasi dapat berakibat pada perubahan sifat tanaman dan keturunannya. Fenomena ini digunakan untuk memperbaiki sifat tanaman agar mendapatkan biji tanaman dengan keunggulan tertentu, misalnya tahan hama, tahan kekeringan, dan cepat panen. Tanaman yang diradiasi bersifat aman sepenuhnya, tidak ada unsur radioaktif yang tertinggal.

##### **2. Pengawetan Bahan Pangan**

Iradiasi merupakan suatu proses fisika yang dapat digunakan untuk mengawetkan dan meningkatkan keamanan bahan pangan. Energi yang dihasilkan oleh sumber radiasi dapat dimanfaatkan untuk tujuan menghambat pertunasan dan pematangan serta membasmi serangga (dosis rendah) dan membunuh mikroba patogen (dosis sedang), serta membunuh seluruh jenis bakteri yang ada (dosis tinggi), sehingga mutu bahan pangan dapat tetap dipertahankan di dalam kemasan yang baik selama penyimpanan. Sumber radiasi yang dapat digunakan untuk proses pengawetan bahan pangan terdiri dari 4 macam, yaitu: Co-60, Cs-137, masing-masing menghasilkan sinar gamma, mesin berkas elektron dan mesin generator sinar-X. Dengan menggunakan pembatas dosis iradiasi dan batas maksimum energi dari keempat sumber tersebut, maka bahan pangan yang diawetkan dengan

iradiasi tidak menjadi radioaktif. Uji keamanan makanan iradiasi untuk konsumsi manusia dikenal dengan istilah wholesomeness test, mencakup uji toksikologi, makro dan mikro nutrisi serta uji mikrobiologi dan sensorik. Dalam teknologi iradiasi, terjadinya interaksi antara radiasi dengan materi/sel hidup dapat menimbulkan berbagai proses fisika dan kimia di dalam materi tersebut, yang diantaranya dapat menghambat sintesa DNA dalam sel hidup, misalnya mikroba. Proses ini yang selanjutnya dimanfaatkan untuk berbagai tujuan, yaitu menunda pematangan, membunuh serangga dan mikroba.

### **3. Pengendalian Hama Serangga**

Di seluruh dunia, hilangnya hasil panen akibat serangan hama serangga kurang lebih 25-35%. Untuk memberantas hama serangga sejak lama para petani menggunakan insektisida kimia. Akhir-akhir ini insektisida kimia dirasakan menurun keefektifannya, karena munculnya serangga yang kebal terhadap insektisida. Selain itu insektisida juga mulai dikurangi penggunaannya karena insektisida meninggalkan residu yang beracun pada tanaman. Salah satu metode yang mulai banyak digunakan untuk menggantikan insektisida dalam mengendalikan hama adalah teknik serangga mandul. Teknik serangga mandul dilakukan dengan mengiradiasi serangga menggunakan radiasi gamma untuk memandulkannya. Serangga jantan mandul tersebut kemudian dilepas dalam jumlah besar pada daerah yang diserang hama. Apabila mereka kawin dengan serangga betina, maka tidak akan dihasilkan keturunan. Dengan melepaskan serangga jantan mandul secara berulang, populasi hama serangga akan turun secara menyolok. Teknik ini telah digunakan secara intensif di banyak negara penghasil pertanian seperti Amerika Selatan, Mexico, Jamaika dan Libya.

## **B. Aplikasi Radiasi di Bidang Bahan Kesehatan**

### **1. Sterilisasi Bahan Kesehatan**

Radiasi sinar gamma dari iradiator digunakan untuk mensterilkan beberapa alat dan produk kesehatan seperti jarum suntik, sarung tangan bedah, kateter, dan hemodialiser atau alat pencuci darah. energi radiasi yang tinggi dapat membunuh mikroba seperti bakteri, jamur (kapang), atau virus.

Keunggulan-keunggulan sterilisasi dengan radiasi di antaranya yaitu tidak merusak bahan yang disterilkan, lebih efektif karena dapat mencapai 100% steril pada dosis tinggi, dapat mesterilkan bahan dalam jumlah banyak untuk sekali proses radiasi serta ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah. Teknik sterilisasi dengan sinar gamma ikut dimanfaatkan pada distribusi jaringan biologik untuk keperluan klinik. sebelum dipakai, jaringan yang diawetkan atau yang masih segar memang harus disterilkan untuk membunuh segala jenis kuman dan virus yang dapat memindahkan penyakit. Dengan mengatur dosis sterilisasi radiasi, semua jenis kandungan mikroba dan beberapa jenis virus tertentu yang mengkontaminasi jaringan dapat dieliminir.

