

KARAKTERISASI DAN POTENSI PENGGUNAAN IRADIATOR MERAH PUTIH UNTUK PENANGANAN PRODUK PANGAN HASIL PERTANIAN

Ari Satmoko^a, Hyundianto Arif Gunawan^a, Bonang Sigit Trenggono^b, dan Mujiono^b

^a*Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir*

Kawasan Puspiptek Gd. 71, Setu, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

^b*Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi*

Jalan Lebak Bulus Raya No. 49, Pasar Jum'at, Jakarta Selatan, Indonesia

Alamat Email Korespondensi: satmoko@batan.go.id

(Diterima 05-10-2017, Disetujui 30-11-2018)

ABSTRAK

Iradiator gamma, yang diberi nama Iradiator Merah Putih, telah selesai dibangun dan diisi dengan sumber Cobalt-60 dengan kapasitas total sekitar 300 kCi. Dirancang untuk multi guna, Iradiator ini harus dapat menyediakan berbagai dosis serap dari rendah hingga tinggi. Sistem kontrol mengizinkan 4 opsi kombinasi rak-rak sumber dengan opsi aktivitas terkecil adalah 41,2 kCi. Di dalam bunker, produk akan menjalani mekanisme laluan iradiasi dengan tujuan agar mendapatkan dosis serap iradiasi yang seragam. Bunker menyediakan 72 posisi iradiasi. Di setiap posisi iradiasi, gerakan produk dapat dihentikan untuk jeda waktu tertentu menyesuaikan dosis serap iradiasi yang diinginkan. Waktu minimum bagi produk menyelesaikan mekanisme laluan iradiasi adalah 78,5 menit. Pangujian dosimetri menunjukkan bahwa laju dosis serap untuk opsi pengoperasian aktivitas sumber terkecil adalah 0,22 kGy/jam. Rasio D_{maks}/D_{min} bergantung pada densitas produk. Untuk densitas 0,2, 0,4 dan 0,6 g/cm³, rasio keseragaman dosis masing-masing adalah 1,54, 1,65 dan 1,71. Kombinasi karakterisasi mekanik dan dosimetri mengantarkan pada dosis serap minimum yang mungkin diperoleh sebesar 0,29 kGy. Dengan batasan minimum ini, segala tujuan iradiasi yang membutuhkan lebih besar dari dosis tersebut sangat dimungkinkan menggunakan Iradiator Merah Putih seperti untuk karantina buah segar, pengawetan biji-bijian serelia, buah-buahan kering dan lain-lain. Permasalahan kapasitas produk juga menjadi bahan pertimbangan. Kapasitas produksi iradiasi bergantung berbagai parameter seperti dosis serap iradiasi yang diinginkan dan densitas produk, serta parameter operasional lainnya. Jika dibutuhkan dosis serap iradiasi 400 Gy dan densitas produk 0,4 g/cm³, maka kapasitas produksinya adalah 3,17 ton/jam atau 76 ton/hari. Kapasitas dapat berubah bila parameter operasional Iradiator juga dirubah.

Kata Kunci: iradiator Merah Putih, iradiasi, dosimetri, pangan, pertanian

ABSTRACT

Ari Satmoko, Hyundianto Arif Gunawan, Bonang Sigit Trenggono, and Mujiono. 2018. Characterization and Potential use of Irradiator Red and White for Handling Food Products Agricultural

A gamma irradiator, called Iradiator Merah Putih, has been constructed and loaded with Cobalt-60 sources having a total activity of about 300 kCi. Designed for multi purposes, the Irradiator should be able to provide various low-to-high absorbed doses. The control system allows 4 options for combination of source racks with the smallest activity option is 41.2 kCi. Inside the irradiator bunker, the product to be irradiated will undergo an irradiation source pass mechanism in order to obtain uniform irradiation absorbed dose. The bunker provides as many as 72 irradiation positions. At each position, the product may be stopped for a certain period of delay adjusting the desired irradiation dose. The minimum time for the product to complete the source pass mechanism is 78.5 minutes. The dosimetry test showed that the absorbed dose rate for the smallest source activity operation was 0.22 kGy/hr. The D_{max}/D_{min} ratio depends on the product density. For densities 0.2, 0.4 and 0.6 g/cm³, the dose uniformity ratios were respectively 1.54, 1.65 and 1.71. The combination of both mechanical and dosimetry characterization leads to a minimum absorbed dose of 0.29 kGy. With this minimum restriction, any irradiation objective requiring greater than that dose is possible using the Irradiator Merah Putih such as for fresh fruit quarantine, preservation of cereal grains, dried fruits and others. The Irradiator's throughput is also considered. The irradiation capacity depends on various parameters such as the desired irradiation absorbed dose and the density of the product, as well as other operational parameters. If a 400 Gy of irradiation absorbed dose is required for a product with the density of 0.4 g/cm³, its production capacity is about 3.17 ton/h or 76 ton/day. The capacity may change when irradiator operational parameters are also changed.

