



**APLIKASI TEKNOLOGI RADIASI GAMMA  
(RADIOISOTOP Co-60) UNTUK PROSES  
PENGAWETAN BUAH**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains  
Program Studi Fisika

oleh

**MOH. SHOFI NUR UTAMI**

4211412065

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

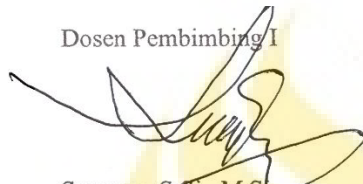
**2016**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

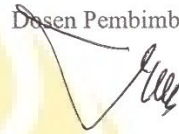
Semarang, 28 Juni 2016

Dosen Pembimbing I



Sunarno, S.Si., M.Si.  
NIP. 197201121999031003

Dosen Pembimbing II



Dra. Dwi Yulianti, M.Si.  
NIP. 196007221984032001



**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

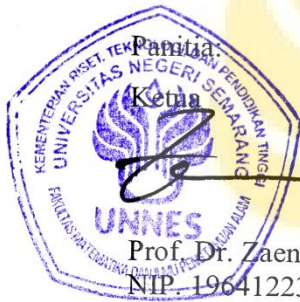
Aplikasi Teknologi Radiasi Gamma (Radioisotop Co-60) Untuk Proses Pengawetan Buah

disusun oleh

Moh. Shofi Nur Utami

421142065

telah dipertahankan dihadapan sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang pada tanggal 28 Juni 2016



Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt.  
NIP. 196412231988031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.  
NIP. 196807141996031005

Ketua Penguji

Dr. Budi Astuti, M.Sc.  
NIP. 197902162005012001

Anggota Penguji/  
Pembimbing I

Sunarno, S.Si., M.Si.  
NIP. 197201121999031003

Anggota Penguji/  
Pembimbing II

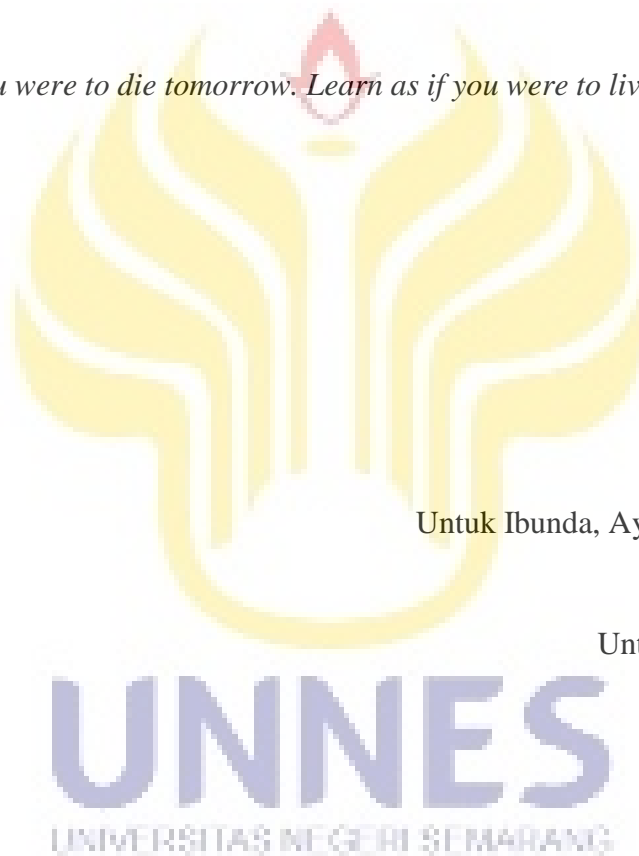
Dra. Dwi Yulianti, M.Si.  
NIP. 196007221984032001

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto:

Engkau tak dapat meraih ilmu kecuali dengan enam hal yaitu cerdas, selalu ingin tahu, tabah, punya bekal dalam menuntut ilmu, bimbingan dari guru dan dalam waktu yang lama (Ali bin Abi Thalib).

*Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever* (Mahatma Ghandi)



Persembahan:

Untuk Ibunda, Ayahanda dan Adinda

Untuk Guruku

Untuk Teman-temanku

# PRAKATA

*Bismillahirrohmanirrohim,*

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul “**Aplikasi Teknologi Radiasi Gamma (Radioisotop Co-60) Untuk Proses Pengawetan Buah**” dapat diselesaikan dengan baik.

Terselesaikannya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum., rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt., dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.
4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si., kepala Program Studi Fisika Universitas Negeri Semarang.
5. Sunarno, S.Si., M.Si., dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
6. Dra. Dwi Yulianti, M.Si., dosen pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan penuh perhatian serta meluangkan waktu untuk memberikan masukan, motivasi, dan saran selama penyusunan skripsi.

7. Dr. Budi Astuti, M.Sc., dosen penguji yang telah menguji seperti dosen pembimbing, banyak memberikan pengetahuan dan saran – saran yang membangun.
8. Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D., dosen wali atas bimbingan dan arahan kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
9. Ibu, Bapak dan Ana atas doa yang selalu menyertai setiap langkah-langkah penulis, semangatnya, cinta dan kasih sayang, kesabaran yang selalu dicurahkan dan dukungan moril maupun materiil yang tak henti-hentinya diberikan.
10. Clodia Acnes sebagai teman diskusi selama mengerjakan penelitian.
11. Mas Yasin, mas Arif, mba Melisa dan seluruh pegawai Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi Badan Tenaga Nuklir Nasional PATIR BATAN yang telah membantu dalam proses irradiasi buah.
12. Sahabat Fisika 2012 yang selalu menyemangati penulis dalam menyelesaikan skripsi.
13. Sahabat Fisika Medik yang selalu menyemangati, mendukung, mendorong, dan menjadi teman berbagi keluh kesah selama penelitian.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang membantu menyelesaikan skripsi ini. Semoga amal baiknya mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan karena keterbatasan yang dimiliki penulis. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan bagi pembaca sekalian. Penulis juga mengharapkan saran dan kritik demi menyempurnakan penelitian ini. Semoga

penelitian yang telah dilakukan dapat menjadikan sumbangsih bagi kemajuan dunia  
riset indonesia.

Semarang, 28 Juni 2016

Penulis





## ABSTRAK

**Utami, M. S. N.** 2016. *Aplikasi Teknologi Radiasi Gamma (Radioisotop Co-60) Untuk Proses Pengawetan Buah*. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Pertama Sunarno, S.Si., M.Si. dan Pembimbing Kedua Dra. Dwi Yulianti, M.Si.

**Kata kunci:** Cemaran Bakteri, Irradiasi Makanan, Pengawetan Buah, *Plate Count Agar*, Radiasi Gamma

Irradiasi makanan dilakukan untuk meningkatkan daya awet atau pengawetan bahan pangan. Pengawetan buah dapat dilakukan dengan menembakkan radiasi pengion ke buah. Sumber radiasi pengion berasal dari radioisotop Co-60 yang memancarkan radiasi gamma. Pada proses pengawetan makanan, faktor yang mempengaruhi buah membusuk (rusak) adalah salah satunya jumlah total cemaran bakteri yang terkandung dalam buah tersebut. Penelitian ini disajikan untuk mengetahui dosis irradiasi yang tepat dalam proses irradiasi makanan, dan mengidentifikasi faktor jumlah total cemaran bakteri terhadap proses pembusukan. Radiasi pengion dengan dosis tertentu dapat mengurangi atau bahkan membunuh seluruh bakteri yang ada dalam buah tersebut. Dosis irradiasi sangat menentukan pengurangan jumlah bakteri. Apabila dosis irradiasi tidak tepat maka berpengaruh pada bentuk fisik buah pasca irradiasi. Oleh sebab itu, dilakukan variasi dosis radiasi dari 2,5 kGy; 5 kGy; 7,5 kGy; dan 10 kGy. Proses irradiasi makanan menggunakan Irradiator Karet Alam (IRKA). Kemudian dilakukan perhitungan jumlah total cemaran bakteri menggunakan metode PCA (*Plate Count Agar*) setelah disimpan dalam lemari pendingin dengan suhu  $\pm 10$  °C. Didapatkan hasil bahwa apabila dosis radiasi yang digunakan lebih dari 5 kGy dan atau tanpa radiasi setelah disimpan selama 15 hari sampel buah pisang dan sawo menjadi layu. Begitupula dengan buah apel malang, sampel buah apel malang menjadi layu. Dosis radiasi yang tepat digunakan pada pengawetan buah adalah 2,5 kGy – 5 kGy, karena sampel yang diirradiasi dengan dosis 2,5 kGy – 5 kGy sampel tetap segar selama penyimpanan 15 hari dan dapat mengurangi jumlah total cemaran bakteri tanpa merusak buah tersebut.