## **2. Bank Jaringan dan Pengembangan Biomaterial**

Pengertian Bank Jaringan sendiri yaitu suatu organisasi yang berupaya untuk mengumpulkan, memproses, menyediakan, menyimpan, dan mendistribusikan jaringan biologi untuk kebutuhan klinik. Jaringan biologi tersebut berasal dari jaringan yang didermakan oleh donor sehat, bebas dari berbagai penyakit menular dan diproses sebagai bahan biomaterial alami yang dapat digunakan dengan aman. Dinamakan Bank jaringan karena jaringan selalu tersedia kalau diperlukan. Bank jaringan bertanggung jawab atas keamanan jaringan tersebut sampai kepada pemakai. Bank Jaringan riset BATAN adalah bank jaringan pertama di Indonesia. Fungsinya untuk meneliti dan mengembangkan teknologi pengawetan jaringan biologi yang disterilkan dengan radiasi gamma atau partikel elektron, yang aman dan berkualitas tinggi, untuk dapat diimplantasikan pada pasien yang sangat membutuhkan. Untuk mendapatkan produk yang aman, Bank Jaringan berupaya untuk mengendalikan pemilihan bahan baku yang sesuai dan pemrosesan jaringan berdasarkan pada prinsip Cara Pembuatan Obat yang Baik (CPOB) dari Badan Pengawasan Obat dan Makanan. Keuntungan pencangkokan jaringan dari Bank Jaringan sendiri antara lain dapat menghindarkan pasien dari ketidaknormalan struktur tubuh serta dapat menurunkan biaya masuk rumah sakit. Pengambilan dan pemakaian kembali

jaringan biologi tersebut diizinkan di Indonesia berdasarkan Undang-Undang Nomor 23 tahun 1992 tentang kesehatan. Laboratorium Bank Jaringan BATAN juga telah terakreditasi oleh Komisi Nasional Akreditasi Pranata Penelitian dan Pengembangan (KNAPP) pada 2008. Penelitian pengawetan jaringan biologi di Indonesia sendiri telah dimulai sejak tahun 1986, yaitu dengan penelitian pengawetan jaringan amnion atau selaput plasenta bayi yang diproses secara liofilisasi dan disterilkan dengan cara radiasi supaya bebas dari kuman. Produk tersebut selanjutnya disebut dengan Amnion Liofilisasi Steril-radiasi (ALS). Amnion segar yang mengandung kolagen dan beberapa hormon dan ini dapat digunakan untuk penutup luka seperti luka bakar, gangrene dan sunat, penutup luka pada penderita kusta serta pada penderita diabetes. Selanjutnya amnion steril dipakai pula untuk operasi mata sejak 1997 hingga masalah perbaikan gusi yang menghitam karena pengaruh obat, rokok atau keturunan. Amnion juga bisa untuk masalah gigi. Dulu gigi yang bermasalah biasanya langsung dicabut padahal sebetulnya masih bisa dipertahankan. Dengan diberi amnion maka pasien siap untuk implant gigi palsu. Agar jaringan biologi dapat disimpan dalam waktu lama, Bank Jaringan Riset BATAN memiliki beberapa cara proses pengawetan yaitu liofilisasi berupa proses pengeringan dari bahan biologi dengan cara sublimasi. Bahan biologi dibekukan dan dikeringkan tanpa melalui fase cair. Dengan jalan ini, jaringan biologi yang dikeringkan tidak mengalami perubahan kimia dan fisika. Kemudian ada proses pembekuan pada suhu  $-80^{\circ}\text{C}$ . Ini dilakukan untuk menjaga keamanan dan jaringan autograf agar tetap awet sebelum diproses. Tujuan lainnya untuk menyimpan jaringan autograf untuk dipakai kembali oleh pasien yang sama di kemudian hari. Jaringan bisa dipakai dengan cara ini sebelum lima tahun. Untuk menjaga kualitas dan sterilisasi jaringan maka kemasan yang rusak atau sisa pemakaian tidak boleh digunakan lagi. Untuk menjaga agar steril, jaringan biologi juga disterilkan dengan cara radiasi memakai sinar gamma atau partikel elektron. Sterilisasi radiasi sangat cocok untuk jaringan biologi karena prosesnya dingin sehingga tidak mengubah struktur jaringan, tidak meninggalkan residu beracun, sangat