Keywords: iradiator Merah Putih, irradiation, dosimetry, food, agriculture

PENDAHULUAN

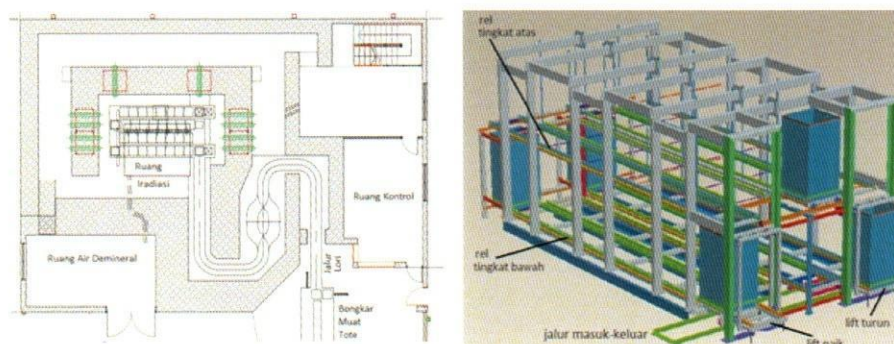
Teknologi iradiasi telah digunakan dalam pemrosesan bahan pangan. Pada umumnya, teknologi iradiasi memanfaatkan sinar pengion seperti sinar gamma, sinar X maupun berkas elektron. Iradiasi bertujuan untuk membunuh kontaminan biologis seperti bakteri patogen, virus, jamur, dan serangga yang dapat membahayakan konsumen. Sinar pengion dapat merusak jaringan tubuh kontaminan biologis secara langsung dengan merusak DNA maupun secara tidak langsung dengan pembentukan radikal bebas dari bahan lain yang terkandung dalam bahan pangan tersebut. Radikal bebas inilah yang kemudian merusak kontaminan biologis. Iradiasi juga dapat mencegah penuaan bahan pangan yang disebabkan karena faktor internal pangan tersebut. Dengan melakukan penundaan pertunasan, secara tidak langsung teknik iradiasi dapat berfungsi untuk memperpanjang masa simpan.

Di Indonesia, komersialisasi bahan pangan iradiasi telah diijinkan berdasarkan peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 701/MENKES/PER/VIII/2009¹. Manfaat dari teknik iradiasi untuk pengawetan bahan pangan telah diakui dalam Peraturan Menteri Kesehatan tersebut. Berbagai bahan pangan telah diijinkan menggunakan iradiasi termasuk untuk produk hasil pertanian. Secara umum, iradiasi bahan makanan dengan dosis rata-rata sampai 10 kGy dianggap aman untuk dikonsumsi manusia. Bahkan dalam beberapa hasil penelitian lebih lanjut, iradiasi dengan dosis yang lebih tinggi yaitu hingga 50 atau 60 kGy ternyata tidak menimbulkan efek-efek racun. Aplikasi sterilisasi iradiasi pada dosis tinggi untuk makanan siap saji berbasis resep tradisional Indonesia sudah diteliti baik dari aspek mikrobiologi, karakteristik fisiko-kimia maupun uji sensorik².

BATAN telah mengembangkan prototip Iradiator Gamma Merah Putih dengan desain kapasitas hingga 2 MCi. Untuk tahap inisialisasi, Iradiator tersebut telah diisi dengan sumber Cobalt-60 dengan aktivitas total sekitar 300 kCi. Fasilitas Iradiator dirancang untuk tujuan multi guna di antaranya adalah untuk pengawetan bahan pangan, fitosanitari, sterilisasi alat-alat kesehatan, dan sebagainya. Dalam keadaan tidak dioperasikan, sumber radioaktif disimpan di dalam kolam air berukuran 3,6x2,8x6,0 m³. Air demineral berfungsi sekaligus sebagai pendingin dan shielding. Pada saat akan dioperasikan, sumber Cobalt-60 diangkat hingga di atas permukaan kolam. Beton berbentuk labirin dengan ketebalan hingga lebih dari 1,8 m berfungsi sebagai *shielding*.

Di ruang bongkar muat, produk yang akan diiradiasi dikemas dan dimasukkan ke dalam kotak tote. Kotak tote ini dikirimkan menggunakan lori yang ditarik dengan rantai oleh motor listrik masuk ke dalam bunker ruang iradiasi³. Akses masuk dan keluar barang melalui pintu yang sama (Lihat Gambar 1). Kotak-kotak tote ini dimasukkan ke dalam ruang iradiasi dan menjalani mekanisme laluan iradiasi di mana kotak-kotak tote berisi produk bergerak menjalani lintasan mengitari sumber radioaktif. Lintasan memiliki dua tingkat dan masing-masing tingkat menyediakan empat jalur. Pergerakan aksial di dalam sebuah jalur, perpindahan antar jalur dan perpindahan tingkat dengan bantuan lift menggunakan mekanisme pneumatik. Sistem pneumatik menggunakan udara bertekanan sebagai media penggerak. Tekanan operasi udara pneumatik sekitar 6 bar.

Iradiator Merah Putih menyediakan 2 moda pengoperasian: *batch* dan *continue* [4]. Moda *batch* lebih cocok digunakan untuk jumlah produk yang sedikit. Untuk produk dengan jumlah volume yang melebihi 4x72 kotak tote lebih cocok menggunakan moda *continue*. Dalam moda *batch*, produk yang akan diiradiasi dimasukkan ke



Gambar 1. Denah ruang iradiasi (kiri) dan struktur lintasan di dalam bunker (kanan)

Figure 1. Irradiation room plan (left) and path way structure in the bunker (right)

dalam bunker terlebih dahulu. Sebanyak 72 kotak tote dapat diiradiasi sekaligus. Setelah produk penuh, sumber radioaktif diangkat. Selanjutnya supaya mendapatkan dosis iradiasi yang seragam, kotak-kotak tote menjalani mekanisme laluan iradiasi dengan cara digeser-geser mengitari sumber radioaktif. Dengan demikian masing-masing kotak tote akan menempati 72 posisi yang berbeda. Semakin lama produk diiradiasi, semakin tinggi dosis serap iradiasi yang diperoleh. Setelah proses iradiasi selesai, sumber radioaktif diturunkan kembali ke dasar kolam. Kotak-kotak tote dikeluarkan dan produk dibongkar.

