

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Partikel beta merupakan partikel negatif dan memiliki massa yang sangat kecil, suatu partikel subatomik yang terlempar dari inti atom yang tidak stabil. Partikel beta dan elektron memiliki muatan listrik negatif tunggal e^- ($1,6 \times 10^{-19}$ C) dan memiliki massa yang sangat kecil ($5,5 \times 10^{-4}$ atomic mass unit) atau hanya berkisar 1/2000 dari massa neutron atau proton (Wikipedia^a, 2013).

Radiasi beta yang berasal dari sumber radioaktif yang terbungkus, berpotensi besar memberikan dosis pada kulit, karena jangkauannya lebih rendah dibandingkan radiasi gamma yang dikenal dengan dosis tara Hp(0,07) (Anonymous, 2010). Terdapat tiga sumber beta yang umum digunakan dalam bidang industri, yaitu Kr-85, Sr-90/Y-90 dan Pm-147. Krypton (Kr-85) adalah sumber yang memiliki energi menengah. Strontium dan Yttrium (Sr-90/Y-90) adalah sumber beta energi tertinggi yang umum digunakan (Wurdiyanto, 2005).

Dalam menentukan paparan dan dosis kedalaman dari radiasi beta maka digunakan sebuah material Mylar dan PMMA sebagai aplikasi dari kulit manusia. Hal ini dapat digunakan sebagai informasi laju dosis beta bagi para pekerja yang bekerja dalam bidang radiasi, semisal pada industri kertas yang mengukur ketebalan kertas dengan memanfaatkan radiasi beta (Nazaroh dan Tuti, 2011).

Untuk menganalisa paparan radiasi beta digunakan detektor beta primer yang biasa disebut *Bohm Extrapolation Chamber* yang dirangkai dengan Elektrometer presisi tinggi. Di PTKMR-BATAN mempunyai fasilitas kalibrasi beta dengan sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 yang belum ditentukan atau diukur paparan radiasinya serta karakteristik lainnya.

Berdasarkan penjelasan diatas maka akan dilakukan penelitian yang berjudul “Pengukuran Paparan dan Dosis Kedalaman Radiasi Beta dengan Menggunakan *Bohm Extrapolation Chamber* “ menggunakan bahan radioaktif $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ dan ^{85}Kr sebagai sumber radiasi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang dapat diteliti adalah :

1. Pengukuran laju paparan beta dari sumber radioaktif dengan variasi jarak dan fungsi sudut?
2. Pengukuran dosis kedalaman dengan meterial Mylar atau PET (Polyethylene terephthalate) dan PMMA (Polymethyl methacrylate)?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian yang akan dilakukan adalah

1. Pengukuran laju paparan radiasi beta dengan variasi jarak dan fungsi sudut
2. Menentukan dosis kedalaman dengan meterial Mylar atau (Polyethylene terephthalate) dengan ketebalan 10 μm dan PMMA (Polymethyl methacrylate) dengan ketebalan 0,5 mm sebagai aplikasi kulit manusia dengan $H_p(0,07)$

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian dari Tugas Akhir yang akan dilakukan adalah

1. Untuk menganalisis laju paparan berdasarkan variasi jarak dan fungsi sudut
2. Untuk menganalisis dosis kedalaman radiasi beta dengan menggunakan *Bohm Extrapolation Chamber*

1.5 Manfaat Penelitian

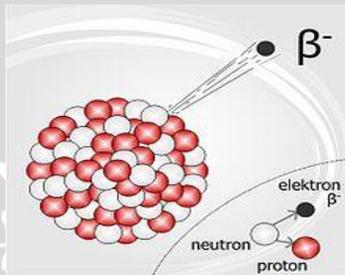
Manfaat dari penelitian ini adalah Diperoleh karakteristik sumber radiasi beta meliputi laju paparan dan dosis kedalaman kulit $H_p(0,07)$.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Partikel beta

Partikel beta merupakan partikel negatif dan memiliki massa yang sangat kecil, suatu partikel subatomik yang terlempar dari inti atom yang tidak stabil. Partikel beta dan elektron memiliki muatan listrik negatif tunggal e^- ($1,6 \times 10^{-19}$ C) dan memiliki massa yang sangat kecil ($5,5 \times 10^{-4}$ *atomic mass unit*) atau hanya berkisar 1/2000 dari massa neutron atau proton.



Gambar 2.1 Pembentukan Partikel Beta (Wikipedia^a, 2013).

Partikel beta memiliki daya tembus yang jauh lebih tinggi dari partikel alpha. Daya tembus partikel beta untuk menembus jaringan bergantung pada energi yang dimiliki partikel tersebut. Partikel beta berenergi tinggi mampu menjangkau 1 meter di udara dan dapat menembus lapisan kulit luar beberapa milimeter. Partikel beta dapat dihentikan oleh selembar kertas. Beberapa partikel beta juga dapat dihentikan dengan kulit manusia, tetapi beberapa membutuhkan perisai tebal (seperti kayu) untuk menghentikan radiasi. Sama seperti partikel alpha, partikel beta juga dapat menyebabkan kerusakan serius pada kesehatan manusia jika mereka terhirup atau tertelan. Efek kesehatan radiasi dapat menjadi ringan, seperti kemerahan pada kulit, atau sangat serius, seperti kanker kulit. Paparan dosis radiasi yang sangat besar dapat menyebabkan gejala yang biasa disebut dengan sindrom akut radiasi atau penyakit radiasi, biasanya disebabkan ketika banyak tubuh manusia yang terkena radiasi dosis tinggi selama beberapa menit. Penyinaran langsung dari

partikel beta adalah berbahaya karena paparan dari pemancar beta yang kuat bisa memanaskan atau bahkan membakar kulit (Arif, 2012).

Ada dua sumber partikel beta, yaitu sumber partikel beta berenergi tinggi dan berenergi rendah. Sumber partikel beta yang berenergi tinggi digunakan untuk menentukan kepadatan rokok dan ketebalan kertas karton. Sedangkan sumber partikel beta berenergi rendah digunakan untuk menentukan ketebalan kertas dan plastik.

Interaksi partikel beta dengan materi melibatkan suatu pemindahan energi dari partikel dalam materi. Pada interaksi partikel beta dengan materi mengakibatkan adanya ionisasi, eksitasi, dan absorpsi.

Ionisasi adalah dimana setiap partikel bermuatan yang tereksitasi dengan materi akan menimbulkan ion, karena pada setiap lintasan dalam materi yang dikenai akan meninggalkan pasangan ion positif dan negatif sehingga akan menimbulkan ionisasi. Ionisasi yang dihasilkan oleh radiasi beta yang bermuatan negatif lebih sedikit bila dibandingkan dengan partikel alpha yang bermuatan positif. Radiasi beta yang berinteraksi dengan materi akan menghasilkan 60-7000 pasangan ion per centimeter panjang lintasannya, jauh lebih sedikit bila dibandingkan dengan lintasan radiasi alpha. Ionisasi spesifik bernilai besar untuk partikel beta berenergi rendah, selanjutnya berkurang secara cepat untuk energi yang makin besar, hingga mencapai minimum pada energi sekitar 1 MeV. Ionisasi spesifik ini perlahan-lahan naik untuk energi lebih besar dari 1 MeV (Wardhana, 2007).

Eksitasi adalah proses yang terjadi ketika zarah radiasi yang bermuatan berinteraksi dengan materi sehingga menimbulkan perubahan pada struktur atom atau dalam keadaan *exited state*. Pada radiasi beta, peristiwa eksitasi bisa terjadi karena pengaruh adanya peristiwa *stopping power* yang menyebabkan energi radiasi beta menghilang disepanjang lintasannya. Energi radiasi beta hilang ini menyebabkan atom-atom yang ada disepanjang lintasan radiasi beta juga terganggu (Wardhana, 2007).

Absorpsi adalah peristiwa terserapnya partikel radiasi oleh suatu bahan yang terkena radiasi. Peristiwa absorpsi ini ada radiasi yang terserap seluruhnya oleh materi, ada yang hanya sebagian

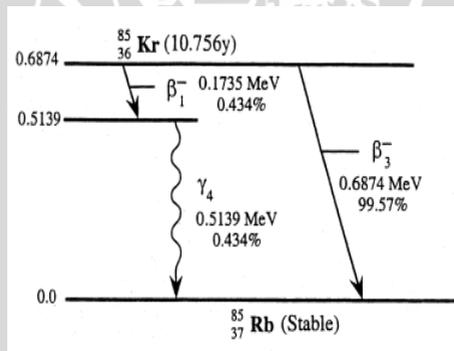
terserap oleh materi dan sisanya ada yang diteruskan keluar dari materi (Wardhana, 2007).

2.2 Karakteristik Sumber Radioaktif

Ada tiga sumber beta yang umum digunakan dalam bidang industri, yaitu Kr-85 dan Sr-90/Y-90.

2.2.1 Kripton-85 (Kr-85)

Kripton-85 merupakan radionuklida yang memiliki inti tidak stabil. Kripton-85 merupakan sekelompok elemen yang dikenal sebagai gas mulia. Gas-gas mulia lainnya adalah helium, neon, argon, xenon, dan radon. Dalam kondisi normal, kripton tidak berwarna, berasa, tidak berbau gas. Densitas pada suhu normal dan tekanan adalah sekitar 0,5 ons per galon (3,7 g/L), sehingga hampir tiga kali lebih berat dari pada udara. Sumber radioaktif yang memiliki energi menengah. Sangat cocok untuk pengukuran dalam kisaran 150-1500 g/m². Waktu paruh 10,756 tahun dan memiliki energi maksimum beta 0,687 MeV serta energi maksimum gamma 6,18x10⁻⁰³ MeV. Di alam, kripton memiliki enam isotop stabil. Titik didih krypton adalah -243,81 °F (-153,23 °C), dan titik beku hanya sedikit lebih rendah pada -251,27 °F(-157,37 °C).



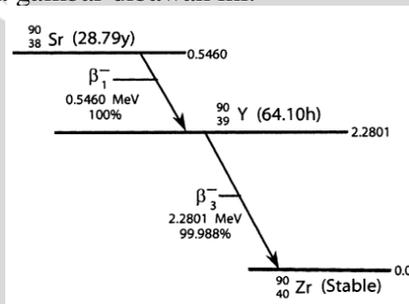
Gambar 2.2 Skema Peluruhan Kripton (⁸⁵Kr) menjadi Radium (⁸⁵Rb) yang Stabil (Wurdiyanto, 2005).