ampuh membunuh mikroorganisme dan juga virus sampai batas tertentu. Biomaterial atau *biomedical material* dapat didefinisikan secara umum sebagai suatu material baik natural maupun buatan manusia (sintetis) yang digunakan sebagai peralatan medis (*medical devices*) dan berinteraksi dengan sistem biologis dengan tujuan untuk memperbaiki (*repair*), memulihkan (*restore*), mengoreksi ketidaknormalan, meningkatkan fungsi atau mengganti (*replace*) bagian tubuh yang mengalami kehilangan fungsi karena suatu penyakit atau trauma, atau sebagai *interface* dengan lingkungan fisiologis. Adanya interaksi dengan sistem biologis mengharuskan setiap bahan biomaterial memiliki sifat biokompatibilitas yaitu kemampuan suatu material untuk bekerja selaras dengan tubuh tanpa menimbulkan efek lain yang berbahaya. Di Indonesia, kebutuhan akan biomaterial (allograft, xenograft, pembalut luka) dalam bidang medis untuk berbagai keperluan terus meningkat dewasa ini. Hal ini antara lain disebabkan oleh meningkatnya berbagai kasus penyakit seperti penyakit kanker tulang, penyakit periodontal (periodontitis, gingivitis dll), trauma pada mata, patah tulang, dan lain-lain yang memerlukan adanya graft tulang. Selain itu berbagai bencana alam, kecelakaan kerja serta meningkatnya kasus ledakan bom menimbulkan luka bakar yang serius pada korban, memerlukan penanganan yang komprehensif serta memerlukan pembalut luka dalam jumlah cukup. Saat ini produk biomaterial yang digunakan di Indonesia sebagian besar merupakan produk impor dengan harga yang sangat mahal. Penelitian dan pengembangan bahan biomaterial untuk keperluan klinis menggunakan teknik radiasi gamma yang berasal dari radioisotop Cobalt-60 dan radiasi berkas elektron. Beberapa bahan biomaterial seperti allograft dan xenograft steril iradiasi telah dimanfaatkan sebagai tulang pengisi (*bone filler*) pada kasus-kasus defek tulang di bidang periodontal dan sebagai implan ocular untuk pengganti kerusakan bola mata. Hidrogel hasil sintesis dari polimer hidrofilik berbasis PVP dengan iradiasi gamma telah dikembangkan sebagai pembalut luka dan plester penurun demam. Membran selulosa biodegradable/bioresorbable hasil iradiasi juga telah dikembangkan untuk digunakan di bidang periodontal

seperti *membran guided bone regeneration (GBR)* dan *guided tissue regeneration (GTR)*; dan rekayasa jaringan (*tissue engineering*).

### **3. Pengendalian Penyakit**

Penyakit Demam Berdarah Dengue (DBD) hingga kini masih terus menghantui masyarakat. Penyakit tersebut ditularkan dari orang yang sakit ke orang sehat umumnya melalui gigitan nyamuk *Aedes Aegypti* sebagai vektor pembawa. Sampai saat ini belum ditemukan obat atau vaksin untuk penyakit akibat infeksi virus Dengue. Nyamuk itu juga dapat berperan sebagai vektor untuk penyakit Chikungunya. Nyamuk *Aedes Aegypti* hidup terisolir pada ruang yang gelap dan lembab, menyukai air bersih, jernih dan tidak terusik. produksi telurnya cukup tinggi yaitu berkisar 200-400 butir/ekor betina. Jumlah kasus DBD atau Chikungunya sendiri tidak berbanding lurus dengan jumlah nyamuk yang ditemukan di suatu lokasi. Jumlah kasus penyakit lebih disebabkan oleh perilaku menghisap darah dari nyamuk betina. Untuk mematangkan telur-telurnya, nyamuk betina akan menghisap darah orang secara berulang atau berganti-ganti ke orang lain sampai darah yang dibutuhkannya mencukupi. Karena belum ada obatnya untuk membunuh virus dengue dan vaksin antidengue maka satu-satunya cara untuk melawan serangan virus dengue adalah memutus mata rantai penularan penyakit yaitu membasmi nyamuk. Cara konvensional adalah memakai insektisida tapi kelemahannya yaitu mematikan hewan non-target, timbulnya resistensi vektor dan pencemaran lingkungan. BATAN memanfaatkan iradiator yang dimiliki untuk pengembangan teknik serangga Mandul (TSM) yang mampu menurunkan jumlah populasi nyamuk penyebar penyakit. Teknik ini dilakukan misalnya di sejumlah kawasan di Banjarnegara, Bangka Barat, salatiga dan semarang. sebelumnya telah dilakukan metode percobaan pemeliharaan nyamuk secara massal di laboratorium Hama dan Penyakit milik BATAN. Di luar negeri, konsep TSM secara eksperimen telah dibuktikan melalui keberhasilan program eradikasi lalat ternak di Amerika serikat pada tahun 1958-1959. menghabiskan biaya sebesar Us\$10 juta, cara tersebut mampu menghemat biaya pengendalian sebesar Us\$140 juta. Saat ini negara lain