Di dalam moda *continue*, kotak-kotak tote diisi dengan *dummy* dengan densitas yang sama dengan produk yang akan diiradiasi. Sumber radioaktif diangkat dan satu per satu kotak tote baru berisi produk dimasukkan mengganti kotak tote berisi *dummy*. Begitu seterusnya hingga 72 *dummy* tergantikan dengan produk. Selanjutnya satu per satu kotak tote produk baru masuk dan pada saat bersamaan produk yang telah diiradiasi selesai keluar. Di dalam bunker, setiap kotak tote akan menjalani mekanisme laluan iradiasi yang sama dengan moda *batch*. Proses iradiasi dilanjutkan hingga produk yang akan diiradiasi telah habis.

Untuk tahap inisialisasi ini, Iradiator telah dimuati dengan sumber radioaktif Cobalt-60 dengan aktivitas total 300 kCi yang tersebar ke dalam 29 batang pensil radioaktif. Iradiator Merah Putih didesain untuk multi guna, artinya Iradiator ini harus dapat menyediakan proses iradiasi dari dosis serap rendah hingga tinggi. Dalam kaitan dengan permasalahan inilah, makalah ini menggali karakterisasi Iradiator dalam rangka menggali apakah konstruksi telah sesuai dengan desain yang diinginkan. Potensi penggunaan Iradiator untuk penanganan produk-produk pertanian juga menjadi bahan diskusi.

BAHAN DAN METODE

Fasilitas yang digunakan dalam pengujian ini adalah Iradiator Merah Putih yang selesai dibangun pada bulan Juni 2017. Iradiator berlokasi di Kawasan Puspipstek Serpong – Tangerang Selatan yang dikelola oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional. Iradiator ini telah dimuati dengan Cobalt-60 dengan aktivitas total 300 kCi. Batang-batang sumber tersebut ditempatkan pada rak-rak sumber secara tidak merata dengan harapan dapat menyediakan dosis serap rendah hingga tinggi.

Karakterisasi dosimetri dilakukan dengan mengoperasikan iradiator moda *batch*. Sebanyak 72 kotak tote diisi menggunakan serbuk kayu: 69 kotak tote sebagai *dummy* produk berdensitas 0,2 g/cm³ dan tiga

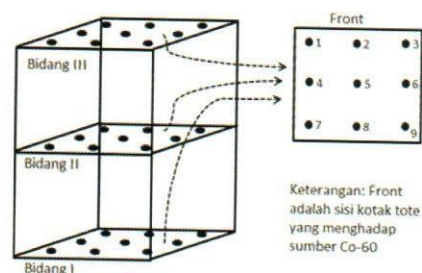
kotak tote sampel uji yang masing-masing berisi serbuk kayu berdensitas 0,2, 0,4 dan 0,6 g/cm³. Kotak tote sampel uji ini dilengkapi dengan dosimeter. Untuk setiap kotak tote, dosimeter yang dipasang berjumlah 27 yang tersusun dalam 3 tingkat atau bidang (bawah, tengah dan atas). Pola posisi pemasangan dosimeter ditunjukkan dalam Gambar 2. Dosimeter yang digunakan adalah *Harwell Amber* tipe 3042-Z. Setelah selesai iradiasi, evaluasi pembacaan dosis serap iradiasi pada dosimeter menggunakan alat ukur UV-Vis *Spectrophotometer* tipe *Double-Beam*, Hitachi U-2000.

Iradiator dioperasikan selama 12 jam. Rak sumber yang diangkat hanya Rak 1. Setelah selesai, bahan-bahan dosimeter dibongkar dan dosis serap iradiasinya diukur. Pengujian dosimetri diulangi sebanyak dua kali dengan cara yang sama namun waktu lama iradiasi menjadi 25,7 dan 38,5 jam.

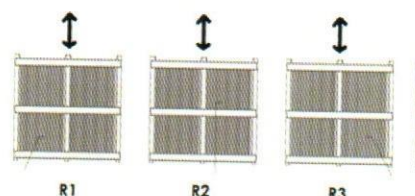
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Mekanik Iradiator Merah Putih

Secara garis besar, bagian utama mekanik Iradiator Merah Putih adalah sistem pengangkat sumber dan sistem transportasi produk yang diiradiasi. Sistem pengangkat sumber berfungsi menaik-turunkan posisi sumber radioaktif. Pada saat tidak dioperasikan, sumber harus berada dan tersimpan di dasar kolam air demineral. Dan pada saat dioperasikan, sumber diangkat hingga di atas kolam. Sistem transportasi produk berperan dalam proses iradiasi dengan cara mendekatkan dan menjauhkan produk dari sumber radioaktif.



Gambar 2. Penempatan posisi dosimeter
Figure 2. Dosimeters position location



Gambar 3. Konfigurasi rak sumber
Figure 3. Source rack configuration

Sumber Cobalt-60 berbentuk batang silinder dengan diameter sekitar 11 mm dan panjang 451 mm. Batang-batang sumber ditempatkan pada sebuah modul sumber. Sebuah modul sumber dapat menampung 41 batang sumber dan atau dummy sumber. Empat buah modul ditempatkan pada sebuah rak sumber dengan konfigurasi 2x2. Rak sumber inilah yang dilengkapi dengan mekanisme pengangkat untuk menaik-turunkan sumber Cobalt-60. Iradiator Merah Putih menyediakan tiga rak sumber R1, R2 dan R3 yang dapat digerakkan secara independen yang berarti masing-masing rak dapat diangkat ke atas kolam secara mandiri (lihat Gambar 3).