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERSETUJUAN PEMBIMBING</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>MOTTO DAN PERSEMBAHAN</b> .....	v
<b>PRAKATA</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>BAB</b>	
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	3
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Skripsi .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Irradiasi Pada Bahan Pangan.....	5
2.2 Regulasi Irradiasi Pangan.....	6
2.3 Interaksi Sinar Gamma dengan Materi.....	7
2.3.1 Efek Fotolistrik.....	8
2.3.2 Efek Compton .....	9
2.3.3 Produksi Pasangan.....	12
2.4 Dosis Radiasi .....	13
2.5 Radioisotop Co-60.....	15
2.6 Fase Pertumbuhan Bakteri.....	15

2.7 Mekanisme Radiasi Sinar Gamma dalam Pemusnahan Bakter.....	16
2.8 Radiasi Inaktivasi Mikroorganisme.....	19
<b>3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
3.1 Alat dan Bahan .....	22
3.1.1 Alat.....	22
3.1.2 Bahan.....	22
3.2 Proses Irradiasi Sampel .....	23
3.3 Menghitung Jumlah Total Cemaran Bakteri .....	25
3.5 Pengambilan Data.....	26
3.6 Mekanisme Penelitian .....	27
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>28</b>
4.1 Tahap Irradiasi Sampel.....	28
4.2 Hasil Pengujian Jumlah Total Cemaran Bakteri .....	29
4.3 Pengaruh Jumlah Total Cemaran Bakteri Terhadap Proses Pembusukan..	32
<b>5. PENUTUP.....</b>	<b>38</b>
5.1 Kesimpulan.....	38
5.2 Saran.....	38
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>40</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>44</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.3 Diagram Alir Penelitian .....	27
4.4 Perhitungan Dosis Serap Terukur .....	28
4.2 Hasil Pengamatan Jumlah Total Cemaran Bakteri.....	29
4.3 Bentuk Fisik Buah Pisang Pasca irradiasi.....	33
4.4 Bentuk Fisik Buah Apel Malang Pasca Irradiasi .....	34
4.5 Bentuk Fisik Buah Sawo Pasca Irradiasi .....	36



## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Diagram Ilustrasi Efek Fotolistrik (Khan, 2003) .....	9
2.2 Diagram Ilustrasi Efek Compton (Khan, 2003) .....	11
2.3 Diagram Ilustrasi Proses Produksi Pasangan (Khan, 2003).....	13
2.4 Dua Proses Efek Radiasi (Baskar <i>et al.</i> , 2014) .....	18
2.5 Kerusakan Struktur DNA Akibat Radiasi Pengion (Alatas, 2006).....	19
2.6 Pengaruh Dosis Radiasi Terhadap Cemaran Bakteri (Mtenga <i>et al.</i> , 2013) ...	21
4.1 Jumlah Total Cemaran Bakteri Buah Pisang Selama Penyimpanan.....	33
4.2 Jumlah Total Cemaran Bakteri Buah Apel Malang Selama Penyimpanan.....	35
4.3 Jumlah Total Cemaran Bakteri Buah Sawo Selama Penyimpanan.....	36



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan Dosis Radiasi .....	44
2. Bentuk Fisik Sampel Pasca Irradiasi.....	47
3. Dokumentasi .....	50
4. Hasil Kalibrasi IRKA .....	53



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki komoditas hortikultura untuk diekspor ke luar negeri, misalnya sawo, apel, dan pisang. Produksi komoditas hortikultura selama kurun waktu 2010 – 2014 menunjukkan pola yang fluktuatif. Hal ini terjadi tidak hanya pada komoditas sayuran, tetapi juga pada kelompok komoditas buah dan florikultura. Produksi pisang di Indonesia cukup besar. Pada tahun 2014 produksinya sebanyak 7.070.489 ton. Begitu pula untuk komoditas hortikultura lainnya diantaranya adalah sawo dan apel malang menunjukkan rata-rata pertumbuhan diatas 2% (Kementrian Pertanian, 2015). Dari hasil ini menunjukkan bahwa komoditas hortikultura Indonesia sebetulnya mampu untuk diekspor keluar negeri, namun karena terkendala pengelolaan pasca panen buah-buahan tersebut belum dapat diterima dikelas ekspor selain karena alasan lain.

Distribusi komoditas hortikultura ke tempat yang jauh memerlukan waktu yang cukup lama, sedangkan daya simpan komoditas hortikultura seperti pisang dan sawo relatif singkat. Untuk itu diperlukan teknologi yang tepat untuk meningkatkan daya simpan buah pisang dan sawo. Irradiasi makanan (*Food Irradiation*) merupakan salah satu cara untuk mempertahankan kesegaran komoditas hortikultura (Irawati, 2006).

Irradiasi makanan (*Food Irradiation*) merupakan teknologi yang memanfaatkan radiasi pengion (sinar gamma dan sinar-X) untuk proses pengawetan, sterilisasi, dan karantina. Penggunaan teknik nuklir dalam bidang

pangan sudah terbukti dapat membantu memecahkan berbagai masalah sanitasi. Beberapa contoh aplikasi teknik nuklir untuk tujuan tersebut telah dikembangkan antara lain untuk peningkatan daya awet dan sterilisasi bahan pangan (PDIN-BATAN, 2010).

Bahan pangan sangat diperlukan oleh manusia untuk pertumbuhan dan mempertahankan hidup karena bahan pangan merupakan sumber gizi bagi manusia (Sunarno *et al.*, 2015). Bahan pangan umumnya mudah rusak baik disebabkan oleh pengaruh cuaca, pertunasan, perakaran, perkecambahan, serangan serangga dan bakteri patogen yang dapat memproduksi toksin mematikan (Akrom *et al.*, 2014).

Pisang, sawo, dan apel malang merupakan komoditas yang potensial untuk dikembangkan di daerah tropis seperti Indonesia. Pengembangan yang dimaksud adalah memberikan perhatian yang lebih serius pada kegiatan penanaman varietas unggul, pemeliharaan, penanganan pasca panen dan pemasaran. Namun demikian, buah-buahan tersebut termasuk dalam kelompok klimaterik (cepat rusak) (Agustiningrum, 2014; Ariyanti, n.d; Widodo, 1993). Untuk keperluan itu maka buah-buahan yang berpotensi untuk ekspor harus diawetkan dengan tidak menimbulkan perubahan sensoris buah tersebut. Dari hal tersebut maka perlu dilakukannya irradiasi pangan pada buah-buahan kelompok klimaterik dengan memvariasikan dosis radiasi, sehingga akan didapatkan dosis yang cocok untuk digunakan dalam proses irradiasi pangan untuk proses pengawetan buah. Uji PCA (*Plate Count Agar*) dilakukan setelah irradiasi dengan tujuan untuk mengetahui jumlah total cemaran bakteri yang ada pada buah. PCA adalah metode menghitung total bakteri dari suatu bahan yang telah diberi perlakuan khusus (Sutton, 2011, Massa *et al.*, 1998).



## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, rumusan masalah yang dikaji adalah sebagai berikut:

1. Berapa dosis irradiasi yang tepat dalam proses irradiasi pangan?
2. Bagaimana pengaruh jumlah total cemaran bakteri terhadap pembusukan buah?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui dosis irradiasi yang tepat dalam proses irradiasi pangan.
2. Mengidentifikasi faktor jumlah total cemaran bakteri terhadap proses pembusukan.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah dapat dijadikan rujukan bagi peneliti yang ingin lebih lanjut meneliti tentang irradiasi pangan dan memberikan pengetahuan bagi masyarakat umum bahwa irradiasi makanan tidak berbahaya bagi masyarakat.

## 1.5 Batasan Masalah

1. Pengujian yang dilakukan adalah menghitung jumlah total cemaran bakteri dalam *colony form unit* per mililiter (CFU/ml).
2. Pengaruh jumlah total cemaran bakteri terhadap proses pembusukan buah diamati dengan melihat bentuk fisik buah.

## 1.6 Sistematika Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun dan dibagi menjadi tiga bagian untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan skripsi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu bagian pendahuluan skripsi, bagian isi skripsi, dan bagian akhir isi skripsi.

Bagian pendahuluan skripsi terdiri dari halaman judul, sari (abstrak), halaman pengesahan, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran.

Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang tersusun dengan sistematika bab 1 yang meliputi pendahuluan, berisi latar belakang, permasalahan, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan skripsi; bab 2 yang berisi landasan teori yaitu teori-teori pendukung penelitian; bab 3 memuat metode penelitian, berisi tempat pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian; bab 4 yang meliputi hasil penelitian dan pembahasan, dalam bab ini dibahas tentang hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan dan terakhir bab 5 yaitu penutup yang berisi tentang kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang berkaitan dengan hasil penelitian.

Bagian akhir skripsi memuat tentang daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dari penulisan skripsi.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Irradiasi Pada Bahan Pangan**

Irradiasi adalah teknik penggunaan energi radiasi untuk penyinaran bahan secara sengaja, terarah dan periodik. Irradiasi bahan pangan merupakan aplikasi dari teknologi nuklir dengan tujuan pengawetan, sterilisasi dan karantina dengan memanfaatkan radiasi pengion (sinar gamma dan sinar-X). Selama proses irradiasi, bahan pangan terpapar sumber energi ionisasi dengan dosis serap tertentu (Stefanova *et al.*, 2010).

Terdapat tiga proses irradiasi dalam industri pangan yang diklasifikasikan berdasarkan dosis (Cahyani *et al.*, 2015), yaitu:

- a. Radapertisasi (dosis tinggi). Dosis ini biasanya digunakan untuk sterilisasi. Dosis yang digunakan berkisar antara 30 sampai 50 kGy sehingga dapat membunuh semua mikroorganisme yang ada dalam makanan.
- b. Radisidasi (dosis sedang). Dosis ini biasanya digunakan untuk membunuh seluruh bakteri patogen non spora termasuk *Salmonella* dan *Lysteria*. Dosis ini berkisar antara 1 sampai 10 kGy.
- c. Radurisasi (dosis rendah). Dosis ini berkisar antara 0,40 sampai dengan 2,50 kGy dan digunakan untuk mengurangi jumlah bakteri yang ada pada produk pangan serta menunda pematangan.

## 2.2 Regulasi Irradiasi Pangan

Penggunaan teknologi irradiasi pada bahan pangan telah disahkan oleh *Food and Drug Administration* (FDA) menetapkan peraturan tentang pelabelan pada produk pangan terirradiasi. FDA menetapkan bahwa pada kemasan produk pangan yang telah diirradiasi harus mencantumkan logo radura (*radiation durable*) (Cahyani *et al.*, 2015). Irradiasi pangan di Indonesia dilakukan berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 826/MENKES/PER/XII/1987, Nomor 152/MENKES/SK/II/1995, dan Nomor 701/MENKES/PER/2009, serta undang-undang pangan RI Nomor 7/1996, Label Nomor 69/1999 paragraf 34, dan peraturan perdagangan internasional komersialisasi komoditi pangan irradiasi dan peraturan standar internasional *Codex Alimentarius Commission* untuk makanan irradiasi (Irawati, 2007).

Radiasi pangan yang direkomendasikan oleh *Codex General Standard* digunakan untuk irradiasi makanan (*Food Irradiation*) adalah (1) sinar gamma yang dihasilkan dari radioisotop Co-60 dan Cs-137 dengan masing-masing energi sebesar 1,33 MeV dan 0,66 MeV; (2) sinar-X yang dihasilkan dari mesin sumber yang dioperasikan pada tingkat energi atau dibawah 5 MeV; dan (3) elektron yang dihasilkan dari mesin sumber yang dioperasikan pada tingkat energi atau di bawah 10 MeV (*Codex Alimentarius Commission*, 2003). Batasan ini ditetapkan berdasarkan pembentukan imbas radioaktif. Radioaktivitas imbas baru akan timbul pada atom-atom bahan yang diirradiasi bila energi yang digunakan di atas 5 MeV untuk radiasi gamma. Batas energi untuk sumber elektron lebih tinggi karena radioaktivitas imbas yang timbul pada energi kurang dari 16 MeV sangat sedikit jumlahnya dan relatif berumur pendek (Takehisa, 1990; Machi, 2003).

*Codex Alimentarius Commission* FAO/WHO merekomendasikan dosis irradiasi yang boleh digunakan pada irradiasi pangan tidak melebihi 10 kGy (Gould, 1995). Jumlah energi ini sebenarnya sangat kecil, setara dengan jumlah panas yang diperlukan untuk meningkatkan suhu air 2,4 °C. Oleh karena itu pangan yang diirradiasi dengan dosis dibawah 10 kGy hanya mengalami perubahan yang sangat kecil serta aman dikonsumsi oleh manusia (Irawati, 2007).

Dosis radiasi yang diberikan dapat berpengaruh pada hasil pasca panen, yaitu kerugian penyimpanan berkurang, umur simpan semakin panjang dan juga keamanan bahan pangan dari bakteri patogen serta parasit yang menyebabkan penyakit meningkat (Farkas, 2006). Dosis rendah (0,4 – 2,5 kGy) digunakan untuk tujuan menghambat pematangan dan pematangan serta membasmi serangga, dosis sedang (1 – 10 kGy) sudah dapat digunakan untuk membunuh bakteri patogen, dan dosis tinggi (30 – 50 kGy) digunakan untuk membunuh seluruh jenis bakteri yang ada. Dari ketentuan tersebut maka dengan menggunakan pembatas dosis radiasi dan batas maksimum energi dari sumber radiasi, bahan pangan yang diawetkan dengan irradiasi tidak menjadi radioaktif (ICGFI, 1999).

### **2.3 Interaksi Sinar Gamma dengan Materi**

Dari sudut pandang foton, probabilitas terjadinya interaksi bergantung pada energi kuantumnya. Berkas foton tidak seperti pada partikel bermuatan, ketika melintasi bahan foton akan mengalami pengurangan jumlah yang bersifat murni eksponen. Hal ini dapat terjadi karena foton ketika berinteraksi memindahkan seluruh energinya sehingga foton hilang dari berkas. Sebaliknya foton yang tidak

sempat mengalami interaksi tetap dalam berkas dan keluar menembus lapisan dengan energi yang tidak berubah (Wiryosimin, 1995).