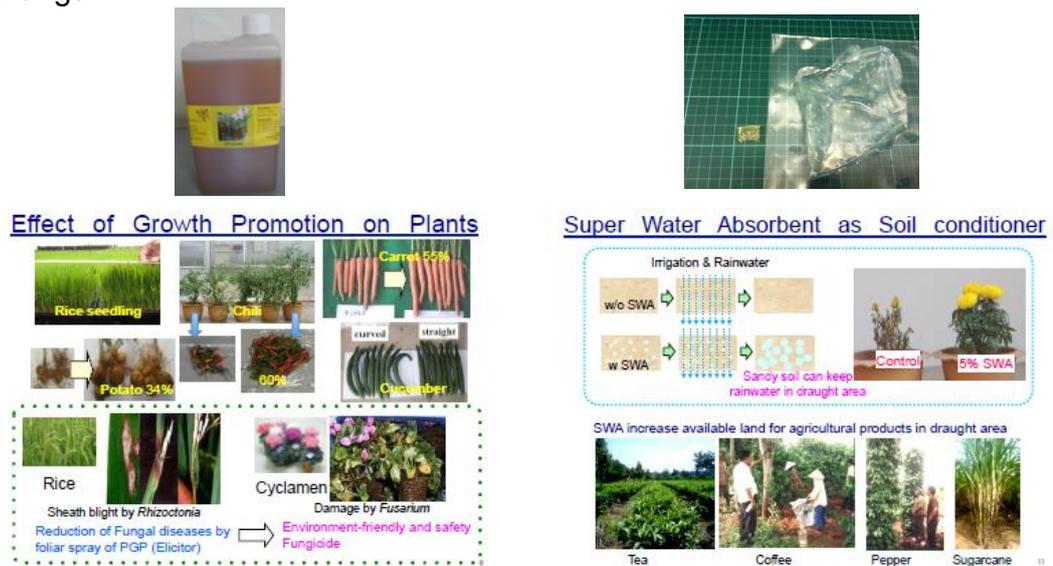
yang telah memakai TSM untuk pengendalian nyamuk adalah Itali. Dosis iradiasi gamma dipakai untuk memandulkan nyamuk *Aedes Aegypti* jantan. Nyamuk mandul itu kemudian dilepas ke lapangan atau ke rumah-rumah untuk kawin dengan nyamuk betina. Lama-kelamaan populasi nyamuk pun berkurang. Usia hidup nyamuk jantan yang belum kawin sendiri diperkirakan antara 1-1,5 bulan dan setelah kawin akan mati, sementara nyamuk betina bertahan sampai dua bulan dan setelah bertelur akan mati. TSM pada pengendalian nyamuk vektor DBD menjadi cara pengendalian yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan pencemaran, pelaksanaannya mudah dan biayanya juga terjangkau. Teknik ini juga disebut sebagai pengendalian *specific species* yaitu membunuh vektor dengan vektor itu sendiri.