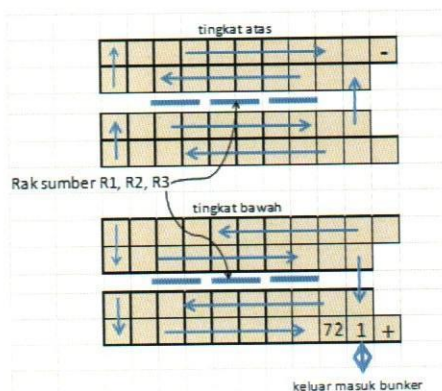
Karena ketiga rak dapat diangkat secara independen, maka dimungkinkan berbagai kombinasi rak. Dari berbagai pilihan yang ada berikut kombinasi yang disediakan oleh sistem kontrol⁴:

- Opsi 1: R1 (hanya Rak 1 diangkat)
- Opsi 2: R1-R3 (Rak 1 dan Rak 3 diangkat)
- Opsi 3: R2 (hanya Rak 2 diangkat)
- Opsi 4: R1 R2 R3 (semua rak diangkat)

Pilihan konfigurasi rak mana yang dipilih ditentukan oleh kebutuhan besar kecilnya dosis radiasi.

Ketika rak sumber telah diangkat, produk iradiasi diangkat dengan kotak tote masuk ke dalam bunker. Produk tersebut akan mendekati dan menjauhi posisi sumber radioaktif dengan menjalani mekanisme laluan iradiasi (lihat Gambar 4)⁵.

Begitu masuk ke dalam bunker, kotak tote memasuki mekanisme laluan iradiasi di tingkat bawah (posisi 1), namun langsung dikirimkan ke tingkat atas menggunakan semacam lift sehingga berpindah ke posisi 2. Di tingkat atas, kotak tote akan menjalani lintasan mulai dari jalur 1, pindah ke jalur 2, 3 dan 4. Selanjutnya kotak tote akan turun ke tingkat bawah dengan lift lain dan selanjutnya melintasi jalur 4, pindah ke jalur 3, 2 dan 1. Di posisi 72, kotak tote siap digeser ke posisi 1



Gambar 4. Mekanisme laluan iradiasi
Figure 4. Source pass mekanisme

dan dikeluarkan dari bunker setelah selesai menjalani proses iradiasi. Gerakan kotak tote dipenuhi oleh sistem pneumatik.

Tujuan dari mekanisme laluan iradiasi adalah agar semua produk dalam kotak tote mengalami posisi-posisi iradiasi simetris terhadap lokasi rak sumber. Dengan demikian diharapkan semua produk dalam kotak tote mendapatkan dosis serap iradiasi yang seragam. Di dalam bunker terdapat 84 posisi kotak tote, namun hanya 72 posisi yang merupakan posisi iradiasi. Selebihnya berupa posisi-posisi transit atau sementara. Dengan demikian sekali iradiasi, bunker iradiasi dapat memuat sebanyak 72 kotak tote. Di setiap posisi iradiasi, gerakan kotak tote dapat dihentikan untuk jangka waktu tertentu. Jangka waktu inilah yang akan menentukan dosis serap iradiasi. Untuk berpindah dari satu posisi iradiasi ke posisi iradiasi berikutnya, mekanisme laluan iradiasi membutuhkan waktu minimum. Waktu minimum ini disebut dengan waktu siklus: waktu yang dibutuhkan agar semua kotak tote berpindah dari satu posisi iradiasi ke posisi iradiasi berikutnya.

Waktu siklus menjadi parameter penting dalam proses iradiasi, karena menentukan dosis serap iradiasi minimum dalam pengoperasian Iradiator Merah Putih. Untuk menentukan waktu siklus, Iradiator dioperasikan dan waktu perpindahan kotak tote dalam mekanisme laluan iradiasi dicatat. Pengukuran waktu siklus dilakukan berulang kali dengan hasil sebagai berikut: 65,3; 65,4; 65,1; 65,3 dan 65,3 detik. Dari data tersebut diperoleh bahwa rata-rata waktu siklus adalah 65,3 detik dan maksimum 65,4 detik. Karena setiap kotak tote akan menempati 72 posisi iradiasi, maka produk akan mengalami iradiasi selama minimum 4.708,8 detik atau 78,5 menit. Parameter waktu ini akan menjadi penting untuk penerimaan dosis serap minimum yang juga akan tergantung pada aktivitas sumber radioaktif yang digunakan. Waktu dan dosis serap maksimum tidak dibatasi karena pada setiap posisi iradiasi dapat ditambahkan waktu jeda tanpa batasan sesuai kebutuhan.

Konfigurasi sumber radioaktif

Untuk inisiasi awal, Iradiator Merah Putih diisi dengan sumber Cobalt-60 beraktivitas 300 kCi. Aktivitas tersebut dipenuhi oleh sebanyak 29 batang Cobalt-60 yang masing-masing batang memuat aktivitas antara 10 hingga 11 kCi⁶.

Idealnya untuk alasan keseragaman dosis dan juga efisiensi, semua sumber radioaktif ditempatkan di rak tengah. Namun, karena Iradiator ini didesain multi guna, maka Iradiator harus memungkinkan untuk penggunaan dosis serap iradiasi rendah hingga tinggi. Untuk alasan inilah, maka batang-batang sumber disebar pada ketiga

Karakterisasi dan Potensi Penggunaan Iradiator Merah Putih untuk Penanganan Produk Pangan Hasil Pertanian
(Ari Satmoko *et al*)

rak secara tidak merata. Sedapat mungkin, batang-batang sumber ditempatkan secara simetrik terpusat ke tengah. Dari berbagai kombinasi penempatan batang-batang sumber pada rak-rak tersebut, akhirnya diputuskan menggunakan konfigurasi 4-21-4. Artinya, 4 batang ditempatkan pada rak kiri (R3) dengan masing-masing aktivitas: 10,327, 10,382, 10,206 dan 10,334 kCi atau total 41,249 kCi. Dan 4 batang ditempatkan pada rak kanan (R1) dengan masing-masing aktivitas 10,254, 10,281, 10,354 dan 10,334 kCi atau total 41,223 kCi. Sumber Cobalt-60 lainnya sejumlah 21 batang ditempatkan pada rak tengah (R2) dengan aktivitas total 219,041 kCi. Karena dimungkinkan pengoperasian aktivitas sumber dengan 4 opsi, maka diperoleh aktivitas masing-masing opsi sebesar: 41,249 kCi (Opsi 1), 82,482 kCi (Opsi 2), 219,041 kCi (Opsi 3), dan 301,513 kCi (Opsi 4). Opsi pertama dan kedua ditujukan untuk penggunaan dosis

serap iradiasi rendah sedangkan opsi 3 dan 4 digunakan untuk dosis serap iradiasi tinggi. Pilihan konfigurasi rak mana yang dipilih ditentukan oleh kebutuhan besar kecilnya dosis serap iradiasi.