2.2.2 Stronsium-90 dan Yttrium-90 (Sr-90/Y-90)

Sumber Radioaktif Stronsium ⁹⁰Sr merupakan jenis radionuklida pemancar β murni dengan energi rata-rata 1500 keV,

dengan waktu paro 28,5 tahun. ^{90}Sr dapat mencapai keadaan stabil setelah meluruh menjadi ^{90}Y yang mempunyai waktu paro 64 jam, dan meluruh lagi menjadi unsur stabil ^{90}Zr . ^{90}Sr memiliki energi beta maksimum 2,3 MeV dengan aktivitas 2600 MBq.

Stronsium merupakan sumber beta energi tertinggi yang umum digunakan. Sangat cocok untuk pengukuran di kisaran 1.000-8.000 g/m^2 . Untuk mengkonversi dari g/m^2 sampai ketebalan dalam mikron, kalikan dengan kepadatan materi. Untuk mengkonversi dari mikron ke mils (1/1000 dari satu inci) dibagi dengan 25,4 g/m^2 . Kebanyakan plastik atau bahan lain dengan kepadatan satu mil (seperseribu inci) adalah 25,4 g/m^2 . Bagan peluruhan ^{90}Sr di tampilkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.3 Skema Peluruhan Stronsium (^{90}Sr) menjadi (^{90}Zr) yang Stabil (Wurdiyanto, 2005).

Tabel 2.1 Karakteristik Sumber Beta (Pruitt, 1985).

Radionuklida	Sr-90/Y-90	Kr-85
Energi maksimum beta (MeV)	2,3	0,687
Energi maksimum gamma(keV)	-	6,18
Energi rata-rata beta (MeV)	0,8	0,25
Energi rata-rata gamma (keV)	-	2,25
waktu paruh (tahun)	28,5	10,756
aktifitas (MBq)	2600	9250
Jarak optimal (cm)	30,50	30

2.3 Bahaya Radiasi Beta

Sumber radiasi beta mempunyai potensi bahaya radiasi secara eksterna pada tubuh manusia. Salah satu contohnya pada kulit.

2.3.1 Efek Radiasi Beta

Karena partikel beta begitu kecil dan memiliki muatan yang lebih kecil dari pada partikel alpha maka partikel beta secara umum akan menembus masuk ke dalam jaringan, sehingga terjadi kerusakan sel yang lebih parah. Penyinaran langsung dari partikel beta adalah berbahaya karena emisi dari pemancar beta yang kuat bisa memanaskan atau bahkan membakar kulit. Namun masuknya pemancar beta melalui penghirupan dari udara menjadi perhatian yang serius karena partikel beta langsung dipancarkan ke dalam jaringan hidup sehingga bisa menyebabkan bahaya di tingkat molekuler yang dapat mengganggu fungsi sel.

Berdasarkan bahaya paparan radiasi beta ini termasuk dalam efek stokastik dan efek deterministik, efek stokastik adalah peluang terjadinya efek radiasi yang lebih besar pada dosis yang lebih tinggi, namun keparahannya tidak bergantung pada dosis. Waktu yang dibutuhkan sampai terlihatnya gejala efek stokastik sangat bervariasi, seperti kerusakan yang secara klinik sudah dapat teramati pada individu dalam waktu singkat setelah individu tersebut terpapar radiasi seperti memerahnya kulit hingga terkelupas. Sedangkan efek deterministik adalah timbul apabila dosis yang diterima melampaui dosis ambang dan umumnya timbul beberapa saat setelah terpapar radiasi. Efek ini terjadi karena adanya proses kematian sel akibat paparan radiasi yang mengubah fungsi jaringan yang terkena radiasi. Efek ini dapat terjadi sebagai akibat dari paparan radiasi pada seluruh tubuh maupun lokal. Tingkat keparahan efek deterministik akan meningkat bila dosis yang diterima lebih besar dari dosis ambang yang bervariasi bergantung pada jenis efek. Pada dosis lebih rendah dan mendekati dosis ambang, kemungkinan terjadinya efek deterministik dengan demikian adalah nol. Sedangkan di atas dosis ambang, peluang terjadinya efek ini menjadi 100%. Yang memiliki efek luka bakar dan katarak. Melindungi tubuh dari efek negatif radiasi pengion yang khususnya radiasi beta adalah pembatasan waktu kerja, dimana bekerja sesingkat mungkin, sedapat mungkin diupayakan untuk tidak terlalu lama berada didekat sumber radiasi

untuk mencegah terjadinya paparan radiasi yang besar, untuk itu pekerja radiasi diberlakukan pengaturan waktu bekerja di daerah radiasi. Pengendali Jarak Jauh, dimana bekerja sejauh mungkin dari sumber radiasi untuk mencegah terjadinya paparan tersebut maka harus menjaga jarak yang jauh dari tingkat yang aman dari sumber radiasi. Penggunaan penahan radiasi aluminium atau plexiglass pada radiasi beta. menempatkan sumber radiasi secara benar, misalnya pada ruang isolasi (Arif, 2012).

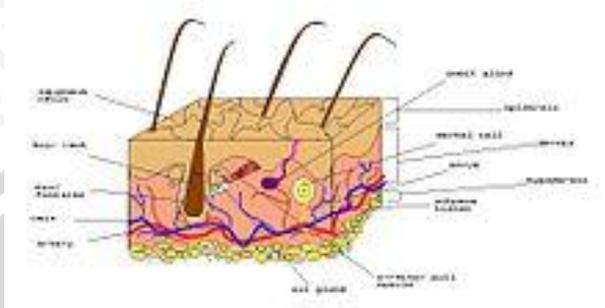
2.3.2 Dosis kedalaman

Dosis kulit Hp(0,07) adalah setara dosis 0,07 mm kedalaman dalam tubuh pada titik penerapan dosimeter individu. Dosis individu adalah setara dengan dosis yang diukur dalam variabel pengukuran dosis kedalaman dan dosis kulit pada perwakilan spot paparan radiasi di permukaan tubuh. Dosis individu mendalam dalam kasus paparan radiasi seluruh tubuh penetrasi adalah nilai yang diperkirakan untuk dosis efektif dan dosis organ organ dalam dan dosis kulit nilai estimasi untuk dosis kulit (Anonymous, 2010).

2.3.3 Kulit

Sebagai material yang digunakan pada penelitian uji paparan medan radiasi beta adalah struktur kulit manusia dengan kedalaman dosis optimal pada kulit manusia 0,07 mm, dengan karakteristik sebagai berikut :

Kulit merupakan bagian organ tubuh manusia yang terletak di luar dan hanya sedikit saja yang membatasi bagian dalam tubuh. Luas kulit pada manusia pada orang dewasa di perkirakan sekitar 2 m² dengan berat sekitar 15 % dari berat badan secara keseluruhan. Ketebalan kulit pada setiap bagian tubuh berbeda-beda dan rata-rata ketebalannya (0,04-1,5 mm). Berdasarkan strukturnya kulit terdiri dari tiga lapisan, yaitu epidermis (kulit ari), dermis (kulit jangat), dan hipodermis (jaringan ikat bawah kulit). Nilai batas dosis pada kulit pertahunnya adalah 500 mSv/h atau 50.000 mrem/h.



Gambar 2.4 Struktur Lapisan Kulit Manusia (Wikipedia^a, 2013).

2.3.4 Besar dan Satuan Dosis

Dalam menentukan potensi bahaya radiasi pada proteksi radiasi, perlu terlebih dulu dipahami mengenai besaran-besaran radiasi dan efek yang dihasilkan oleh dosis radiasi atau besaran dosimetri.

1. Besaran Radiasi

- a. Energi radiasi didefinisikan sebagai pancaran atau perambatan energi melalui materi atau ruang dalam bentuk partikel atau gelombang magnetik. Energi sangat mempengaruhi daya tembus radiasi terhadap materi.
- b. Fluenci (Φ), adalah jumlah partikel atau foton yang melalui satu satuan luas pada medan radiasi yang terdiri dari berbagai macam radiasi. Sedangkan laju fluenci adalah jumlah partikel yang melewati satu satuan luas per satuan waktu.
- c. Paparan, kemampuan radiasi sinar-x atau gamma untuk menimbulkan ionisasi di udara per volume tertentu. Dimana :

$$X = \frac{dQ}{dm} \text{ (C/kg)}, \quad (2.1)$$

Dengan dQ jumlah muatan elektron yang timbul sebagai akibat interaksi antara foton dengan atom-atom udara dalam volume udara bermassa dm . Dalam hal ini intensitas sinar-X atau sinar gamma yang dapat menghasilkan ionisasi di udara sebanyak $1,6 \times 10^{15}$ pasangan per kilogram udara Pasangan ion/kg udara. Energi yang diperlukan untuk membuat satu pasangan ion di udara adalah 5×10^{18} J. Oleh karena itu 1 rontgen dapat dikonversikan ke joule sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 1 R &= (1,61 \times 10^{15})(5,4 \times 10^{-18}) \text{ J/kg udara} \\
 &= 8,69 \times 10^3 \text{ J/kg udara} \\
 &= 0,00869 \text{ J/kg udara}
 \end{aligned}$$

Besaran paparan ini mempunyai satuan paparan adalah C/kg dan diberi nama khusus rontgen (R), sedangkan laju paparan, besar paparan persatuan waktu adalah (C/kg.jam)

- d. Kerma (*Kinetic energi released per unit mass of absorber*), pada dasarnya kerma mengukur energi kinetik awal dari interaksi primer (efek fotolistrik, Compton, produksi pasangan), pada satu media pengabsorpsi. Dalam hal radiasi ionisasi langsung, seperti misalnya sinar-X dan neutron cepat, kadang-kadang kita berkepentingan dengan energi kinetik awal dari partikel-partikel penyebab ionisasi utama (fotoelektron, elektron Compton, atau pasangan positron-negatron dalam kaitannya dengan radiasi foton dan inti yang terhambur sehubungan dengan neutron cepat yang dihasilkan melalui interaksi radiasi insiden per satuan massa material yang berinteraksi. Kuantitas (besaran) ini disebut sebagai kerma, dan dalam satuan SI diukur dalam satuan joule per kilogram, atau gray (atau dalam sistem satuan sebelumnya dalam rad).