## **C. Aplikasi Radiasi di Bidang Industri**

### **1. Modifikasi Polimer**

Radiasi pada polimer dapat menginisiasi terbentuknya radikal bebas. Radikal bebas ini dapat menyebabkan terjadinya pembentukan ikatan silang (*crosslinking*) dan degradasi (*degradation*) polimer atau dapat pula membentuk kopolimerisasi (*grafting*) tergantung dari jenis polimernya. Perubahan kimia dan fisika yang terjadi dapat diamati dengan adanya perubahan warna, pembentukan gas, berkurangnya ikatan tidak jenuh serta terbentuknya ikatan tak jenuh yang baru. Reaksi *crosslinking* merupakan proses kimia yang menghubungkan rantai polimer yang satu dengan yang lainnya melalui ikatan kovalen maupun ionik sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi. Pada reaksi kimia biasa, senyawa yang termasuk reagen *crosslinking* adalah molekul yang memiliki dua atau lebih sisi reaktif untuk menyerang gugus fungsi spesifik dan molekul lain. Sedangkan *radiation crosslinking*, adalah ikatan silang yang terjadi yang diakibatkan oleh adanya perlakuan radiasi. Ikatan *crosslinking* pada polimer dapat mencegah rantai terpisah apabila ikatan diregangkan. *Crosslinking* dapat menyebabkan perubahan sifat fisik dan mekanik polimer menjadi lebih kuat. Contoh aplikasi yang terjadi karena terbentuknya *crosslinking* pada polimer diantaranya adalah pembuatan hidrogel yang dapat diaplikasikan di bidang kesehatan

sebagai *wound dressing* maupun pertanian sebagai *super water absorbent*. Radiation degradation adalah proses pemutusan ikatan yang disebabkan oleh radiasi. Proses degradasi polimer lainnya dapat disebabkan oleh termal (panas), foto degradasi (cahaya), kimia, biologi (biodegradasi) dan mekanis. Pemutusan ikatan pada rantai utama polimer dapat mengurangi masa molekul atau panjang rantainya sehingga sifat fisik dan mekanik polimer menjadi lebih rendah. Aplikasi *radiation degradation* yang bermanfaat dan sudah dikenal luas adalah degradasi polisakarida (kitosan, alginat, karaginan) yang dapat digunakan sebagai bahan pemercepat tumbuh tanaman (*plant growth promoter*) dan suplemen pakan ternak/ikan. Reaksi antara radiasi dengan polimer lainnya adalah *radiation induced graft polymerization* atau reaksi pencangkakan polimer yang diinisiasi oleh radiasi. Reaksi pencangkakan polimer dapat menghasilkan material-material baru, sesuai dengan sifat yang diinginkan. Pencangkakan polimer dengan cara radiasi tidak meninggalkan residu kimia, dapat berlangsung pada suhu yang tidak terlalu tinggi, dan dapat menggunakan berbagai bentuk matrik polimer. Aplikasi kopolimerisasi radiasi misalnya membran pemisah baterai, membran sel bakar, adsorben logam berat, uranium and *rare metal recovery*, katalis untuk produksi biodiesel, *water proof cotton fabric* dan plastik ramah lingkungan.



Gambar 12. Contoh Aplikasi Radiasi pada Polimer sebagai PGP dan SWA



---

## RANGKUMAN

### 1. Prinsip Dasar Radiasi

**Radiasi** adalah emisi dan propagasi energi dalam bentuk partikel atau gelombang yang memiliki panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu dimana besar energinya berbanding terbalik dengan besar panjang gelombangnya.

**Radiasi pengion** adalah radiasi yang dapat mengionisasi dan mengeksitasi suatu target.

**Sumber radiasi pengion** terdiri dari:

- Partikel bermuatan (alpha, beta, **elektron**, dan proton).
- Partikel tidak bermuatan (neutron).
- Gelombang elektromagnetik atau foton (**sinar- $\gamma$**  dan **sinar-X**).

**Stopping Power** atau **Linear Energy Transfer (LET)** adalah banyaknya energi yang hilang per satuan panjang trek partikel (keV/ $\mu\text{m}$ ).

**Iradiasi (Irradiation)** adalah paparan terhadap radiasi pengion.

**Iradiator (Irradiator)** adalah fasilitas untuk melakukan irradiasi.

### 2. Interaksi Radiasi Pengion dengan Materi

**Interaksi partikel bermuatan dengan materi:**

Ionisasi, Eksitasi, Bremsstrahlung, Reaksi inti.

**Interaksi partikel tidak bermuatan dengan materi:**

Tumbukan elastis, Tumbukan tidak elastis, Reaksi inti.

**Interaksi gelombang elektromagnetik dengan materi:**

Efek fotolistrik, Efek Compton, Produksi pasangan.

### 3. Kimia Radiasi

**Kimia radiasi:** Proses kimia yang terjadi akibat adanya interaksi foton berenergi tinggi dan partikel-partikel atomik yang disebut dengan radiasi pengion, dengan materi.