### 2.3.1 Efek Fotolistrik

Energi kuantum foton tidak dapat diserap seluruhnya oleh elektron bebas, karena jika hal ini terjadi hukum kekekalan momentum tidak akan terpenuhi. Hukum kekekalan momentum terpenuhi apabila terjadi penyerapan energi secara total berlangsung dengan adanya zarah ketiga yang terlibat. Zarah ketiga ini adalah elektron yang terikat kuat dengan inti atom. Jadi interaksi fotolistrik harus dianggap sebagai interaksi antara foton dengan atom secara keseluruhan atau interaksi antara foton dengan awan elektron (paling mungkin terjadi pada elektron kulit K). Sehingga energi foton dapat diserap pada elektron yang terikat kuat oleh atom. Berdasarkan hukum kekekalan momentum diperoleh:

$$p_\gamma = p_e + p_a \quad (2.1)$$

berdasarkan hukum kekekalan energi diperoleh:

$$E_\gamma = K_e + K_a + E_B \quad (2.2)$$

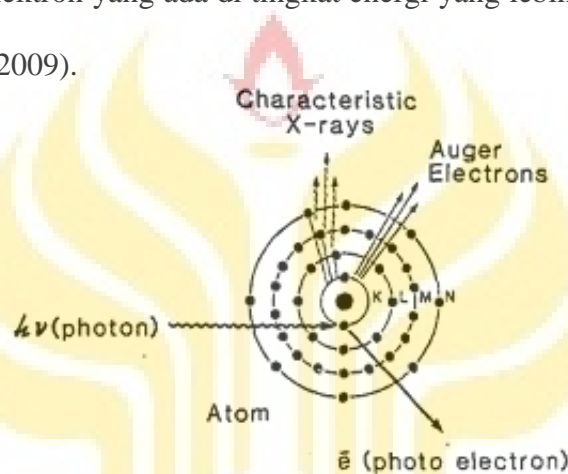
dengan  $E_B$  menyatakan energi ikat elektron di dalam atom, yang juga merupakan energi eksitasi atom setelah elektron terpental keluar dari kulit terdalam. Dapat ditunjukkan bahwa energi kinetik recoil atom adalah

$$K_a = \left(\frac{m_e}{M}\right) K_e \quad (2.3)$$

dengan  $m_e$  dan  $M$  adalah massa elektron dan massa atom, karena  $\left(\frac{m_e}{M}\right) \approx 0$  maka energi kinetik recoil atom  $K_a$  dapat diabaikan, sehingga diperoleh energi kinetik elektron yang terpancar dari atom adalah:

$$K_e = h\nu - E_B \quad (2.4)$$

Dari persamaan (2.4) dapat terlihat bahwa agar interaksi fotolistrik dapat berlangsung maka energi foton sekurang-kurangnya harus sama dengan energi ikat elektron di dalam atom. Proses ini biasanya diikuti oleh terpancarnya sinar-X karakteristik dan elektron *Auger* dengan energi kinetik sama dengan energi ikat  $E_B$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Ini disebabkan oleh kecenderungan untuk mengisi tempat kosong yang semula ditempati oleh elektron yang terlempar oleh salah satu elektron yang ada di tingkat energi yang lebih tinggi (Wiryosimin, 1995; Wiyatmo, 2009).



Gambar 2.1 Diagram Ilustrasi Efek Fotolistrik (Khan, 2003)

### 2.3.2 Efek Compton

Efek Compton adalah gejala yang timbul dalam proses interaksi foton dengan elektron bebas atau dengan elektron yang tidak terikat kuat oleh inti atom. Akibat interaksi ini akan menghasilkan foton hambur dan elektron hambur. Proses hamburan ini dianalisis secara klasik yaitu, interaksi yang terjadi antara foton dengan sebuah elektron yang dianggap diam. Gambar 2.2 memperlihatkan peristiwa tumbukan ini. Pada keadaan awal foton memiliki energi yang diberikan oleh

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

dan momentum

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hv}{c} \quad (2.6)$$

Elektron dalam keadaan diam memiliki energi diam  $m_0c^2$ . Setelah hamburan, foton memiliki energi  $E'$ , momentum  $p'$  dan bergerak pada arah yang membuat sudut  $\phi$  terhadap arah foton datang. Elektron memiliki energi  $E_e$ , momentum  $p_e$  dan bergerak pada arah yang membuat sudut  $\theta$  terhadap foton datang. Agar analisisnya mencakup pula foton datang berenergi tinggi yang memberikan energinya kepada elektron maka dapat di bentuk dalam kinematika relativistik bagi elektron. Dalam interaksi ini berlaku hukum kekekalan energi dan momentum (Krane, 2012):

$$E_{awal} = E_{akhir}$$

$$hv + m_0c^2 = hv' + E_e \quad (2.7)$$

energi yang diterima oleh elektron = kehilangan energi foton

$$K = hv - hv' \quad (2.8)$$

$$(p_x)_{awal} = (p_x)_{akhir}$$

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos \phi + p_e \cos \theta \quad (2.9.a)$$

kalikan persamaan (2.9.a) dengan  $c$  maka didapatkan:

$$p_e c \cos \theta = hv - hv' \cos \phi \quad (2.9.b)$$

$$(p_y)_{awal} = (p_y)_{akhir}$$

$$0 = \frac{hv'}{c} \sin \phi + p_e \sin \theta \quad (2.10.a)$$

kalikan persamaan (2.10.a) dengan  $c$  maka didapatkan:

$$p_e c \sin \theta = hv' \sin \phi \quad (2.10.b)$$

karena yang ingin diperoleh adalah energi foton hambur, maka  $E_e$  dan sudut  $\theta$  dapat dihilangkan dengan cara kuadratkan dan jumlahkan persamaan (2.9.b) dan (2.10.b), kemudian eliminasi sudut  $\theta$ , maka didapatkan:



$$p_e^2 c^2 = (hv)^2 - 2(hv)(hv') \cos \phi + (hv')^2 \quad (2.11)$$

diketahui bahwa hubungan antara energi dan momentum relativistik adalah

$$E = K + m_0 c^2 \quad (2.12.a)$$

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (2.12.b)$$

substitusikan persamaan (2.12.a) ke persamaan (2.1.b), sehingga didapatkan

$$p^2 c^2 = K^2 + 2K m_0 c^2 \quad (2.12.c)$$

karena  $K = hv - hv'$ , maka persamaan (2.12.c) menjadi

$$p^2 c^2 = (hv)^2 + 2(hv)(hv') + (hv')^2 + 2m_0 c^2 (hv - hv') \quad (2.12.d)$$

substitusikan harga  $p^2 c^2$  ini dalam persamaan (2.11), maka didapatkan

$$2m_0 c^2 (hv - hv') = 2(hv)(hv')(1 - \cos \phi) \quad (2.13)$$

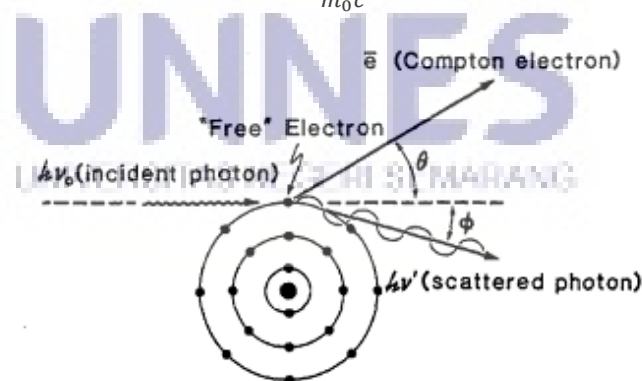
bagi persamaan (2.13) dengan  $2h^2 c^2$  diperoleh

$$\frac{m_0 c}{h} \left( \frac{v}{c} - \frac{v'}{c} \right) = \frac{v v'}{c c} (1 - \cos \phi) \quad (2.14)$$

Hubungan ini lebih sederhana apabila dinyatakan dalam bentuk panjang gelombang

sebagai pengganti frekuensi karena  $v/c = 1/\lambda$  dan  $v'/c = 1/\lambda'$ , maka didapatkan

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) \quad (2.15)$$



Gambar 2.2 Diagram Ilustrasi Efek Compton (Khan, 2003)

$\lambda$  adalah panjang gelombang foton datang dan  $\lambda'$  panjang gelombang foton hambur.