Karakteristik dosimetri

Seperti yang diuraikan dalam Bahan dan Metode, karakterisasi dilakukan dengan mengoperasikan iradiator moda batch. Sekali pengoperasian, sebanyak 72 kotak tote diisi menggunakan serbuk kayu: 69 kotak tote produk dummy dengan densitas 0,2 gr/cm³ dan 3 kotak tote sampel uji dengan densitas berbeda. Idealnya, sekali pengoperasian membutuhkan 72 kotak tote dummy dengan densitas yang seragam. Ini berarti, pengujian ideal membutuhkan masing-masing sebanyak 72 kotak tote atau sekitar 14,4 m³ dengan produk yang

Tabel 1. Dosis serap setelah 12,8, 25,7 dan 38,5 jam iradiasi
Table 1. Absorbed doses after 12,8, 25,7 and 38,5 hours of irradiation time

Lama iradiasi (jam)/ <i>Irradiation time (hours)</i>	Densitas/ Density (g/cm ³)	Level bidang/ <i>field level</i>	Dosis serap iradiasi per titik/ <i>absorption dose of irradiation per point (kGy)</i>								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
12,8	0.2	I	2,88	3,42	2,90	2,64	2,81	2,57	2,71	3,70	2,81
		II	2,86	3,15	2,86	2,74	2,76	2,76	2,88	3,12	2,90
		III	3,12	3,85	3,25	2,93	2,95	2,98	3,35	3,72	3,27
	0.4	I	2,90	3,25	2,69	2,43	2,64	2,50	2,69	3,52	2,66
		II	2,62	2,88	2,71	2,63	2,45	2,60	2,76	2,93	2,86
		III	3,05	3,95	3,22	2,88	2,93	3,00	3,35	3,90	3,30
	0.6	I	2,64	2,98	2,66	2,21	2,31	2,24	2,50	3,42	2,69
		II	2,57	2,64	2,64	2,31	2,28	2,26	2,64	2,78	2,54
		III	2,98	3,70	3,08	2,69	2,64	2,76	3,35	3,57	3,15
25,7	0.2	I	5,82	6,63	5,63	5,04	5,55	5,15	5,61	7,22	5,66
		II	5,74	6,13	5,82	5,34	5,39	5,50	5,61	6,15	5,74
		III	6,40	7,92	6,68	6,02	6,04	6,10	6,94	7,83	6,49
	0.4	I	5,74	6,57	5,47	4,78	5,15	4,78	5,23	6,91	5,39
		II	5,42	5,66	5,53	4,91	4,78	4,96	5,34	5,82	5,36
		III	6,13	7,63	6,29	5,66	5,50	5,66	6,74	7,39	6,24
	0.6	I	5,44	6,13	5,10	4,26	4,49	4,44	5,15	6,85	5,31
		II	5,12	5,28	5,18	5,13	4,70	5,14	5,26	5,47	5,12
		III	6,18	7,45	6,49	5,58	5,53	5,82	6,80	7,42	6,32
38,5	0.2	I	8,81	9,62	8,48	7,48	8,07	7,54	8,01	10,46	8,36
		II	8,48	8,91	8,48	7,80	8,09	7,95	8,33	8,78	8,36
		III	9,40	11,67	9,62	8,75	9,22	10,59	9,15	10,49	8,82
	0.4	I	8,42	9,28	8,18	6,82	7,51	7,08	7,65	10,29	8,07
		II	7,95	8,42	8,12	7,80	6,97	7,25	7,57	8,51	7,92
		III	9,09	11,16	9,31	8,45	8,63	9,21	11,81	9,78	8,58
	0.6	I	7,98	9,28	7,71	6,46	6,77	6,49	7,45	9,94	7,25
		II	7,77	7,63	7,54	6,50	6,66	6,57	7,60	7,89	7,57
			8,81	10,95	9,18	7,89	8,25	9,56	9,97	9,78	8,44

berdensitas 0,4 dan 0,6 gr/cm³. Namun karena kendala biaya, pengujian seperti ini belum dapat dilaksanakan. Kotak tote sampel uji dengan densitas 0,4 dan 0,6 gr/cm³ diselipkan di antara kotak-kotak tote *dummy* yang berdensitas 0,2 gr/cm³. Meski ini kurang ideal, namun berdasarkan pengalaman dosimetri dengan fasilitas iradiator lain, perbedaan parameter seperti ini tidak mengurangi kualitas analisis dosimetri secara umum.

Rak sumber yang diangkat hanya Rak 1 dengan aktivitas 41,249 kCi (Opsi 1). Setelah selesai, bahan-bahan dosimeter dibongkar dan dosis serap iradiasinya diukur. Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran dosis serap iradiasi.

Salah satu parameter karakteristik dari iradiator adalah rasio keseragaman dosis (perbandingan antara dosis maksimum dan dosis minimum, Dmaks/Dmin). Hasil evaluasi pengujian memberikan rasio rata-rata untuk masing-masing densitas produk 0,2, 0,4 dan 0,6 g/cm³ adalah 1,54, 1,65 dan 1,71. Secara umum tidak ada pengaruh lama waktu iradiasi terhadap rasio keseragaman dosis. Hal ini bersifat wajar karena rasio tidak dipengaruhi oleh parameter waktu. Hasil di atas juga menunjukkan secara jelas bahwa rasio keseragaman dosis semakin buruk bila densitas produk semakin tinggi. Fenomena ini juga merupakan hal yang wajar karena sinar gamma banyak yang diserap oleh produk berdensitas tinggi, sehingga energi gamma yang diteruskan ke bagian lain juga menjadi lebih kecil.