Kerma menurun secara kontinu bersama dengan bertambahnya kedalaman dalam material penyerap, karena dosis yang diserap meningkat bersama bertambahnya kedalaman karena densitas partikel-partikel penyebab ionisasi utama dan ionisasi sekunder yang dihasilkan juga meningkat, sehingga dicapai suatu nilai maksimum. Setelah nilai maksimum itu, dosis yang terserap menurun bersama dengan menurunnya kedalaman secara kontinu. Dosis maksimum yang terjadi pada suatu kedalaman hampir sama dengan jangkauan maksimum partikel-partikel penyebab ionisasi utama (primer).

Kerma (K) merupakan besaran nonstokastik terkait dengan medan radiasi pengion tak langsung, yaitu foto neutron atau setiap jenis radiasi pengion yang tersebar oleh energi pindahan. Energi pindahan dalam volume (V) sama dengan :

$$E_{tr} = (R_m)u - (R_k)u^{nont} + \Sigma Q \quad (2.2)$$

Dimana :

R_m :energi yang dipancarkan oleh radiasi yang tak bermuatanyang memasuki V

R_k :energi yang dipancarkan oleh radiasi yang tak bermuatan yang meninggalkan V, kecuali yang bermula dari hilangnya energi kinetik atom bermuatan didalam volum V, yang berubah menjadi foton

ΣQ :energi neto yang berasal dari massa atom diam dalam V, positif jika $m \rightarrow E$ dan negatif jika $E \leftarrow m$

Dengan batasan energi pindahan diatas, batasan kerma

$$K = \frac{d\epsilon V}{dm} \quad (2.3)$$

Dimana :

K : nilai kerma dititik P dalam volume (V), $d\epsilon$ tr energi pindahan dalam bagian volume (dv) dititik P, dan dalam massa dalam bagian d volume (dv). Untuk radiasi foton, kerma dapat dihubungkan dengan besaran fluen energi dan bentuk.

Untuk radiasi foton, kerma dapat dihubungkan dengan besaran fluen energi dan bentuk

$$K_a = \left(\frac{W}{e}\right)_{eff} \frac{1}{(\pi r^2)_{eff}} \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{dQ}{dX}\right)_x \rightarrow O, SEE \quad (2.4)$$

Dimana :

K_a : Laju Kerma (Gy/s)

$\left(\frac{W}{e}\right)_{eff}$:Nilai rata-rata energi yang dibutuhkan untuk diproduksi pasangan ion di udara (33,83 J/C)

$\frac{1}{(\pi r^2)_{eff}}$: Luas pengukuran efektif dengan jari-jari (1,5 cm)

$\frac{1}{\rho_0}$:Densitas udara pada tekanan 101,3 Kpa dan Temperatur 273,15 K ($\rho = 1,29320 \times 10^{-3}$)

$\left(\frac{dQ}{dX}\right)_x \rightarrow O, SEE$: pengukuran arus fungsi jarak elektroda pada saat mendekati nol (Wiryosimin, 1995).

2. Besaran Dosimetri.

a. Dosis serap adalah energi rata-rata yang diserap bahan per satuan massa bahan tersebut. Satuan dosis serap adalah

J/kg atau gray (Gy). Meskipun dosis serap semula didefinisikan untuk penggunaan pada suatu titik tertentu, namun untuk tujuan proteksi radiasi digunakan pula untuk menyatakan dosis rata-rata pada suatu jaringan. Secara matematis, dosis serap (D) dirumuskan dengan :

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.5)$$

Dengan dE adalah energi yang diserap oleh medium bermassa dm .

- Laju dosis serap adalah dosis serap per satuan waktu, dan diberi simbol \dot{D} . Satuan laju dosis serap dalam SI adalah joule/kg.jam atau gray/jam (Gy/jam) dan dalam satuan lama adalah rad/jam.
- Hubungan dosis serap dan paparan adalah :

$$D = f.X \quad (2.6)$$

Dimana :

D = Dosis serap (rad)

X = Paparan (R)

f = Faktor konversi dari paparan ke dosis serap (rad/R), dimana : 1 rad = 100 erg/g udara, 1 R = 0,877 rad

Bila udara dijadikan medium maka $f = 0,877$ rad/R, untuk proteksi radiasi disepakati f untuk udara = 1 rad/R. Bila medium yang digunakan bukan udara, maka faktor konversi, $f = 0,877 (\mu/\rho)$ medium per (μ/ρ) udara.

- Dosis Ekuivalen merupakan dosis serap dikalikan dengan kemampuan radiasi untuk menimbulkan kerusakan pada organ atau jaringan (faktor bobot radiasi, Wr). Satuan ini dibuat karena dosis serap yang sama tapi dari radiasi yang berbeda akan menimbulkan efek radiasi yang berbeda pada organ atau jaringan. Satuan dosis ekuivalen adalah sievert (Sv). Nilai faktor bobot untuk masing-masing jenis radiasi berbeda, nilai faktor (Q) ditentukan oleh kemampuan jenis radiasi dalam mengionisasikan paparan yang ada pada jaringan kulit. Sebagai contoh, radiasi alpha mampu menghasilkan 1 juta pasangan ion untuk setiap mm panjang lintasan pada jaringan kulit. Harga Q untuk radiasi gamma dan juga untuk sinar-X adalah 1, sedangkan harga Q untuk jenis radiasi lainnya adalah :

Table 2.2 Faktor Bobot Jaringan (Arif, 2012).

Jenis Radiasi	Faktor bobot jaringan (Q)
Foton	1
Partikel beta, gamma, dan sinar-x	1
Elektron moun	1
Neutron termal	2,3
Energi tak diketahui	10
Netron cepat dan proton	10
Partikel alpha	20

Dosis ekuivalen (Sv) = Dosis Serap (Gy) x Faktor bobot (Q)

Dengan 1 Gy = 100 rad, maka 1Sv = 100 Rem

- c. Dosis efektif, dosis ekuivalen dikalikan dengan faktor kepekaan organ atau jaringan terhadap efek stokastik. Pada penyinaran tubuh dimana setiap jaringan menerima dosis ekuivalen yang sama ternyata mengakibatkan efek biologi yang berbeda. efek radiasi yang diperhitungkan adalah efek stokastik.

$$E = H.Wt \quad (2.7)$$

satuan : sievert atau rem, laju dosis efektif, dosis efektif per satuan waktu. dengan satuan Sv/jam.

Hubungan antara peluang timbulnya efek biologi tertentu akibat penerimaan dosis ekuivalen pada suatu jaringan juga bergantung pada organ atau jaringan yang tersinari. Untuk menunjukkan keefektifan radiasi dalam menimbulkan efek tertentu pada suatu organ diperlukan besaran baru yang disebut besaran dosis efektif. Besaran ini merupakan penurunan dari besaran dosis ekuivalen yang dibobot. Faktor pembobot dosis ekuivalen untuk organ t disebut faktor bobot jaringan, Wt . Nilai Wt dipilih agar setiap dosis ekuivalen yang diterima seragam di seluruh tubuh menghasilkan dosis efektif yang nilainya sama dengan dosis ekuivalen yang seragam itu. Jumlah faktor bobot jaringan untuk seluruh tubuh sama dengan satu.

Dosis Efektif dengan nilai sama dan dosis yang seragam, maka jumlah faktor pembobot jaringan untuk seluruh tubuh sama dengan lainnya. Apabila organ t yang mempunyai

faktor bobot jaringan W_t diberi dosis H_t , maka dosis efektifnya :

$$H_e = H_t - W_t \quad (2.8)$$

Apabila penyinaran terjadi diseluruh tubuh, dosis efektif yang diterima oleh tubuh sama dengan

$$(H_e)ST = \sum H_t.W_t = HST \quad (2.9)$$

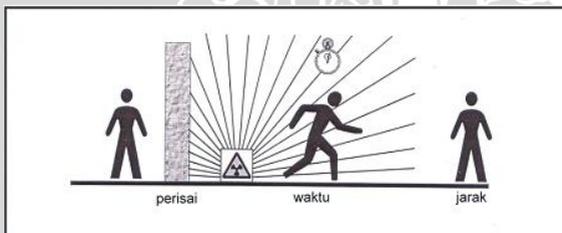
Dosis efektif adalah besaran dosis yang memperhitungkan sensitifitas organ/jaringan. Tingkat kepekaan organ/jaringan tubuh terhadap efek stokastik akibat radiasi disebut faktor bobot organ/jaringan tubuh (W_t). Dosis efektif merupakan hasil perkalian dosis ekivalen dengan faktor bobot jaringan/organ. Satuan dosis efektif adalah Sievert (Sv). Jumlah faktor bobot jaringan untuk seluruh tubuh sama dengan satu. Dosis efektif dalam organ t , H_e yang menerima penyinaran radiasi dengan dosis ekivalen H_t ditentukan melalui persamaan :

$$H_e = W_t \cdot H_t \quad (2.10)$$

(Arif, 2012).

2.4 Alat Ukur Radiasi

Sumber radioaktif memiliki struktur atom yang tidak stabil. Semakin lama seseorang terkena radiasi semakin dekat orang itu dengan sumber radiasi, semakin besar resikonya. Untuk memproteksi diri dari sumber radiasi, maka diterapkan tiga strategi dasar yang dikenal sebagai prinsip proteksi radiasi, yaitu :



Gambar 2.5 Prinsip Proteksi radiasi (Anonimous, 2007)

- Waktu, dengan sesingkat mungkin berada dekat dengan sumber radiasi, maka secara proporsional akan mengurangi

dosis radiasi yang diterima. Meminimalkan waktu anda bekerja, maka akan meminimalkan dosis yang diterima.