Besaran  $h/m_0 c$  dikenal sebagai panjang gelombang compton dari elektron yang memiliki nilai 0,002426 nm. Panjang gelombang ini sama dengan energi diam

elektron ( $m_0c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ ); namun ini bukanlah suatu panjang gelombang dalam arti sebenarnya, melainkan semata-mata suatu perubahan panjang gelombang. Perubahan panjang gelombang independen terhadap energi foton datang. Untuk foton dengan energi tinggi  $E \gg m_0c^2$  atau  $\lambda \ll h/m_0c$  maka dapat mengabaikan  $\lambda$  terhadap  $\lambda'$  pada sudut hambur  $\phi$ , kecuali mendekati  $0^\circ$ , sehingga energi foton terhambur memenuhi (Wiyatmo, 2009):

$$E' \approx \frac{m_0c^2}{1 - \cos \phi} \quad (2.16)$$

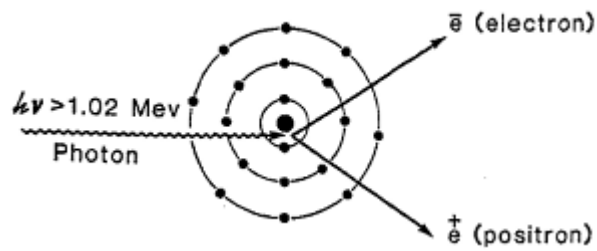
### 2.3.3 Produksi Pasangan

Proses lain apabila foton datang berenergi melebihi 1,02 MeV kemudian menumbuk atom adalah produksi pasangan. Pada interaksi ini energi foton datang diserap seluruhnya oleh atom dan dalam interaksi ini dua partikel tercipta, yakni sebuah elektron dan positron. Energi foton datang diserap kemudian berubah menjadi energi relativistik positron  $E_+$  dan elektron  $E_-$ . Interaksi ini diilustrasikan pada Gambar 2.3. Berdasarkan hukum kekekalan energi maka proses bentukan pasangan elektron-positron memenuhi (Krane, 2012):

$$\begin{aligned} hv &= E_+ + E_- \\ hv &= (m_0c^2 + K_+) + (m_0c^2 + K_-) \\ hv &= (K_+ + K_-) + 2m_0c^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Energi minimum yang diperlukan untuk membentuk pasangan elektron positron adalah besarnya energi foton (sinar gamma) sehingga tercipta pasangan elektron positron dalam keadaan diam ( $K_+ + K_- = 0$ ), sehingga (Wiyatmo, 2009):

$$hv \approx 2m_0c^2 \approx 1,02 \text{ MeV} \quad (2.18)$$



Gambar 2.3 Diagram Ilustrasi Proses Produksi Pasangan (Khan, 2003)

## 2.4 Dosis Radiasi

Titik pada jaringan biologi dikatakan ada dalam medan radiasi apabila di dalam bagian volum di sekitar titik terdapat interaksi antara radiasi yang bersangkutan dengan atom atau molekul jaringan. Medan radiasi di titik itu diungkapkan melalui besaran *fluen*. *Fluen* adalah jumlah zarah (foton, sinar gamma atau sinar-X) yang menembus per satuan luas bidang yang tegak lurus pada arah datang radiasi. Secara matematis dapat dituliskan

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.19)$$

dengan  $dN$  menyatakan jumlah zarah yang menembus bidang yang tegak lurus pada arah lintasan zarah, sedangkan  $dA$  adalah luas bidang itu. Apabila radiasi datang dari segala penjuru, maka bidang yang dimaksud adalah permukaan bola yang berpusat di titik yang bersangkutan. Pancaran radiasi yang divergen dapat diasumsikan memiliki jari-jari seperti jari-jari bola.

Nilai medan radiasi di suatu titik ditafsirkan sebagai jumlah rata-rata zarah yang menembus bidang tegak lurus pada arah lintasan zarah selama selang waktu tertentu. Jika selang waktu itu cukup pendek, misalnya  $dt$ . Maka jumlah zarah-zarah yang menembus bidang yang tegak lurus pada arah lintasan zarah per satuan luas

bidang selama waktu  $dt$  disebut sebagai laju *fluen* atau rapat *fluks* atau disingkat *fluks*. *Fluks*  $\phi$  diberi batasan sebagai

$$\phi = \frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dA dt} \quad (2.20)$$

Dosis radiasi didefinisikan sebagai jumlah radiasi yang terdapat dalam medan radiasi atau jumlah energi radiasi yang diserap atau diterima oleh materi yang dilaluinya. Besaran dosis radiasi dengan menyatakan jumlah radiasi yang terdapat dalam medan radiasi antara lain: paparan radiasi dan fluks sedangkan besaran dosis radiasi dengan menyatakan jumlah energi yang diterima oleh materi persatuan massa adalah dosis serap. Secara matematis dosis serap dapat dituliskan:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.21)$$

$dE$  adalah energi yang diserap oleh medium (joule) dan  $dm$  adalah massa (kg).

Turunan dosis serap terhadap waktu adalah laju dosis serap ( $\text{Gy S}^{-1}$ ):

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.22)$$

Suatu medium yang berada dalam suatu medan radiasi akan menerima dosis radiasi yang besarnya sebanding dengan lamanya penyinaran, semakin lama penyinaran, akan semakin besar dosis radiasi yang diterima, demikian sebaliknya, secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

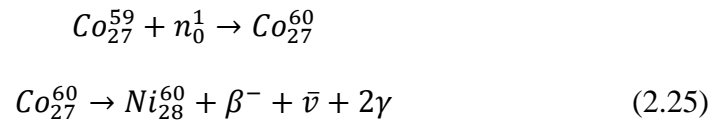
$$D (\text{Gy}) = \dot{D} \cdot t \quad (2.23)$$

dan laju dosis dalam satuan Gy/jam

$$\dot{D} = \frac{D \times 60}{t} \quad (2.24)$$

## 2.5 Radioisotop Co-60

Co-60 dihasilkan dari reaksi inti antara Co-59 dengan neutron dalam reaktor sesuai dengan reaksi inti sebagai berikut:



Co-60 dalam keadaan tidak stabil, meluruh memancarkan dua sinar gamma dengan energi masing-masing sebesar 1,17 MeV dan 1,33 MeV yang mempunyai waktu paruh 5,27 tahun. Peluruhan gamma didahului oleh peluruhan beta. Co-60 menjadi dalam keadaan *ground state* apabila sudah menjadi Ni-60.

## 2.6 Fase Pertumbuhan Bakteri

Pertumbuhan bakteri mengalami empat fase, yaitu fase lag (penyesuaian), fase log (logaritmik atau eksponensial), fase stasioner (seimbang) dan fase kematian (kemunduran atau penurunan (Grieb *et al.*, 2005). Saat fase lag, bakteri menjalani adaptasi dalam medium baru dan tumbuh sebagai penyesuaian diri dengan lingkungannya yang baru. Pada fase pertama ini, tidak ada penambahan populasi bakteri karena hanya terjadi penambahan substansi intraseluler, sel mengalami perubahan dalam komposisi kimiawi dan bertambah ukurannya saja. Memasuki fase logaritma, sel membelah dengan laju konstan, massa menjadi dua kali lipat dengan laju sama dan aktivitas metabolik konstan. Setelah nutrisi menyusut dan habis digunakan saat pembelahan sel, maka terjadi kematian beberapa sel dan sebagian yang masih hidup tetap tumbuh dan membelah sehingga jumlah sel hidup menjadi stabil, dengan demikian bakteri memasuki fase stasioner. Pada fase

terakhir terjadi kematian sel yang lebih cepat dari pada terbentuknya sel-sel baru (Tuasikal *et al.*, 2003).