Dalam sebuah produk iradiasi, dosis minimum dan dosis maksimum merupakan parameter penting. Dosis minimum menjamin bahwa kondisi telah terpenuhi untuk maksud-maksud tertentu seperti membunuh telur, larva ataupun mikroorganisme lainnya. Namun bila rasio keseragaman dosis sangat buruk maka sebagian produk tersebut juga menerima dosis maksimum yang relatif tinggi. Dosis yang terlalu tinggi dapat berakibat buruk karena dapat mengubah atau merusak kandungan nutrisi produk tersebut. Kriteria Dmin dan Dmaks bergantung pada produk yang akan diiradiasi.

Parameter penting lain dari iradiator adalah laju dosis serap. Laju dosis diperoleh dengan membagi dosis serap yang diterima produk dengan waktu iradiasi. Secara umum, laju dosis tidak dipengaruhi oleh lama iradiasi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk densitas 0,2, 0,4 dan 0,6 g/cm³, laju dosis serap masing-masing adalah 0,23, 0,22 dan 0,21 kGy/jam (lihat Tabel 2). Data tersebut menunjukkan bahwa kenaikan densitas memberikan kecenderungan penurunan laju dosis serap, walaupun tidak begitu signifikan. Rata-rata laju dosis serap adalah 0,22 kGy/jam.

Potensi penerapan pada pasca panen produk pertanian

Dengan aktivitas 41,2 kCi, laju dosis serap rata-rata adalah 0,22 kGy/jam. Aktivitas ini diperoleh dengan hanya mengangkat rak sumber R1. Dengan menganggap hubungan linier antara aktivitas dan laju dosis, maka laju dosis untuk berbagai kombinasi pengangkatan rak sumber dapat diprediksi (lihat Tabel 3). Karena lama minimum proses iradiasi adalah 78,5 menit, maka dosis serap iradiasi minimum dapat diprediksi. Untuk pengoperasian Opsi 1, dengan laju dosis 0,22 kGy/jam, maka dosis serap minimum diprediksi sebesar 0,29 kGy. Dengan cara serupa dosis serap minimum untuk pengoperasian Opsi 2, 3 dan 4 masing-masing adalah 0,59, 1,56 dan 2,15 kGy.

Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 701/MENKES/PER/VIII/2009 tentang Pangan Iradiasi¹ memberikan petunjuk dosis serap maksimum yang diperbolehkan untuk berbagai produk pangan. Berdasarkan Permenkes tersebut, satu-satunya produk pertanian yang tidak dapat diperlakukan menggunakan Iradiator Merah Putih adalah pada umbi-umbian untuk menghambat pertunasan. Dosis maksimum yang diperbolehkan adalah 0,15 kGy. Sementara Iradiator Merah Putih tidak bisa memenuhi kriteria tersebut karena dosis serap minimum yang mungkin diperoleh adalah 0,29 kGy.

Untuk sayur dan buah segar selain umbi di atas, dengan berbagai tujuan iradiasi Permenkes memberikan batasan maksimum antara 1,0 hingga 2,5 kGy. Khusus untuk perlakuan karantina, selain dosis maksimum

Tabel 2. Laju dosis serap

Table 2. Absorbed dose rate

No	Densitas/ <i>Density</i> (g/ cm ³)	Laju dosis/ <i>dose rate</i> (kGy/jam)			
		Lama iradiasi (jam)/ <i>irradiation time (hours)</i>			Rerata/ <i>Average</i>
		12,8	25,7	38,5	
1	0,2	0.24	0.24	0.23	0.23
2	0,4	0.23	0.22	0.22	0.22
3	0,6	0.21	0.22	0.21	0.21

Tabel 3. Laju dosis dan dosis serap minimum berbagai opsi pengoperasian

Table 3. Dose rate and minimum absorbed dose for different options of operation

No	Opsi operasi	Aktivitas (kCi)	Laju dosis rerata (kGy/jam)	Dosis serap minimum (kGy)
1	R1	41,249	0.22	0.29
2	R1+R3	82,482	0.45	0.59
3	R2	219,041	1.19	1.56
4	R1+R2+R3	301,513	1.64	2.15

tersebut, dosis minimum juga diterapkan untuk membasmi organisme pengganggu tumbuhan (lalat buah) sebesar 0,15 kGy. Jika menengok pada karakteristik dosimetri sebelumnya, Iradiator Merah Putih dapat dimanfaatkan untuk tujuan ini karena dapat memenuhi kriteria tersebut dengan menggunakan aktivitas Opsi 1 dan atau Opsi 2. Dengan asumsi densitas produk 0,4 g/cm³, maka rasio keseragaman dosis berada pada angka sekitar 1,65. Ini berarti bila dosis maksimum diterapkan pada 1 kGy maka dosis minimum menjadi sekitar 0,61 kGy. Dosis serap ini memenuhi kriteria minimum untuk membasmi lalat buah sebesar 0,15 kGy.

Masih merujuk pada Permenkes, untuk produk olahan sayur dan buah dengan tujuan memperpanjang masa simpan, Permenkes merekomendasikan dosis maksimum 7,0 kGy. Dosis serap ini dapat diperoleh secara efisien dengan mengoperasikan Iradiator menggunakan aktivitas Opsi 3 maupun Opsi 4.