**Radiolisis air:**

Proses kimia yang terjadi akibat interaksi radiasi dengan air (radiolisis air) menghasilkan radikal  $\cdot\text{OH}$  dan  $\cdot\text{H}$ , ion  $\text{H}^+$ , elektron terlarut ( $e^-_{\text{aq}}$ ),  $\text{H}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

### **Radiolisis senyawa organik dalam larutan air:**

Radikal  $\cdot\text{OH}$  hasil radiolisis air menyerang senyawa organik sehingga hasil radiolisis senyawa organik dalam larutan air adalah radikal senyawa organik ( $\cdot\text{R}'$ ),  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ .

### **Pengaruh oksigen terlarut dalam larutan air:**

Di dalam air, oksigen terlarut bereaksi dengan radikal hidrogen  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{e}^-_{\text{aq}}$  dan  $\text{H}^+$  membentuk radikal peroksid ( $\text{HO}_2\cdot$ ) yang akan berfungsi sebagai spesi oksidator tambahan.

## **4. Aplikasi Iradiasi**

### **Aplikasi iradiasi di bidang pertanian:**

- Pemuliaan tanaman dengan teknik mutasi radiasi untuk mendapatkan varietas unggul.
- Pengawetan bahan pangan untuk menghambat pematangan dan pematangan serta membasmi serangga (dosis rendah) dan membunuh mikroba patogen (dosis sedang), serta membunuh seluruh jenis bakteri yang ada (dosis tinggi),
- Pengendalian hama dengan Teknik Serangga Mandul (TSM) dimana serangga jantan dimandulkan dengan radiasi dan dilepaskan secara berulang di daerah target.

### **Aplikasi iradiasi di bidang bahan kesehatan:**

- Sterilisasi bahan kesehatan
- Bank jaringan dan pengembangan biomaterial
- Pengendalian penyakit

### **Aplikasi iradiasi di bidang bahan industri:**

- Modifikasi polimer melalui reaksi ikatan silang (*crosslinking*), degradasi (*degradation*) dan kopolimerisasi cangkok (*grafting*).

## DAFTAR PUSTAKA

1. Y. K. Bhardwaj, *Basics of Radiation*, IAEA/RCA RTC on Basic Radiation Processing of Polymer Focusing on Radiation Grafting, Manila, Philippines, 2013.
2. G. W. Buxton, *An Overview of Radiation Chemistry of Liquids*, In Radiation Chemistry from Basics to Applications in Material and Life Sciences, EDP Science, France, 2008.
3. <https://www.batan.go.id/ensiklopedi> (Juli, 2015).
4. [www.batan.go.id/index.php/aplikasi-nuklir](http://www.batan.go.id/index.php/aplikasi-nuklir) (Juli, 2015).
5. K. Makuuchi, S. Cheng, *Radiation Processing of Polymer Materials and Its Industrial Applications*, John Wiley and Sons, Inc, New Jersey, 2012.
6. Anonim, *Aplikasi Teknik Nuklir dalam Pengawetan Bahan Pangan*, ATOMOS, PDIN, BATAN
7. D. Darwis dan B. Abbas, *Aplikasi Isotop dan Radiasi dalam Pembuatan dan Pengembangan Bahan Biomaterial untuk Keperluan Klinis*, Seminar Nasional Keselamatan Kesehatan dan LingkunganVI, Joint Seminar PTKMR-BATAN, FKM-UI, KEMENKES-RI, Jakarta, 2010.
8. O. Gueven, *An Overview of Current Developments in Applied Radiation Chemistry of Polymer*, In Advances in Radiation Chemistry of Polymer, IAEA-TECDOC-14201, 2004
9. M.H. Saeid, A. Safrani, M.H.D.O. Sampa, and N. Ramamoorthy, *Radiation Processing of Natural Polymer-The IAEA Contribution*, Radiation Physics and Chemistry 79 (2010) 255-260.
10. M. Tamada, *Radiation Processing on Natural Polymer*, Open Seminar and FNCA Workshop for Electron Accelerator Application Project, Bangi, Malaysia, 2013.
11. T. Yamaki, *Overview of Radiation Induced Grafted Materials for Industrial Application*, IAEA/RCA RTC on Application and Upscaling of Radiation Grafting for Environmental and Industrial Application, Xianning, China, 2015.
12. Jiyeng Li, *Modification of Textile by Radiation Grafting Technique*, IAEA/RCA RTC on Application and Upscaling of Radiation Grafting for Environmental and Industrial Application, Xianning, China, 2015.