## **2.7 Mekanisme Radiasi Sinar Gamma dalam Pemusnahan Bakteri**

Jika sumber radiasi yang digunakan adalah Co-60 dengan energi gamma sebesar 1,17 MeV dan 1,33 MeV maka interaksi yang mungkin terjadi adalah produksi pasangan (Akrom *et al.*, 2014). Pengaruh radiasi pada bakteri terutama yang terkait dengan perubahan kimia, bergantung pada faktor fisika dan fisiologis. Parameter fisika yaitu, laju dosis, distribusi radiasi, dan kualitas radiasi, sedangkan parameter fisiologis yaitu, suhu, kadar air, dan konsentrasi oksigen. Dalam proses irradiasi pangan menggunakan radiasi pengion (sinar gamma) akan menimbulkan eksitasi (elektron terpental dari kulit dalam ke kulit luar), ionisasi (pelepasan sebuah elektron), dan perubahan kimia. Eksitasi terjadi apabila energi eksitasi melebihi energi ikat atom. Ionisasi adalah proses peruraian senyawa kompleks atau makromolekul menjadi fraksi atau ion radikal bebas. Perubahan kimia timbul sebagai akibat dari eksitasi, ionisasi dan reaksi kimia yang terjadi dalam sel hidup, sehingga dapat menghambat sintesis DNA yang menyebabkan proses pembelahan sel atau proses kehidupan normal sel akan terganggu dan terjadi efek biologis (Putri *et al.*, 2015).

Efek radiasi terhadap sistem biologi dapat berupa efek langsung dan efek tidak langsung. Efek langsung terjadi saat foton mengenai inti atom pada molekul DNA maupun komponen-komponen penting lain dan diserap sehingga menghasilkan elektron, kemudian elektron tersebut menyebabkan terputusnya

ikatan rantai pada DNA dan mempengaruhi kemampuan sel untuk bereproduksi dan bertahan, sedangkan efek tidak langsung terjadi saat foton mengenai molekul air yang merupakan komponen utama dalam sel sehingga terjadi ionisasi:



$\text{H}_2\text{O}^+$  adalah ion radikal bebas dalam sebuah atom atau molekul yang bermuatan positif karena kehilangan elektron.  $\text{H}_2\text{O}^+$  memiliki sebuah elektron yang tidak berpasangan di kulit terluarnya, sehingga sangat reaktif. Ion  $\text{H}_2\text{O}^+$  dalam sel dapat terdisosiasi dan bereaksi dengan molekul air yang lain. Ion  $\text{H}_2\text{O}^+$  segera mengalami disosiasi sesuai dengan persamaan



sedangkan elektron ditangkap oleh molekul air



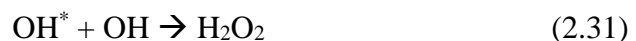
seperti ion positif  $\text{H}_2\text{O}^+$  juga segera mengalami disosiasi menjadi



ion  $\text{H}_2\text{O}^+$  bereaksi dengan air menghasilkan hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) (Hall, 2000):

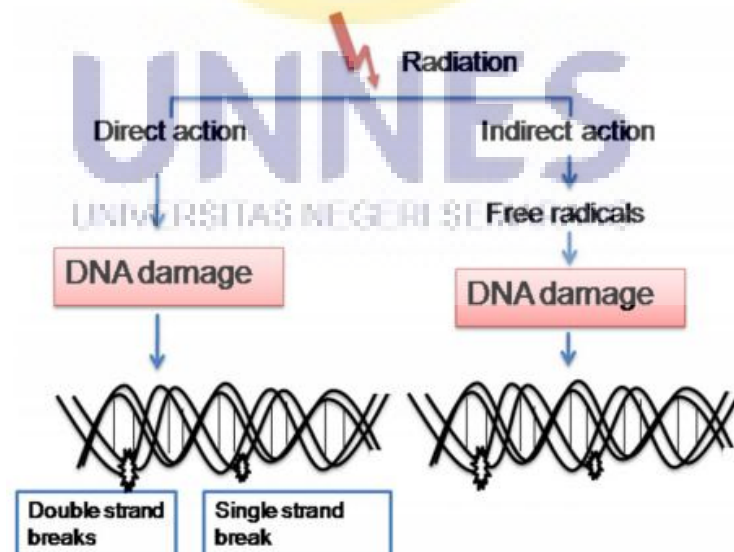


karena dalam sel sudah banyak mengandung ion  $\text{H}^+$  dan  $\text{OH}^-$ , kedua ion ini tidak berpengaruh pada sel. Sebaliknya radikal  $\text{H}^*$  dan  $\text{OH}^*$  dan bergabung dengan radikal sejenisnya, atau bereaksi dengan molekul lain dalam sel. Probabilitas terjadinya penggabungan bergantung kepada radiasi pengion yang menyinarinya. Radikal bebas  $\text{OH}^*$  akan berinteraksi dengan  $\text{OH}^-$  karena posisi mereka sangat berdekatan dan akan bereaksi menimbulkan hidrogen peroksida sesuai dengan persamaan



dan radikal  $H^*$  bergabung dengan sesamanya membentuk gas hidrogen. Berbeda dengan hasil reaksi dalam persamaan (2.26) sampai dengan persamaan (2.29) yang rata-rata berumur sangat pendek (dalam orde mikrodetik), hidrogen peroksida yang terbentuk sangat stabil dan berumur panjang. Senyawa  $H_2O_2$  adalah zat pengoksidasi yang sangat kuat, sehingga dapat merusak sel (Ghosal *et al.*, 2005).

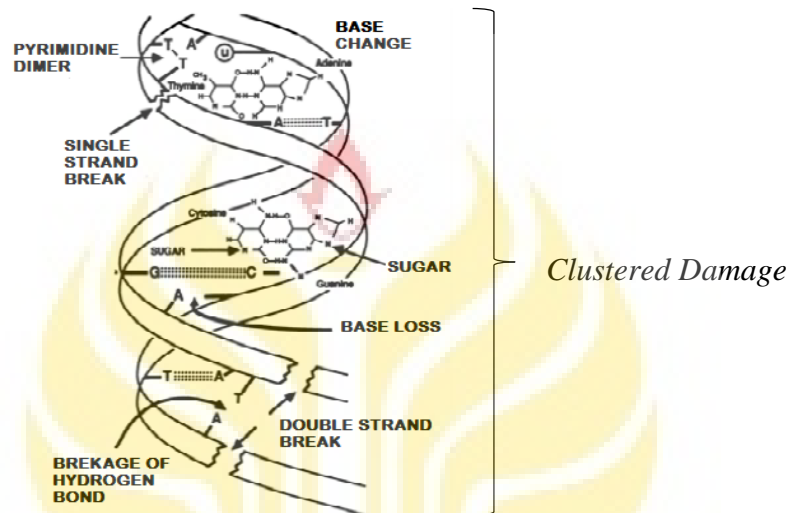
Perubahan sifat fisika kimia yang terjadi akibat radiasi dapat menimbulkan perubahan dan hilangnya basa nitrogen, pemutusan ikatan nitrogen, pemutusan rantai gula fosfat dari masing-masing polinukleotida dari DNA (*Single strand break*), pemutusan rantai yang berdekatan pada kedua polinukleotida dari DNA (*double strand break*), dan terbentuknya ikatan silang intramolekuler (*base damage*) (Gambar 2.4). Kebanyakan bakteri mampu untuk memperbaiki kerusakan *single strand break*. Bakteri yang sensitif tidak dapat memperbaiki *double strand break*, sedangkan bakteri yang menunjukkan resistensi yang lebih tinggi mempunyai kapasitas untuk memperbaiki *double strand break*. Hasil perbaikan atau penyusunan kembali DNA tersebut dapat sama atau berbeda dengan semula.



Gambar 2.4 Dua Proses Efek Radiasi (Baskar *et al.*, 2014)



Radiasi menyebabkan kerusakan yang padat pada suatu lokasi tertentu pada DNA, disebut dengan *clustered damage* (Gambar 2.5). *Clustered damage* didefinisikan sebagai dua atau lebih kerusakan (basa teroksidasi, basa hilang, atau *strand breaks*) yang terjadi pada suatu tempat tertentu dalam struktur heliks DNA (Alatas, 2006).