Selain Permenkes yang mengatur pemakaian teknik iradiasi untuk bahan pangan, Badan POM juga menerbitkan dokumen cara iradiasi yang baik^{7,8}. Pada biji-bijian serelia, serangga yang menjadi hama pada umumnya adalah Coleoptera (kumbang), Lepidoptera (ngengat) dan Arachimida (tungau). Tingkat ketahanan terhadap radiasi dari masing-masing organisme tersebut berbeda-beda. Untuk menjamin letalitas dalam 24 jam, diperlukan dosis serap 3-5 kGy. Namun, untuk membasmi serangga pada sereal ini cukup dilaksanakan pada dosis serap iradiasi 0,5 kGy. Pada dosis serap ini, serangga akan steril dan mati dalam beberapa minggu serta akan mengalami penurunan kemampuan makan. Dosis serap sebesar 0,5 kGy untuk mengurangi potensi kerusakan akibat serangga pada biji-bijian serelia ini dapat dicukupi dengan aktivitas Iradiator Opsi 1.

Untuk penundaan kematangan pisang, umumnya digunakan dosis serap antara 200 sampai 400 Gy⁸. Penundaan maksimum kematangan akan terjadi pada buah yang kurang matang saat panen. Hampir semua varietas yang telah dicoba tidak toleran terhadap dosis serap lebih dari 500 Gy. Dosis sebesar ini menyebabkan perubahan sifat fisik pisang seperti warna, keutuhan kulit atau teksturnya. Artinya untuk pisang, harus diterapkan dosis minimum dan maksimum. Dosis maksimum adalah 500 Gy sedangkan dosis minimum untuk penundaan pematangan bervariasi antara dapat 200-400 Gy bergantung pada varietas pisang. Persyaratan ini dapat dicukupi oleh Iradiator Merah Putih hanya dengan aktivitas Opsi 1. Waktu iradiasi cukup diatur sesingkat mungkin.

Untuk keperluan ekspor, hasil-hasil produk pertanian harus mendapat perlakuan fitosanitari yang ditetapkan oleh masing-masing negara tujuan. Sebagai contoh,

pemerintah Australia menetapkan teknik iradiasi sebagai perlakuan karantina untuk menerima buah mangga segar dari negara-negara lain⁹. Dosis serap minimum sebesar 400 Gy direkomendasikan sebagai perlakuan yang efektif untuk tujuan fitosanitari mangga. Para petani ataupun eksportir buah mangga dapat memanfaatkan Iradiator Merah Putih untuk memasuki pasar Australia. Dengan pengoperasian aktivitas Opsi 1 atau Opsi 2, dosis serap minimum sebesar 400 Gy dapat tercukupi.

Berbagai penelitian tentang pangan iradiasi telah dilakukan dan terus berkembang. Besar kecilnya dosis serap iradiasi yang dibutuhkan bergantung pada produk yang akan diiradiasi dan tujuan teknik iradiasi. Buah mangga masih terus diteliti dengan varietas, daerah serta serangga berbeda yang berpotensi sebagai hama. Dari hasil uji mortalitas, dosis 0,75 kGy mampu membunuh lalat buah hingga mencapai mortalitas 100%¹⁰. Aplikasi teknik iradiasi pada simplisia kulit batang mahkota dewa juga menjadi obyek penelitian. Iradiasi pada dosis 5 sampai dengan 7,5 kGy merupakan pilihan terbaik untuk menurunkan angka cemaran bakteri dan kapang/khamir pada simplisia kulit batang mahkota dewa tanpa menurunkan kualitas simplisia¹¹.

Secara umum, dosis serap iradiasi yang dibutuhkan baik untuk pengawetan maupun untuk memperpanjang masa simpan produk-produk pangan hasil pertanian bervariasi dari dosis rendah hingga dosis tinggi. Iradiator Merah Putih mampu menjawab hampir semua kebutuhan dosis yang diinginkan tersebut, terkecuali untuk menghambat pertunasan selama penyimpanan seperti misalnya pada umbi kentang dan umbi akar.

Di samping permasalahan kecukupan dosis serap iradiasi, permasalahan kapasitas produk Iradiator Merah Putih juga menjadi bahan pertimbangan. Kapasitas produksi iradiasi bergantung banyak parameter seperti dosis serap iradiasi yang diinginkan, densitas produk yang diiradiasi, opsi rak sumber yang dipilih, dan sebagainya. Sebagai ilustrasi, usaha ekspor mangga ke Australia dapat menjadi bahan evaluasi. Untuk keperluan fitosanitari, dibutuhkan dosis serap iradiasi minimum 400 Gy. Dosis ini dapat dicukupi dengan pengoperasian Iradiator Opsi 1 dengan waktu iradiasi sekitar 109 menit. Dengan kemasan cenderung longgar, densitas mangga diperkirakan 0,4 gr/cm³ (bergantung pada cara mengemas). Dengan beranggapan volume tinggi dan pengoperasian moda continue, maka kapasitas produksi Iradiator menjadi 0,4x14,4/(109/60) kg/jam atau 3,17 ton/jam atau 76 ton/hari.

Namun sebenarnya, ketika hanya Rak 1 saja yang diangkat, sumber radioaktif di Rak 3 juga tetap meluruh. Dengan demikian, penggunaan opsi 2 dengan mengangkat sekaligus Rak 1 dan Rak 3 juga berpotensi lebih

ekonomis. Dalam hal ini, laju dosis menjadi 0,45 kGy/jam. Dengan mengoperasikan waktu iradiasi minimum 78,5 menit, maka dosis yang diterima oleh mangga menjadi 0,59 kGy/jam, masih di bawah batas maksimum yang diijinkan. Kapasitas produksi pun meningkat menjadi $0,4 \times 14,4 / (78,5 / 60)$ kg/jam atau 4,40 ton/jam atau 105,7 ton/hari. Dibandingkan dengan pengoperasian Opsi 1, penggunaan rak Opsi 2 menghasilkan kapasitas produk yang lebih besar, dengan catatan dosis serap yang dihasilkan juga menjadi lebih tinggi. Selama dosis serap ini dapat diterima maka Pengoperasian Opsi 2 dipastikan lebih ekonomis dari Opsi 1.