- Jarak, besarnya paparan radiasi akan menurun, sebanding dengan kebalikan kuadrat jarak terhadap sumber. Dengan menjauhkan sumber radiasi dengan faktor dua, akan menurunkan intensitasnya menjadi seperempatnya. Menjauhkan jarak sumber radiasi dengan faktor tiga akan menurunkan intensitas radiasi terhadap sepersembilannya. Bilamana diperlukan selalu gunakan tongkat penjepit panjang untuk memindahkan atau mengambil sumber radiasi dengan aktivitas atau paparan radiasi yang tinggi, selalu menggunakan rak tabung, baki atau apa saja yang bisa menjauhkan sumber radiasi dari tubuh apabila memindahkan atau mengambil sumber radiasi dengan aktivitas atau paparan radiasi yang rendah. Selalu menyimpan zat radioaktif, peralatan terkontaminasi dan limbah radioaktif sejauh mungkin dari daerah kerja atau pintu.
- Perisai, pilih menggunakan perisai yang sesuai selama melakukan penelitian atau pekerjaan dengan sumber radiasi. Selain dengan ketiga strategi diatas, untuk mengurangi bahaya radiasi eksterna, maka kurangi aktivitas zat radioaktif dengan cara : Untuk sumber dengan waktu paruh pendek tunggu sampai meluruh; dekontaminasi sumber radioaktif sebelum bekerja; atau pemindahan zat radioaktif yang tidak perlu dan bisa dipindahkan ke lokasi lain (Anonymous, 2007).

2.4.1 Surveimeter

Alat pendeteksi radiasi portabel dan instrumen pengukuran yang digunakan untuk memeriksa dosis personal, lingkungan, atau untuk mengukur medan radiasi pengion eksternal atau ambien (untuk mengevaluasi bahaya paparan langsung). Detektor yang digunakan merupakan detektor jendela tipis Gieger Moler dapat juga membedakan antara gamma dan beta dengan membuka shielding dari detektor yang digunakan, beta dapat terlindung secara manual, hanya menyisakan pembacaan gamma, begitu pula sebaliknya. Partikel beta memiliki efek pada jarak tertentu tergantung dari besarnya energi beta itu sendiri. Radiasi beta berenergi tinggi mampu

menjangkau 1 meter diudara dan dapat menembus lapisan kulit beberapa mm (Wikipedia^c, 2013).

Cara pengukuran yang diterapkan adalah cara arus (*current mode*), sehingga nilai yang ditampilkan merupakan nilai intensitas radiasi. Secara elektronik, nilai intensitas tersebut dikonversikan menjadi skala dosis, misalnya dengan satuan R/h. Konstruksi surveimeter dapat dilihat pada **Gambar 2.8**



Gambar 2.5 Surveimeter Beta Gamma

2.4.2 TLD (*Termoluminesensi Dosimetry*)

Alat untuk mendeteksi laju paparan radiasi dari sumber radioaktif yang digunakan dengan kemampuan pengukuran TLD dapat digunakan sebagai dosimeter foton, beta, dan neutron. TLD juga mampu mengukur besaran dosis dalam Hp(10) dan Hp(0,07). Bila TLD digunakan untuk radiasi beta maka harus dengan ketebalan yang sangat tipis yaitu 0,015 inci atau 4 mgcm^{-2} dan dilapisi dengan lapisan pelindung. Periode waktu pemakaian TLD untuk pemantauan dosis eksterna perorangan dapat mencapai tiga bulan, kemudian diproses untuk mengetahui jumlah dosis radiasi yang telah diterimanya. Pemrosesan dilakukan dengan memanaskan kristal TLD sampai temperatur tertentu, kemudian mendeteksi percikan-percikan cahaya yang dipancarkannya.

Dosimeter ini sangat menyerupai dosimeter film badge, hanya detektor yang digunakan ini adalah kristal anorganik termoluminisensi.



Gambar 2.6 Monitor Radiasi Perorangan Beta Gamma (Azam dkk., 2007).

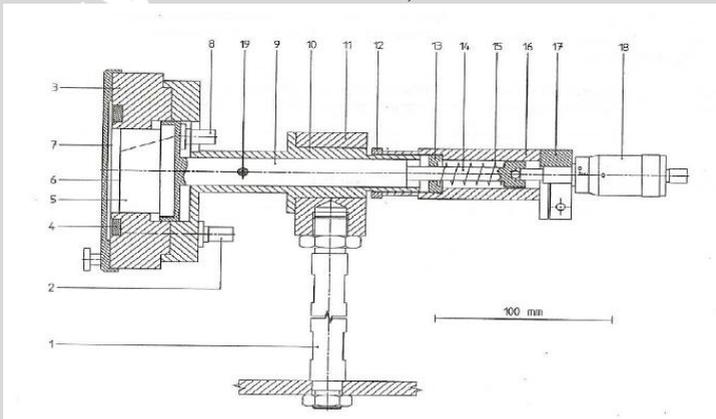
2.4.3 Bohm Extrapolation Chamber

Bohm Extrapolation Chamber adalah perangkat berkualitas tinggi untuk pengukuran dosis serap dari beta dan radiasi sinar-X berenergi rendah di kedalaman tertentu di bawah permukaan detektor. Laboratorium dosimetri standar primer (PSDL) dan sekunder laboratorium dosimetri standar (SSDL) menggunakannya untuk kalibrasi radiasi energi rendah. Dosis ditentukan dari kepadatan ionisasi dalam celah udara kecil, volume ruang ekstrapolasi, tertanam dalam bahan jaringan setara (PMMA) yang merupakan lapisan luar yang sangat tipis $0,75 \text{ mg/cm}^2$ dan elektroda pengumpulan 30 mm. Dengan menggunakan dibangun di sekrup mikrometer, elektroda mengumpulkan dikelilingi oleh cincin penjaga 15 mm dapat dipindahkan untuk menyesuaikan kedalaman volume sensitif antara 10 mm dan 0 mm. Ruang ini dilengkapi dengan dua soket BNC untuk sinyal dan tegangan polarisasi. Sebuah kabel sambungan dari kedua soket BNC ke elektrometer dengan konektor tipe M tersedia. Sebuah elektrometer dengan sirkuit masukan mengenai potensi tanah diperlukan. Ruang ekstrapolasi datang dalam kasus penyimpanan pelindung.

Karena aktivitasnya cukup tinggi, saat mengambil sumber dan meletakkan kembali tempatnya harus menggunakan peralatan proteksi radiasi. Perlu diperhatikan bahwa posisi sumber harus tegak lurus dengan *BOHM Extrapolation Chamber* atau dengan alat ukur radiasi yang akan dikalibrasi, karena perubahan posisi sumber akan sangat mempengaruhi bacaan alat ukur.



Gambar 2.7 *Bohm Extrapolation Chamber* (Nazaroh dan Tuti, 2011).



Gambar 2.8 Skema *BOHM Extrapolation Chamber* (1.Removable Stand, 2.Polarizing voltage socket, 3.Acrylic housing, 4.Tension ring, 5.Acrylic block, 6.Graphite coated surface, 7.entrance foil, 8.Collecting electrode socket, 9.Sliding fit rod, 10.Central guide for rod, 11.Holder, 12.Nut, 13.Threaded ring, 14.bolt, 15.Spring, 16.Tube, 17.Clamp, 18.Micrometer screw and 19. piston locking screw) (Bakshi dkk., 2012).

Alat ini dipergunakan sebagian besar sebagai standar primer untuk penentuan dari laju paparan dari sinar beta mencari sumber, untuk mengukur dosis pasien di radioterapi dan untuk mengetahui dosis kedalaman pada kulit manusia yang terpapar dari radiasi beta dengan $H_p(0,07)$.

Bohm Extrapolation Chamber yang pertama kali diperkenalkan oleh FAILLA pada tahun 1937 adalah *ionization chamber* tipe udara bebas dengan *electrode plane parallel*, dengan ruang yang dapat divariasikan. Beberapa disain rancangan *Bohm Extrapolation Chamber* telah di diskusikan oleh KAMINAGA, 1964, LOEVINGER dan TROTT, 1966, FRANCIS dan SEYMOUR. Tetapi *BOHM Extrapolation Chamber* dibuat untuk pengukuran laju dosis permukaan sinar beta atau dosis kedalaman pada jaringan di medan iradiasi beta di udara bebas.

Bohm Extrapolation Chamber merupakan alat yang dapat digunakan untuk menentukan dosis serap sinar-X yang memiliki energi potensial lebih dari 7,5 keV dan untuk radiasi elektron dengan energi lebih dari 5 keV. *Bohm Extrapolation Chamber* tipe 23392 milik PTKMR memiliki volume pengukuran antara (0,353-7,422) cm³, dengan tegangan *chamber* maksimum 500 V. Diameter *entrance window* 60,5 mm, dan diameter *electrode* 30 mm, jarak antara *electrode* 0,5-10,5 mm, terbuat dari bahan PMMA dengan permukaannya dilapisi grafit. Volume efektif *BOHM Extrapolation Chamber* dapat diubah-ubah dengan variasi jarak antara *electrode*, dengan akurasi 1 µm.

Bohm memperkenalkan *Bohm Extrapolation Chamber* dan beberapa contoh *Bohm Extrapolation Chamber* tersebut telah ada di beberapa institusi standar nasional. Saat ini *Bohm Extrapolation Chamber* yang dapat digunakan untuk pengukuran laju dosis serap dari medan udara bebas dan laju dosis serap permukaan dikembangkan oleh *Bohm* (Nazaroh dan Tuti, 2011).

2.4.4 Mylar atau PET (Polyethylene Terephthalate)

Polyethylene terephthalate adalah bahan polyester yang sering digunakan untuk bahan wadah makanan dan minuman, obat-obatan dan kosmetik. Yang biasa dikenal dengan nama plastic Mylar, Bahan ini juga dapat didaur ulang untuk pembuatan karpet atau mengisi serat lainnya. Memiliki kerapatan 0,933 g/cm³.

Nama Polyethylene terephthalate ini disingkat dengan PET. Secara teknis PET merupakan plastik dengan suhu linier yang terbuat dari kondensasi asam tereftalat dan etilen glikol. Dalam dimetil tereftalat proses, senyawa ini dan etilena glikol berlebih direaksikan dalam mencair pada suhu 150-200 °C dengan katalis

basa. Metanol (CH_3OH) dihilangkan dengan distilasi untuk mendorong reaksi ke depan. Etilena glikol memiliki Kelebihan didestilasi pada suhu tinggi dengan bantuan vakum. Hasil Langkah kedua transesterifikasi pada 270-280 °C, dengan distilasi terus etilen glikol juga (Anonymous, 2004).