Gambar 2.5 Kerusakan Struktur DNA Akibat Radiasi Pengion (Alatas, 2006)

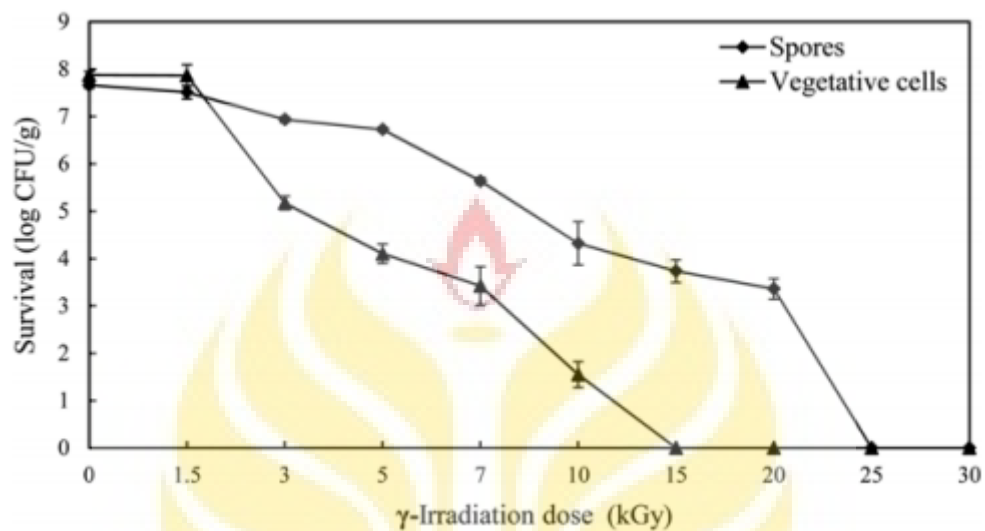
## 2.8 Radiasi Inaktivasi Mikroorganisme

Setiap mikroorganisme memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap radiasi gamma. Beberapa mikroorganisme sangat sulit untuk dihambat atau bahkan dibunuh dengan radiasi gamma, namun sebagian mikroorganisme juga mudah mati dengan pemberian radiasi gamma (Aquino, 2012). Tingkat kerusakan sel bakteri berkaitan erat dengan resistensi bakteri terhadap radiasi yang dinyatakan dengan nilai  $D_{10}$  (Cahyani *et al.*, 2015). Nilai  $D_{10}$  adalah besarnya dosis radiasi yang dibutuhkan untuk menurunkan jumlah bakteri sebanyak 90% dari jumlah total bakteri sehingga mengakibatkan inaktivasi populasi bakteri sebanyak satu log (Molins, 2001)

Semakin tinggi nilai  $D_{10}$  suatu bakteri menunjukkan semakin tahan bakteri tersebut terhadap irradiasi. Ketahanan bakteri terhadap radiasi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya (Putri *et al.*, 2015) :

1. Ukuran dan susunan struktur DNA dalam sel bakteri.
2. Senyawa yang berhubungan dengan DNA dalam sel, seperti peptida, nukleoprotein, RNA, lipid, lipoprotein dan ion logam.
3. Kandungan oksigen selama proses irradiasi meningkatkan pengaruh dalam menginaktivasi bakteri. Oksigen dapat meningkatkan efek letal pada mikroorganisme, sehingga pada kondisi anaerob, nilai  $D_{10}$  pada beberapa bakteri vegetatif lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi aerob.
4. Kadar air berpengaruh ketika proses rusaknya DNA bakteri yang disebabkan oleh radikal bebas akibat reaksi antara elektron dengan  $H_2O$ . Mikroorganisme tahan apabila ketika disinari dalam kondisi kering karena kadar air yang akan menentukan tingkat radikal bebas yang terbentuk.
5. Perlakuan pada suhu tinggi dalam kisaran sublethal diatas  $45^{\circ}C$ , sinergis meningkatkan efek bakterisida radiasi pengion pada sel vegetatif. Bakteri vegetatif jauh lebih tahan terhadap radiasi pada suhu *subfreezing* dibandingkan pada suhu kamar. Dalam keadaan beku, difusi radikal akan lebih banyak dibatasi.
6. Komposisi media bakteri memainkan peran penting dalam menentukan nilai  $D_{10}$ . Nilai  $D_{10}$  untuk bakteri tertentu dapat berbeda dalam berbagai media.
7. Kondisi pasca panen. Bakteri yang bertahan setelah perlakuan irradiasi akan lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan (suhu, pH, nutrisi, inhibitor, dll) dibandingkan dengan sel-sel yang tidak diberi perlakuan irradiasi.

Perhitungan nilai  $D_{10}$  dilakukan sesaat setelah proses radiasi, hasil penelitian Mtenga *et al.*, (2013) menunjukkan bahwa total cemaran bakteri semakin menurun seiring dengan bertambahnya dosis radiasi yang diberikan pada hari ke 0 pasca iradiasi (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Pengaruh Dosis Radiasi Terhadap Cemaran Bakteri (Mtenga *et al.*, 2013)

# **BAB 5**

## **PENUTUP**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dosis yang tepat digunakan untuk irradiasi makanan sehingga dapat mengurangi bakteri yang ada pada buah, yaitu 2,5 – 5 kGy. Pada rentang dosis ini sudah dapat mengurangi sebagian bakteri yang terkandung dalam buah dan tidak menjadikan buah tersebut rusak atau menjadi radioaktif.
2. Faktor pembusukan buah salah satunya disebabkan oleh jumlah total cemaran bakteri yang ada. Pada sampel buah pisang dan sawo yang termasuk buah klimaterik setelah penyimpanan hari ke-15 buah terlihat layu/tidak segar lagi. Jumlah total cemaran bakteri pada sampel buah pisang dan sawo berturut-turut pada dosis 2,5 kGy setelah penyimpanan hari ke-15 adalah  $1,47 \times 10^{10}$  CFU/ml dan  $4 \times 10^9$  CFU/ml. Pada sampel buah apel dosis radiasi 2,5 kGy setelah penyimpanan hari ke-15 bentuk fisik buah apel masih terlihat baik, karena buah apel bukan termasuk buah klimaterik.

### **5.2 Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang diberikan sebagai berikut:

1. Agar dapat dianalisis pengaruh nilai  $D_{10}$  (resistensi bakteri terhadap radiasi), disarankan dilakukan pengujian jumlah total cemaran bakteri pada hari ke-0.

2. Perlu dilakukan uji organoleptik untuk melihat pengaruh radiasi pada bentuk fisik buah.
3. Perlu dilakukan identifikasi jenis bakteri apa yang terkandung dalam sampel tersebut.
4. Perlu dilakukan penyimpanan pada suhu dibawah 10 °C agar bakteri psikrofil tetap dalam keadaan istirahat.
5. Perlu dilakukan kontrol tingkat kematangan buah.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abrar, M. 2013. Pengembangan Model Untuk Memprediksi Pengaruh Suhu Penyimpanan Terhadap Laju Pertumbuhan Bakteri Pada Susu Segar. *Jurnal Medika Veterinaria* 7(2): 109-112.
- Agustianingrum, D.A.Susilo, B. & Yulianingsih, R. 2014. Studi Pengaruh Konsentrasi Oksigen Pada Penyimpanan Atmosfer Termodifikasi Buah Sawo (*Achras Zapota L.*). *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis* 2(1): 22 – 34.
- Akrom, M., Hidayanto, E., Susilo. 2014. Kajian Pengaruh Radiasi Sinar Gamma Terhadap Susut Bobot Pada Buah Jambu Biji Merah Selama Masa Penyimpanan. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* 10: 86-91.
- Alatas, Z. 2006. Efek Pewarisan Akibat Radiasi Pengion. *Buletin Alara* 8(2): 65-74.
- Aquino, K.A.S. 2012. ‘Sterilization by Gamma Irradiation’. Dalam Adrovic, Feriz (ed.). *Gamma Radiation*. InTech. Europe.
- Ariyanti, Nurhidayati, Rosalina. n.d. Penggunaan Irradiasi Untuk Memperpanjang Daya Simpan Apel *Cultivar* Manalagi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi BATAN, Jakarta.
- Baskar, R., Dai, J., Wenlong, N., Yeo, R., and Yeoh, K.W. 2014. Biological response on cancer cells to radiation treatment. *Frontiers in Molecular Biosciences*.
- Biramontri, S. n.d. Investigation of The Effect of Temperature, Dose Rate And Short-Term Post-Irradiation Change On The Response of Various Types of Dosimeters to Cobalt-60 Gamma Radiation For Quality Assurance In Thailand. IAEA.
- Borsa, J., Lacroix, M., Ouattara, B., and Chiasson, F. 2005. Radiosensitization: enhancing the radiation inactivation of foodborne bacteria. *Radiation Physics and Chemistry*, 71: 135 – 139.
- Cahyani, A. F. K., Wiguna, L. C., Putri, R. A., Masduki, V.V., Wardani, A. K., Harsojo. 2015. Aplikasi Teknologi Hurdle Menggunakan Iradiasi Gamma dan Penyimpanan Beku Untuk Mereduksi Bakteri Patogen pada Bahan Pangan : Kajian Pustaka. *Jurnal Pangan dan Agrobisnis* 3(1): 73-79.