Ilustrasi ekspor mangga menggambarkan bahwa kapasitas produksi Iradiator Merah Putih bervariasi tergantung dari berbagai parameter pengoperasian iradiator. Parameter yang paling dominan adalah aktivitas sumber yang diaktifkan, dosis serap iradiasi dan densitas produk. Dengan kasus dan parameter operasi berbeda, kapasitas produksi pun menjadi berbeda.

KESIMPULAN

Iradiator Gamma Merah Putih telah dimuati dengan sumber Cobalt-60 berkapasitas total sekitar 300 kCi. Dari tiga rak sumber yang dapat digerakkan secara independen, sistem kontrol menyediakan 4 opsi kombinasi rak-rak sumber dengan opsi aktivitas terkecil adalah 41,249 kCi. Hasil karakterisasi dosimetri menunjukkan bahwa laju dosis serap untuk opsi tersebut adalah 0,22 kGy/jam. Rasio D_{maks}/D_{min} bergantung pada densitas produk. Untuk densitas 0,2, 0,4 dan 0,6 g/cm³, rasio keseragaman dosis masing-masing adalah 1,54, 1,65 dan 1,71. Karakterisasi mekanik mengantarkan pada dosis serap minimum yang mungkin diperoleh sebesar 0,29 kGy. Dengan batasan minimum ini, segala tujuan iradiasi yang membutuhkan lebih besar dari dosis tersebut sangat dimungkinkan menggunakan Iradiator Merah Putih seperti karantina buah segar, pengawetan biji-bijian serelia, buah-buahan kering dan lain-lain. Namun untuk dosis sangat rendah, misalnya dalam rangka menghambat pertunasan pada umbi-umbian dengan dosis 0,15 kGy, penggunaan Iradiator tidak memungkinkan.

Kapasitas produksi iradiasi bergantung berbagai parameter seperti dosis serap iradiasi yang diinginkan dan densitas produk yang diiradiasi, serta parameter operasional lainnya. Jika dibutuhkan dosis serap iradiasi 400 Gy dan densitas produk 0,4 gr/cm³, maka kapasitas produksinya adalah 3,17 ton/jam atau 76 ton/hari. Kapasitas dapat berubah dengan mengubah parameter operasional Iradiator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan ini merupakan bagian dari Proyek Pembangunan Prototip Iradiator yang didanai oleh DIPA PRFN-BATAN tahun anggaran 2015-2017. Ucapan terima kasih ditujukan kepada Tim Iradiator dari PRFN, PAIR dan Satuan Kerja lainnya yang turut berpartisipasi dalam kegiatan Iradiator ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. -----, Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia tentang Pangan Iradiasi, Nomor 701/MENKES/PER/VIII/2009, 2009
2. Zubaidah Irawati, Pengembangan Teknologi Nuklir Untuk Meningkatkan Keamanan Dan Daya Simpan Bahan Pangan, Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, Vol. 3 No. 2, Desember 2007.
3. -----, Main Features of the Facility: Servo Type Multipurpose Gamma Irradiator BATAN, Izotop – Institute of Isotopes Co., Ltd, April 2015
4. -----, Preliminary Operation And Maintenance Manual For Tbi-8250-140 Type Tote Box Gamma Irradiator 2017 installed at Jakarta, Volume 2, Izotop – Institute of Isotopes Co., Ltd, Ref.N. ST1546-2016K, 2017
5. Ari Satmoko dan Hyundianto Arif Gunawan, Sistem Pneumatik Mekanisme Lualan Iradiasi Pada Iradiator Merah Putih, Prima, Vol. 14 No. 1, Juni 2017, ISSN: 1411-0296
6. -----, Laporan Loading-unloading Co-60 pada Iradiator, PT. Gamma Mitra Lestari, 2017
7. -----, Cara Iradiasi yang Baik untuk Membasmi Serangga pada Biji-bijian Serelia, Direktorat Standardisasi Produk Pangan Deputi Bidang Pengawasan Keamanan Pangan Dan Bahan Berbahaya, Badan Pengawas Obat Dan Makanan Republik Indonesia, 2004, ISBN 979-98509-4-0
8. -----, Cara Iradiasi Yang Baik Untuk Memperpanjang Masa Simpan Pisang, Mangga Dan Pepaya, Direktorat Standardisasi Produk Pangan Deputi Bidang Pengawasan Keamanan Pangan Dan Bahan Berbahaya, Badan Pengawas Obat Dan Makanan Republik Indonesia, 2004, ISBN 979-98509-1-6.
9. -----, Final Report for the Non-regulated Analysis of Existing Policy for Fresh Mango Fruit from Indonesia, Thailand and Vietnam, Australian Government Department of Agriculture and Water Resources, November 2015.
10. Cicih Sugiati, Kajian Pengaruh Iradiasi Sinar Gamma Terhadap Mortalitas Lalat Buah Dan Mutu Buah Mangga Gedong (*Mangifera Indica*. L) Selama Penyimpanan, Tesis Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor Bogor, Juli 2012

Karakterisasi dan Potensi Penggunaan Iradiator Merah Putih untuk Penanganan Produk Pangan Hasil Pertanian
(Ari Satmoko *et al*)

11. Hendig Winarno, Wisnurahadi, Swasono R. Tamat dan Ermin Katrin W., Dosis radiasi Optimum Pada Pengawetan Simplisia Kulit Batang Mahkota Dewa (*Phaleria Macrocarpa* (Scheff) Boerl.) Sebagai Antikanker, Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, Vol. 6 No. 1 Juni 2010, ISSN: 1907-0322