2.4.5 PMMA (Polymethyl Methacrylate)

Polymethyl methacrylate (PMMA) adalah termoplastik transparan yang disintesis secara polimer dari metyl methacrylate. PMMA digunakan sebagai gelas alternatif berkompetisi dengan polycarbonate. Memiliki kerapatan 0,963 $\eta\text{m.t}$. PMMA bersifat moderat, mudah penanganan dan prosesnya, dan biaya murah. Walau ini secara teknis satu jenis plastik, unsur yang punya kadang kala menurut sejarah biasa disebut dengan plastik akrilik. Secara kimiawi, ini adalah polimer buatan dari methacrylate metil. Bahan dikembangkan pada 1928 dalam berbagai laboratorinya oleh beberapa ahli kimia seperti William Chalmers, Otto Rohm dan Walter Bauer dan yang pertama membawakan pasarkannya pada 1933 oleh Rohm dan Perusahaan Haas, pada Plexiglas merek dagang. Ini mempunyai sejak telah dijual di bawah banyak sebut berbeda, meliputi ACRYLITE, Lucite dan Perspex (Wikipedia^a, 2012).

2.4.6 Electrometer Unidos-PTW

Elektrometer yang digunakan untuk mengukur output (keluaran) dari *Bohm Extrapoltion Chamber* adalah peralatan presisi tinggi yang diberi nama *Unidos* buatan PTW-Jerman. *Unidos* adalah alat ukur arus yang dikontrol dengan mikroprosesor untuk pengukuran dosis dan laju dosis dalam terapi radiasi, diagnosa x-ray, dan proteksi radiasi (Bakshi dkk., 2012).

Unidos dapat digunakan (cocok) untuk pengukuran dengan detektor kamar ionisasi dan zat padat. Alat ini mempunyai tegangan tinggi yang dapat diatur dari 50 V sampai 400 V, dan juga tersedia sistem pengubah polaritas dari tegangan yang digunakan. *Unidos* juga dilengkapi antarmuka RS232 untuk pengendalian (kontrol) dengan komputer. Alat ini sangat peka (sensitif) dapat mengukur arus listrik beberapa pico Ampere detik (pAs) secara akurat.



Gambar 2.9 Elektrometer UNIDOS-PTW (user manual UNIDOS.D196.131.00/14 en).



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pusat Teknologi Keselamatan dan Mertologi Radiasi (PTKMR)–BATAN, Jakarta Selatan. Penelitian ini dimulai pada bulan Februari - April 2013.

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan untuk menentukan laju paparan dan dosis kedalaman kulit Hp(0,07) sebagai berikut:

3.2.1 Peralatan

Peralatan utama yang digunakan yaitu *Bohm Extrapolation Chamber*-PTB, Jerman, yang dirangkai dengan elektrometer buatan Unidos-Jerman. Dudukan sumber untuk meletakkan sumber Sr-90/Y-90 dan Kr-85 aktivitas 2600 MBq dan 9250 MBq. Dilengkapi dengan monitor lingkungan Hygrometer, Termometer dan Aneroid barometer. Untuk pengukuran jarak digunakan mistar *stainless steel* yang terkalibrasi serta busur untuk penentuan sudut penyinaran.

3.2.2 Bahan

Mylar tebal 10 μm -300 μm dan plastik PMMA tebal 500 μm -7300 μm .

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi dua tahapan yakni Menentukan Paparan laju serap dosis medan radiasi Beta dengan sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 dalam menentukan variasi jarak serta fungsi sudut dan Menentukan dosis kedalaman dari sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 menggunakan Mylar atau PET (Polyethylene Terephthalate) buatan Jerman dan PMMA (Polymethyl Methacrylate) buatan Jepang.

3.3.1 Menentukan Laju Paparan Medan Radiasi Beta dengan Sumber Radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85

Pertama-tama ruangan dikondisikan sehingga suhu, kelembaban, dan tekanan pada nilai 293,15 K, 101,3 kPa dan 60 %. Detektor *Bohm Extrapolation Chamber* dirangkai dengan electrometer Unidos. Atur posisi sumber Sr-90/Y-90 maupun Kr-85 tegak lurus dengan detektor *Bohm Extrapolation Chamber*. Pengukuran paparan radiasi beta untuk sumber Sr-90/Y-90 pada jarak 30 cm dan 50 cm, sedangkan untuk sumber Kr-85 pada jarak 30 cm yang merupakan jarak optimal radiasi beta untuk kedua sumber beta tersebut, lihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Laju Paparan Beta dengan *Bohm Extrapolation Chamber*

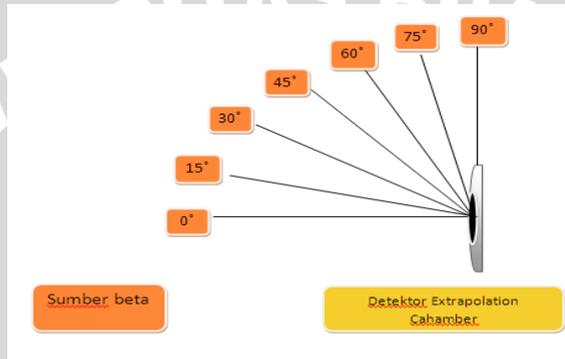
Laju paparan radiasi beta di udara atau laju dosis kerma udara dihitung dengan menggunakan persamaan 3.1

$$K_a = \left(\frac{W}{e}\right)_{eff} \frac{1}{(\pi r^2)_{eff}} \frac{1}{\rho_0} (K_{pt})_x \quad (3.1)$$

Dimana : K_a = Laju Kerma Udara (Gy/h), $\left(\frac{W}{e}\right)_{eff}$ = nilai rata-rata energi yang dibutuhkan untuk diproduksi pasangan ion di udara, $(\pi r^2)_{eff}$ = luas pengukuran efektif dengan jari-jari 1,5 cm (0.14 cm²), ρ_0 = densitas udara saat tekanan 101,3 kPa dan temperatur 273,15 K ($\rho = 7,73 \times 10^5$ cm³/kg).

$$K_{PT} = \frac{T+273.15 \text{ K}}{T_0+273.15 \text{ K}} \times \frac{P_0}{P} \quad (3.2)$$

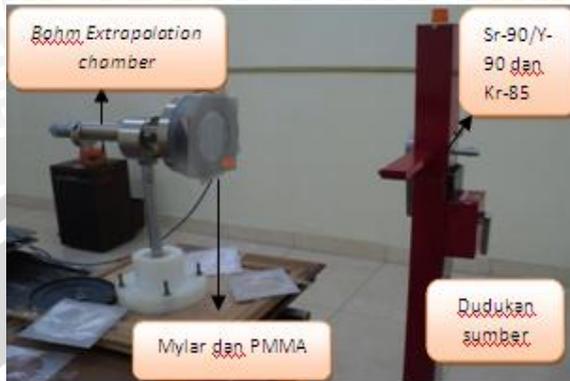
Untuk mengetahui apakah paparan radiasi beta kesegala arah sama, maka dilakukan pengukuran lagi paparan fungsi sudut. Adapaun sudut yang digunakan 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, dan 90° pada jarak optimal untuk sumber Sr-90/Y-90 30 cm dan 50 cm, sedangkan untuk Kr-85 jarak 30 cm, lihat pada **Gambar 3.2**



Gambar 3.2 Skema Pengukuran Fungsi Sudut Laju Paparan Radiasi Beta.

3.3.2 Penentuan Dosis Kedalaman Kulit Hp(0,07)

Dosis kedalaman kulit Hp(0,07) untuk sumber Sr-90/Y-90 dan Kr-85 dilakukan seperti pada percobaan pertama (pengukuran paparan kerma), hanya pada pengukuran kedua ini dipermukaan detektor *Bohm Extrapolation Chamber* diletakkan material Mylar dengan ketebalan 10 µm, 20 µm, 30 µm, 40 µm, 50 µm, 60 µm, 70 µm, 80 µm, 90 µm - 300 µm dan material PMMA ketebalan 500-7300 µm, lihat pada **Gambar 3.3**

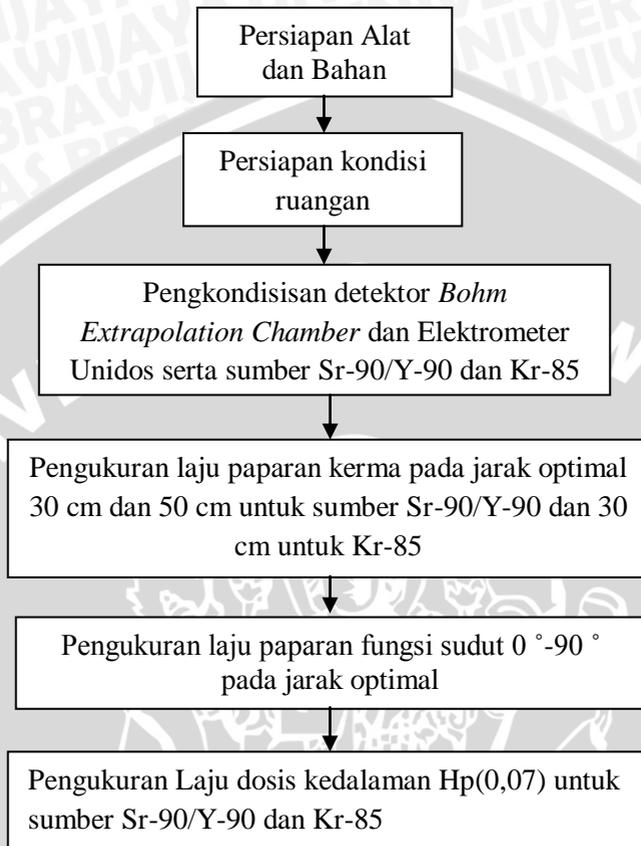


Gambar 3.3 Skema Pengukuran Kurva Dosis Kedalaman

Berdasarkan laju paparan udara (kerma) radiasi beta untuk sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 yang melewati material Mylar (PET) dan material PMMA untuk beberapa ketebalan mulai dari 10-7300 μm , maka laju dosis kedalaman kulit ($H_p(0,07)$) dapat dihitung menggunakan persamaan (ISO 6980-2:2004)

$$\dot{D}_{R\beta} = \frac{\left(\frac{W_0}{e}\right)_{St,a}}{\rho_a a} \left[\frac{d}{dl} \{kk'I(l)\} \right]_{l=0} \quad (3.3)$$

Selain itu, juga dapat diketahui pada kedalaman berapa atau kedalaman Mylar berapa radias beta Sr-90/Y-90 dan Kr-85 sudah habis energinya. Secara umum alur penelitian dapat dijelaskan dari diagram alir seperti pada **Gambar 3.4**



Gambar 3.4 Diagram Alur Penelitian.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