- Codex Alimentarius Commission. 2003. *Codex General Standard For Irradiated Foods*, CODEX STAN, 106-1983, Rev. 1, Cited: 7 March 2008. Available from: [www.codexalimentarius.net/download/standards/16/CXS\\_106e.pdf](http://www.codexalimentarius.net/download/standards/16/CXS_106e.pdf)
- Dwiloka, M. 1996. Bahan Kuliah Irradiasi Pangan. Semarang: Universitas Semarang Press.
- Farkas, J. 2006. Irradiation for better foods, *Trends in Food Science & Technology*, 17: 148-152.
- Ghosal, D., Marina. V. O., Elena. K. G., Vera. Y. M., Alexander. V., Amudhan. V., Min. Z., Heather. M. K., Hassan. B., Kira. S. M., Lawrence. P. W., James. K. F., & Michael J. D. 2005. How radiation kill cells: Survival of *Deinococcus radiodurans* and *Shewanella oneidensis* under oxidative stress. *FEMS Microbiology Reviews*, 29: 361 – 375.
- Gould, G.W (ed.). 1995. *Nes Method of Food Preservation*. Springer Science Business Media Dordrecht, New York.
- Grieb, T.A, Ren-Yo Forng, Richard E.S, Jack L., Jamie A., Simon B., Chad R., William N., Drohan, Wilson H.B. 2005. Effective use optimized, high-dose (50 kGy) gamma irradiation for pathogen inactivation of human bone allografts. *Biomaterials*, 26: 2033 – 2042.
- Hall, E.J. 2000. *Radiobiology for the Radiologist* (5<sup>th</sup> ed.). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, A Wolters Kluwer Company.
- Ikmalia. 2008. Analisa Profil Protein Isolat *Escherichia coli* S1 Hasil Irradiasi Sinar Gamma. Skripsi. Jakarta: Fakultas Sains dan Teknologi Universtas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI). 1999. Facts about food irradiation, International Energy Agency (IAEA), Vienna. Available from : [www.iaea.org/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf](http://www.iaea.org/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf)
- Irawati, Z. 2007. Pengembangan Teknologi Nuklir untuk Meningkatkan Keamanan dan Daya Simpan Bahan Pangan. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 3(2): 41 – 52.
- Irawati, Z. 2006. Aplikasi Mesin Berkas Elektron Pada Industri Pangan. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya: BATAN.

- Irmanita, V., Wardani, A. K., & Harsojo. 2016. Pengaruh Irradiasi Gamma Terhadap Kadar Protein dan Mikrobiologi Daging Ayam Broiler Pasar Tradisional dan Pasar Modern Jakarta Selatan. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 4(1): 428-435.
- Kementrian Pertanian. 2015. Rencana Strategis (RENSTRA) Kementrian Pertanian Tahun 2015-2019: Jakarta.
- Khan, M. F. 2003. *The Physics of Radiation Therapy* (3<sup>th</sup> ed.). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, A Wolters Kluwer Company.
- Krane, K.S. 2012. *Modern Physics* (3<sup>rd</sup> ed.). New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Machi, S. 2003. Application of Electron Accelerator worldwide, in: Proceedings of The FNCA Workshop on Application of Electron Accelerator (Yoshii F. And Kume T. eds). 2002. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Takasaki: 9-14.
- Massa, S., Caruso, M., Trovatelli, Francesca., and Tosques, M. 1998. Comparison of Plate Count Agar And R2A Medium For Enumeration of Heterotrophic Bacteria In Natural Mineral Water. *World Journal of Microbiology & Biotechnolohy*, 14: 727 – 730.
- Molins, R.A. 2001. *Food Irradiation: Principle And Applications*. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Mtenga, A.B., Kassim, N., Shim, W.B., and Chung, D.H. 2013. Efficiency of Fractionated  $\gamma$ -Irradiation Doses to Eliminate Vegetative Cells and Spores of *Bacillus cereus* from Raw Rice. Springer. *Food Sci. Biotechnol*, 22(2): 577-584.
- Pusat Diseminasi Iptek Nuklir Badan Tenaga Atom Nasional (PDIN-BATAN). 2010. Aplikasi Teknik Nuklir Dalam Pengawetan Bahan Pangan. ATOMOS, Media Informasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Jakarta.
- Putri, F. N. A, Wardani, A. K, dan Harsojo. 2015. Aplikasi Teknologi Irradiasi Gamma dan Penyimpanan Beku Sebagai Upaya Penurunan Bakteri Patogen Pada Seafood : Kajian Pustaka. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 3(2): 345-352.
- Sari, N.T. 2010. *Pemanfaatan Biosolid*. Klaten: Yayasan Humaniora.



- Stefanova, R. Nikola, V. Spassov. Stefan, L. 2010. Irradiation of Food, Current Legislation Framework, and Detection of Irradited Foods. *Springer, Food Anal. Methods*, 3:225-252.
- Sunarno, Masturi, & Utami, M. S. N. 2015. The Application of Gamma Irradiation Technology and Frozen Storage for Decreasing Total Bacteria In Some Local Fruits. *International Conference on Mathematics, Science, and Education: Universitas Negeri Semarang*.
- Sutton, Scott. 2011. Accuracy of Plate Counts. *Journal of Validation Technology*.
- Takehisa, M. 1990. Process And Product Control of Electron Beam (EB) Processing, Presented at IAEA/FAO Regional (RCA) Workshop on Electron Beam Processing For Food Irradiation, Japan.
- Thamrin, M.T., dan Sofyan, H. 1996. Pengukuran Radiasi Dosis Tinggi Dengan Dosimeter Perspex Kuning. *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan*. PSPKR – BATAN.
- Thayer D. W., Boyd G., Fox J.B, Lakritz JR., L, and Hampson J.W. 1995. Variations in Radiation Sensitivity of Foodborne Pathogens Associated with the Suspending Meat. *Journal of Food Science*, 60(1): 63-67.
- Tuasikal, B.J., I. Sugoro, T. Tjiptosumirat, M. Lina. 2003. Pengaruh Iradiasi Sinar Gamma pada Pertumbuhan *Streptococcus Agalactiae* Sebagai Bahan Vaksin Penyakit *Mastitis* pada Sapi Perah. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 4(2): 137 – 149.
- Tursika, S. 2007. Pengaruh Suhu dan Lama Simpan Terhadap Mutu Buah Pisang Raja Bulu (*Musa paradisiaca*) Setelah Pemeraman. Skripsi. Bogor: FTP Institut Pertanian Bogor.
- Widodo, Dwi, H. 1993. Pengaruh Irradiasi Gamma terhadap Daya Simpan Pisang Mas Pada Suhu Kamar dan Suhu Rendah. Skripsi. Bogor: FTP Institut Pertanian Bogor.
- Wirjosimin, S. 1995. Mengenal Asas Proteksi Radiasi. Bandung: Penerbit ITB.
- Wiyatmo, Y. 2009. Fisika Nuklir Dalam Telaah Semi-klasik & Kuantum (Cetakan II). Yogyakarta: Pustaka Pelajar Offset.