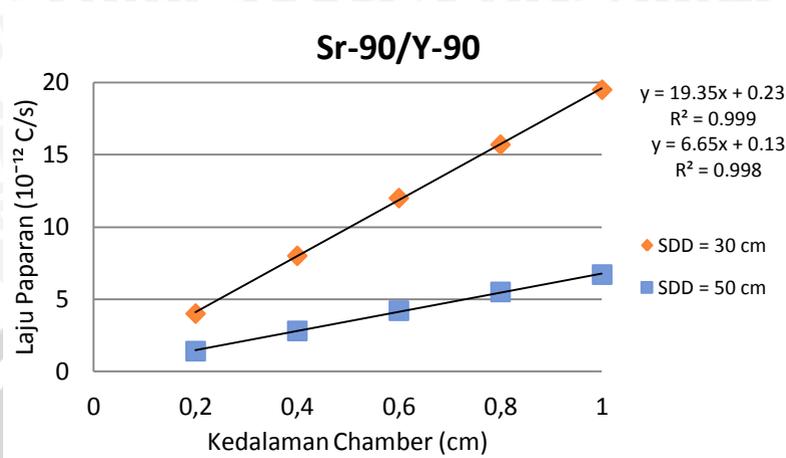
4.1 Hasil Penelitian

Pengukuran paparan laju serap dosis medan radiasi beta pada bidang industri sangat penting dilakukan. Pengukuran tingkat laju dosis serap medan radiasi beta ini secara langsung dapat diukur dengan menggunakan alat ukur laju serap dosis radiasi dengan cara meletakkan detektor tepat tegak lurus dengan sumber radioaktif yang digunakan. Karena alat yang digunakan ini adalah detektor primer standar, maka tidak dilakukan kalibrasi, karena alat ini telah memiliki nilai standar kestabilan pada setiap pengukuran. Oleh karena itu, pembahasan pada bab ini akan meliputi perkiraan paparan laju serap dosis medan radiasi beta dengan menggunakan fungsi variasi jarak dan fungsi sudut dengan menggunakan sumber Sr-90/Y-90 dan Kr-85, serta mengetahui dosis kedalaman yang diterima kulit dari paparan beta pada sumber radioaktif tersebut.

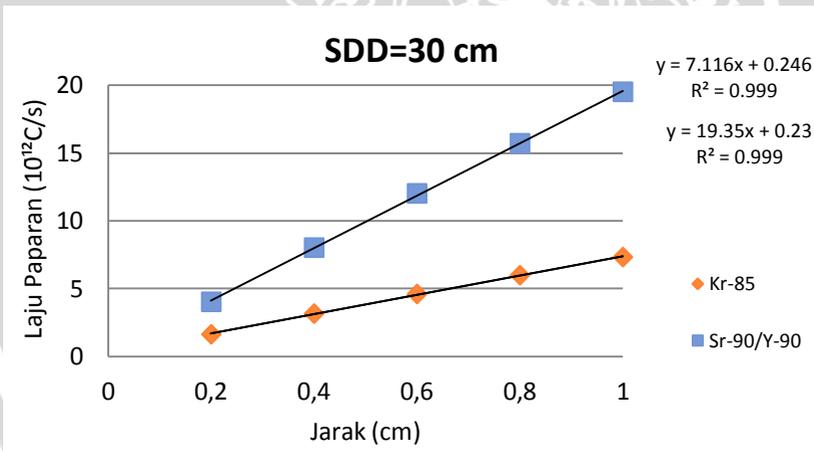
4.1.1 Paparan Laju Dosis Radiasi Beta untuk Sumber Radioaktif (Sr-90/Y-90) dan (Kr-85)

Pengukuran laju dosis radiasi beta untuk sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 dilakukan pada jarak optimal SDD (*Source Distance Detector*) 30 cm dan 50 cm. Untuk beberapa posisi kedalaman chamber antara 0,2 – 1 cm, hasil pengukurannya ditampilkan pada **Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2**.

Berdasarkan **Gambar 4.1**, menunjukkan bahwa terdapat hubungan kurva yang linier antara kedalaman chamber pada detektor dengan paparan laju serap dosis yang diberikan oleh alat ukur radiasi. Hasil yang linier pada kurva tersebut dapat dijelaskan karena interaksi antara radiasi dengan detektor yang sedemikian rupa hingga respon atau pencacahan dari alat ukur radiasi sebanding dengan efek radiasi atau sebanding dengan sifat radiasi yang diukur (Wardhana, 2007). Semakin jauh jarak yang digunakan maka partikel beta pada sumber Sr-90/Y-90 juga mengalami pelemahan pada partikel beta.



Gambar 4.1 Kurva Laju Paparan Radiasi Beta untuk Sr-90/Y-90 pada SDD = 30 cm dan 50 cm



Gambar 4.2 Kurva Laju Paparan Beta dengan Sr-90/Y-90 dan Kr-85 pada SDD = 30cm

Berdasarkan **Gambar 4.2** korelasi terbaik ditunjukkan pada (Sr-90/Y-90) dengan SDD 30 cm dan Kr-85 dengan SDD 30cm yaitu : $R^2=0.999$ dan persamaan yang mengikuti $y=1.935x+0.023$ dan

$R^2=0.999$ dan persamaan $y=7.116x+0.246$. korelasi R^2 yang mendekati 1 berarti bahwa hasil pengukuran sangat stabil dengan akurasi yang sangat tinggi.

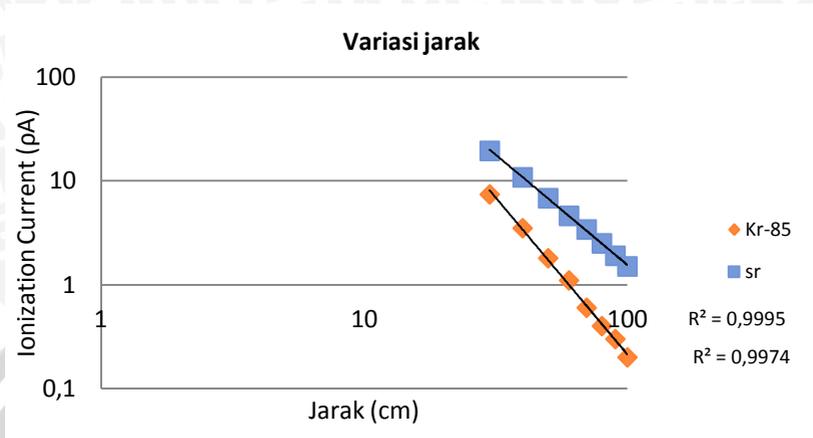
Hasil pengukuran dengan elektrometer UNIDOS yang masih berupa nilai arus (pC/s) dimasukkan pada persamaan 2.4 (BAB Tinjauan Pustaka) diperoleh laju dosis radiasi beta untuk sumber Sr-90/Y-90 sebesar 252,75 mGy/h untuk jarak 30 cm dan 88,12 mGy/h untuk jarak 50 cm yang setara dengan dari kedalaman kulit Hp(0,07) 933,86 μ Sv/h dan 325,53 μ Sv/h, sedangkan untuk sumber Kr-85 untuk jarak optimal SDD 30 cm diperoleh laju dosis udara 93,71 mGy/h setara dengan dosis Hp(0,07) 346,15 μ Sv/h lihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Paparan Laju Dosis Serap Beta

Radionuklida	Sr-90/Y-90	Kr-85
Jarak optimal (cm)	30	30
	50	
Laju paparan (C/s)	$1,19 \times 10^{-11}$	$1,401 \times 10^{-11}$
	$4,14 \times 10^{-12}$	
Laju Kerma (mGy/h)	252,79	93,71
	88,12	
Hp(0.07)[μ Sv/s]	933,86	346,19
	325,53	

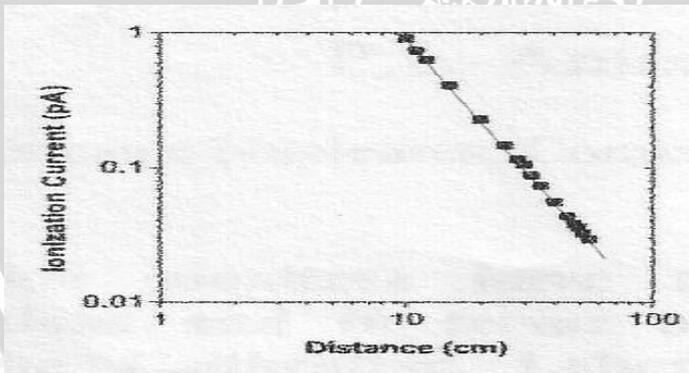
4.1.2 Laju Dosis Radias Beta Fungsi Jarak

Pengukuran laju dosis beta untuk sumber Sr-90/Y-90 dan Kr-85 untuk radiasi jarak 30 cm -100 cm dengan kondisi kedalaman chamber pada jarak optimal detektor *Bohm Extrapoalition Chamber* 10 mm, hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 4.3**



Gambar 4.3 Kurva Laju Paparan dengan Fungsi Jarak Pada Sr-90/Y-90 dan Kr-85 pada sudut 0° dalam skala log-log

Pada **Gambar 4.3** terlihat bahwa laju paparan (*ionization current*) bergantung pada jarak, semakin jauh jarak maka laju paparan makin rendah. Selain itu laju dosis juga bergantung pada energi beta, untuk sumber Sr-90/Y-90 lebih tinggi dari Kr-85. Dengan rentang laju paparan antara $1,48-19,38 \times 10^{-12}$ C/s untuk Sr-90/Y-90 dan $0,155-7,33 \times 10^{-12}$ C/s untuk Kr-85. Hasil kurva yang diperoleh ini sama dengan hasil penelitian (Antonio dan Caldas, 2011) Lihat **Gambar 4.4**.

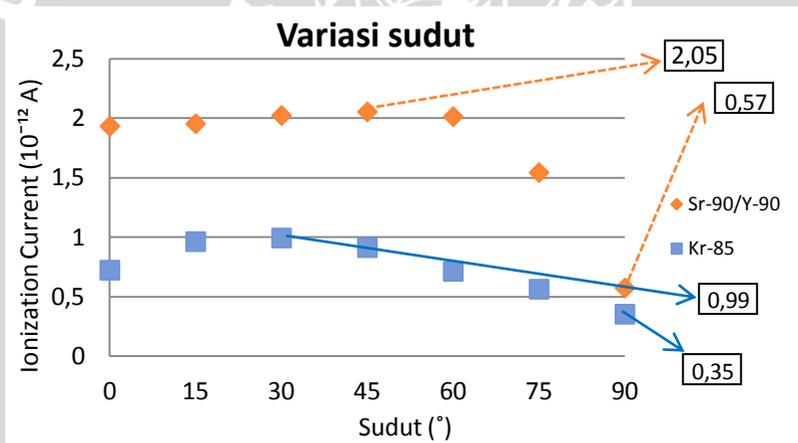


Gambar 4.4 Kurva Fungsi jarak Sr-90/Y-90 dan Kr-85 dengan Referensi. (Antonio dan Caldas, 2011)

Perbandingan **Gambar 4.3** dan **4.4** menunjukkan bahwa trend dari laju paparan sumber beta yang digunakan adalah sama, meskipun sumber yang digunakan pada **Gambar 4.3** adalah sumber beta dari bekas industri dan pada **Gambar 4.4** adalah *Beta Scondary Standart (BSS)* yang memiliki harga sangat mahal. Maka dari itu, untuk mengkalibrasi alat ukur partikel beta tidak harus menggunakan BSS, karena menggunakan sumber beta dari bekas industri saja sudah bisa.

4.1.3 Pengukuran Laju Paparan Beta untuk Sumber Radioaktif (Sr- 90/Y-90) dan (Kr-85)

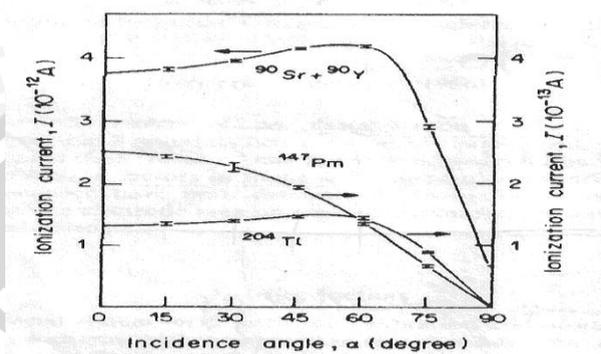
Laju paparan radiasi beta untuk sumber Sr-90/Y-90 bergantung pada sudut arah radiasi datang minimum untuk sudut 90° maksimum untuk sudut 45°, sedangkan untuk sumber Kr-85 minimum pada sudut 90° dan maksimum pada sudut 30°, lihat **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5 Kurva Laju Paparan Variasi Sudut untuk Sumber Sr-90/Y-90 dan Kr-85

Hal ini disebabkan karena adanya kontribusi bacaan radiasi Bremmstrahlung yang berasal dari tumbukan radiasi beta dengan material kolimator sumber yang terbuat dari alumunium. Radiasi Bremmstrahlung yang beraasal dari Sr-90/Y-90 lebih tinggi dari sumber Kr-85, Karena radiasi beta Sr-90/Y-90 lebih tinggi dibandingkan Kr-85. Hasil yang didapatkan oleh peneliti lain, Lihat

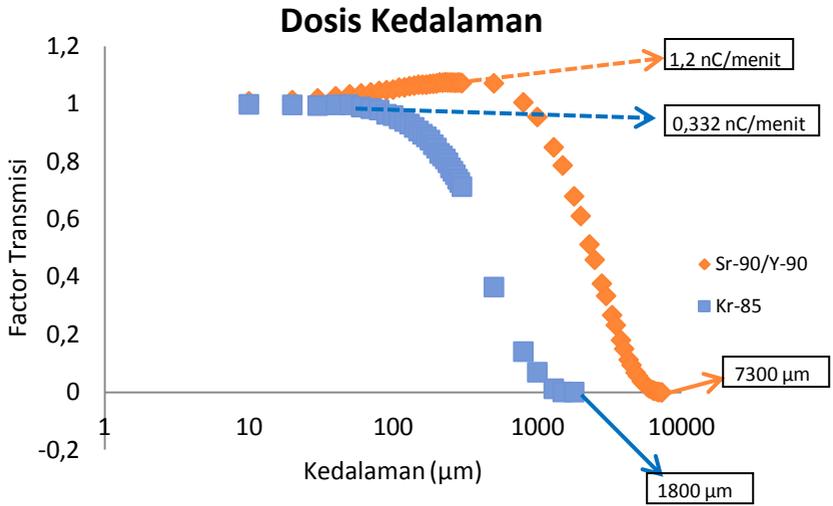
Gambar 4.6 (Caldas, 1986), perlu diketahui bahwa detektor *Bhom Extrapolation Chamber* juga peka terhadap radiasi sinar x energi rendah (Bremmstrahlung) (da Silva dan Caldas, 2012).



Gambar 4.6 Kurva Laju Paparan Fungsi Sudut Pada Sr-90/Y-90, Kr-85 dan Tl-204 dengan Referensi (da Silva dan Caldas, 2012)

4.1.4 Pengukuran dosis kedalaman untuk Sumber Radioaktif (Sr-90/Y-90) dan (Kr-85)

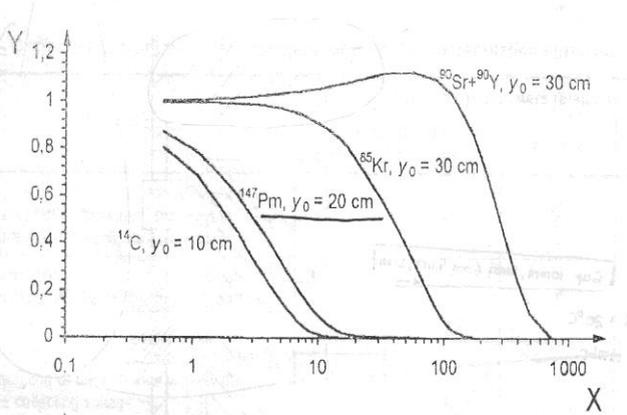
Dari hasil pengukuran yang telah dilakukan, diperoleh data dosis kedalaman dengan menggunakan sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan Kr-85 menggunakan variasi jarak optimal pada SDD (*source distance detector*) yaitu 30 cm. Pada pengukuran dosis kedalaman ini digunakan material Mylar atau PET (Polyethylene terephthalate) sebagai aplikasi material dari lapisan kulit manusia. PET yang digunakan dengan ketebalan 0.01-0.3 mm, sedangkan pada ketebalan 0.5-7.3 mm menggunakan material PMMA (Polymethyl Methacrylate) ini digunakan dengan masing-masing sumber radioaktif yang digunakan. Variasi pada kombinasi lapisan ini digunakan untuk dapat menghitung sampai berapakah energi beta pada masing-masing sumber radioaktif ini habis di kedalaman kulit, dengan itu dapat diketahui berapakan energi maksimal dari masing-masing sumber radioaktif, karena partikel beta tidak memiliki energi yang besar sehingga dengan ketebalan maksimal partikel beta telah melemah atau mengalami terhentinya ionisasi partikel. Berikut Grafik paparan energinya menggunakan material Mylar dan PMMA ditunjukkan pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Kurva Dosis Kedalaman Radiasi Beta menggunakan Material Mylar dan PMMA

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa energi beta yang dipancarkan pada masing-masing sumber radioaktif berbeda. Ini juga dikarenakan aktivitas dari sumber radioaktif ini berbeda, seperti pada Sr-90/Y-90 memiliki aktifitas energi rata-ratanya sebesar 7.03 Ci/g dan energi maksimum yang dimiliki sebesar 1500 keV. Dengan itu energi Sr-90/Y-90 yang berinteraksi dengan materi ini PET (Polyethylene terephthalate) mengalami pelemahan pada ketebalan 7.3 mm dengan energi sebesar 0.37 pC/menit. Berbeda dengan sumber radioaktif Krypton-85 yang mana memiliki aktifitas energi rata-rata sebesar 0.25Ci/g dan energi rata-ratanya sebesar 687 keV dan memiliki aktifitas gamma sebesar $0.9\% = 1.56 \times 10^{-3} \frac{\text{Rem/h}}{\text{Ci}}$ pada jarak 1 meter, karena saat pengukuran ini menggunakan jarak optimal 30 cm, dengan itu energi gamma yang dipancarkan juga sangat kecil, sehingga mungkin kurang berpengaruh pada cacahan yang di terima detektor tersebut. Dengan sumber radioaktif Kr-85 ini mengalami pelemahan energi betanya pada ketebalan material 1.8mm dengan energi 0.72 pC/menit.

Dari hasil pengukuran didapatkan hasil yang menyerupai referensi (ISO6980-2, 2004) yang menggunakan sumber radioaktif beta standar. Dapat dilihat pada **Gambar 4.8** Grafik dosis kedalaman :



Gambar 4.8 Kurva Dosis Kedalaman Berdasarkan Referensi. (ISO6980-2, 2004)

Berdasarkan (Brunzendorf, 2012) bahwa kedalaman optimal kulit yang mendapatkan paparan radiasi beta pada 0.07 mm ini adalah mendapatkan energi sebesar 1,2 nC/menit dengan sumber radioaktif Sr-90/Y-90 dan dengan sumber radioaktif Kr-85 dengan kedalaman yang sama 0.07 mm sebesar 0.332 nC/menit.

Tabel 4.2 Energi Beta dengan Kedalaman Paparan

Kedalaman (mm)	Sr-90/Y-90		Kr-85	
	Pengukuran (nC/menit)	Referensi (nC/menit)	Pengukuran (nC/menit)	Referensi (nC/menit)
0	1,921	1,110	0.738	1,121
70	1,995	1,111	0,725	1,122
1000	1,832	1,112	0.506	1,122
1800	1,172	1,115	-0.25	1,123
2500	0,880	1,117	-	1,124
7300	-0,267	1,124	-	-

(Brunzendorf, 2012).

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Telah dilakukan analisa Laju paparan dan dosis kedalaman sumber radiasi beta Sr-90/Y-90 dan Kr-85 yang diperoleh dari sumber bekas industri. Laju paparan radiasi beta untuk sumber Sr-90/Y-90 sebesar 340,91 mGy/h, sedangkan untuk sumber Kr-85 sebesar 93,71 mGy/h. Laju dosis radiasi beta bergantung pada jarak dan kehilangan energinya pada kedalaman tertentu.

5.2 SARAN

Untuk penelitian selanjutnya disarankan agar menggunakan sumber radioaktif pemancar beta murni seperti denagn sumber radioaktif Pm-147.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



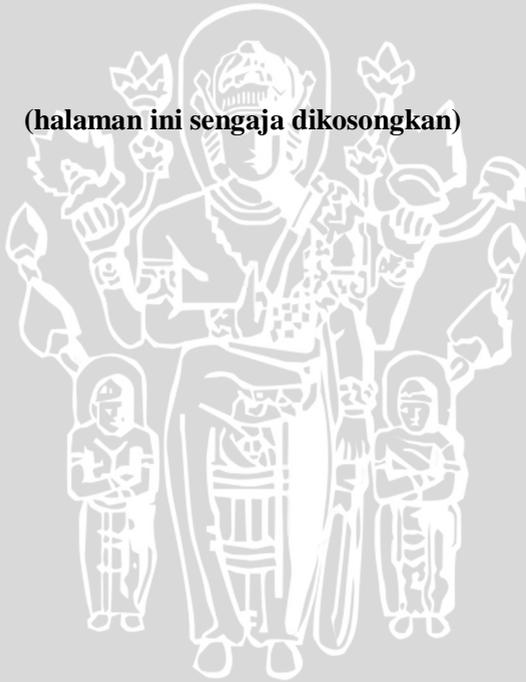
DAFTAR PUSTAKA

- Anonimous⁵. (2010). Dose. Akses tanggal 06 April, 2013, dari <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/d/dose>.
- Anonimous¹⁰. (2012). Kompensasi Tunjangan Bahaya Radiasi (TBR) Bagi Petugas yang Bekerja di Medan Radiasi. Akses tanggal 03 Maret, 2013, dari <http://ppnisardjito.blogspot.com/2012/08/kompensasi-tunjangan-bahaya-radiasi-tbr.html>.
- Anonimous¹³. (2004). Polyester Fiber. Akses tanggal 04 Maret, 2013, dari <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Polyester%20fiber.htm>.
- Anonimous¹⁶. (2007). Modul Ringkas Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi di Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri. Akses tanggal 19 Juni, 2013, dari <http://www.batan-bdg.go.id/K2/ModulRingkas.pdf>.
- Antonio, P. L. dan L. V. E. Caldas. 2011. Calibration of Radiation Monitors at Different Source-Detector Distance in Standard SR-90/Y-90 Beams. *International Conference on Medical Physics*. Porto Alegre.
- Arif, L. M. (2012). Pengendalian Bahaya Radiasi Elektromagnetik di Tempat Kerja. Akses tanggal 11 Juni, 2013, dari ikk354.blog.esaunggul.ac.id/files/2012/12/PENGENDALIA-N-BAHAYA-RADIASI.pdf.
- Azam, M., F. S. Hilyana dan E. Setiawati. 2007. Penentuan Efisiensi Beta Terhadap Gamma Pada Detektor Geiger Muller. *Jurnal Sains & Matematika*. 15 No. 2: 73-77.
- Bakshi, A. K., S. Vandana, S. T. Palavi, M. P. Chongamkar dan Y. S. Mayya. 2012. Measurement of The Output of ISO Recommended Beta Source with an Extrapolation Chamber. *Radiation Measurement*.
- Brunzendorf, J. 2012. Determination of Depth-Dose Curves in Beta Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*. 151 No. 2: 203-210.
- Caldas, L. V. E. 1986. Performance Characteristics of an Extrapolation Chamber for Beta Radiation Detection. *Appl. Radiat. Isot.* 37 No. 9: 988-990.

- da Silva, E. A. B. dan L. V. E. Caldas. 2012. Application of Extrapolation Chamber in Low-Energy X-Ray and Reference System Applied Radiation and Isotopes. 70: 1411-1416.
- ISO6980-2. 2004. Nuclear Energy-Reference beta-particle radiation Part 2: Calibration Fundamentals related to basic quantities characterizing to radiation field. Switzerland.
- Nazaroh, B. dan C. Tuti. 2011. *Antarbanding Internal Pengukuran Laju Dosis Serap Medan Radiasi Beta 90Sr-90/Y-90 Menggunakan BOHM Extrapolation Chamber dan Calibrated Ionization Chamber 2575C#576 Volume 600 CC*. Prosiding PPI Standardisasi 2011. Jakarta.
- Wardhana, W. A. 2007. Teknologi Nuklir : Proteksi Radiasi dan Aplikasinya. CV Andi Offset. Yogyakarta.
- Wikipedia¹. (2013). Suveymeter. Akses tanggal 29 April, 2013, dari http://en.wikipedia.org/wiki/Survey_meter.
- Wikipedia⁴. (2013). Partikel Beta. Akses tanggal 19 Juni, 2013, dari http://id.wikipedia.org/wiki/Partikel_Beta.
- Wikipedia⁵. (2013). Kulit. Akses tanggal 19 Juni, 2013, dari <http://id.wikipedia.org/wiki/Kulit>.
- Wikipedia⁶. (2012). Poly(methyl methacrylate). Akses tanggal 06 Maret, 2013, dari [http://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate)).
- Wurdiyanto, G. 2005. Pengaruh Komposisi Volume Larutan Sintilator Pada Pengukuran Aktivitas 90Sr. *Buletin Altara*. 6 (2): 117-123.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN

Lampiran

L.1 Tabel Laju Paparan Radiasi Beta

L.1.1 Sr-90/Y-90 dengan jarak SDD=30 cm

Gap (mm)	neto (10^{-11} C/s)
10	1,95
8	1,57
6	1,2
4	0,8
2	0,4

energi rata-rata (J/C)	33,83
luas efisiensi ($1/\text{cm}^2$)	3184,71
massa jenis (kg/cm^3)	773275,60
jari-jari detektor (cm)	1,5
Laju kerma (mGy/h)	252,79

L.1.2 Sr-90/Y-90 dengan jarak SDD=50 cm

Gap(cm)	neto (10^{-12} C/s)
1	6,7
0,8	5,5
0,6	4,2
0,4	2,8
0,2	1,4

energi rata-rata (J/C)	33,83
luas efisiensi ($1/\text{cm}^2$)	3184,71
massa jenis (kg/cm^3)	773275,60
jari-jari detektor (cm)	15
Laju kerma (mGy/h)	88,106

L.1.3 Kr-85 dengan jarak SDD=30 cm

gap (cm)	neto (10^{-12} C/s)
1	7,304
0,8	5,964
0,6	4,578
0,4	3,131
0,2	1,604

energi rata-rata (J/C)	33.83
luas efisiensi ($1/\text{cm}^2$)	3184.71
massa jenis (kg/cm^3)	773275.60
jari-jari detektor (cm)	1.5
Laju Kerma (mGy/h)	93.71

L.2 Laju Paparan Menggunakan Variasi Jarak

L.2.1 Sr-90/Y-90

Jarak (cm)	neto (10^{-12} C/s)
30	19,39
40	10,82
50	6,82
60	4,63
70	3,39
80	2,47
90	1,88
100	1,48

L.2.2 Kr-85

Jarak (cm)	neto (10^{-12} C/s)
30	7,33
40	3,49
50	1,85
60	1,05
70	0,638
80	0,395
90	0,246
100	0,155

L.3 Laju Paparan Menggunakan Variasi Sudut

L.3.1 Sr-90/Y-90

sudut	neto (10^{-11} C/s)
0	1,93
15	1,95
30	2,02
45	2,05
60	2,01
75	1,54
90	0,57

L.3.2 Kr-85

sudut	neto (10^{-11} C/s)
0	0,72
15	0,96
30	0,99
45	0,91
60	0,71
75	0,56
90	0,35

L.4 Dosis Kedalaman

L.4.1 Sr-90/Y-90

depth (μm)	neto (10^{21}C/s)
0	1.92
10	1.94
20	1.94
30	1.96
40	1.97
50	1.98
60	1.99
70	2
80	2.01
90	2.01
100	2.01
110	2.03
120	2.03
130	2.04
140	2.04
150	2.05
160	2.05
170	2.05
180	2.05
190	2.05
200	2.06
210	2.06
220	2.06
230	2.06
240	2.06
250	2.06
260	2.06
270	2.06
280	2.06
290	2.06
300	2.06
500	2.06
800	1.93
1000	1.83
1300	1.63
1500	1.51
1800	1.3
2000	1.17
2300	0.98
2500	0.88
2800	0.72
3000	0.64
3300	0.51
3500	0.45
3800	0.35
4000	0.29
4300	0.22
4500	0.18
4800	0.13
5000	0.11
5300	0.07
5500	0.05
5800	0.03
6000	0.02
6300	0.01
6500	0.007
6800	0.008
7000	-0.0007
7300	-0.003

L.4.2 Kr-85

depth (μm)	neto (10^{21}C/s)
0	0.74
10	0.73
20	0.73
30	0.73
40	0.73
50	0.73
60	0.73
70	0.72
80	0.72
90	0.71
100	0.7
110	0.69
120	0.69
130	0.68
140	0.67
150	0.66
160	0.65
170	0.65
180	0.64
190	0.63
200	0.62
210	0.61
220	0.6
230	0.59
240	0.58
250	0.57
260	0.56
270	0.55
280	0.54
290	0.53
300	0.52
500	0.26
800	0.1
1000	0.05
1300	0.008
1500	0.000059
1800	-0.00025

Lampiran

Contoh Perhitungan Data

L.2.1 Perhitungan Paparan Laju Serap Dosis Radiasi Beta

Misalnya mengambil data dari tabel L.3 dengan sumber radioaktif Kr-85 SDD = 30 cm. Nilai rata-rata dari pengukuran paparan laju serap dosis yang terpapar dari sumber radioaktif (Kr-85), Dengan atau tanpa menggunakan sumber radioaktif, nilai rata-rata itu di kalikan dengan nilai faktor koreksi suhu dan tekanan, nilai faktor koreksi didapat dari persamaan :

$$K_{PT} = \frac{T + 273.15 \text{ K}}{T_0 + 273.15 \text{ K}} \times \frac{P_0}{P}$$

Dimana :

T dan P : suhu dan tekanan saat melakukan pengukuran

P_0 : ketetapan tekanan (1013,25 mBar)

T_0 : ketetapan suhu (20°C)

Dengan Gap(pengatur volume Measurement) 10 mm. dengan suhu : 19,5°C dan tekanan :1008 mBar dengan menggunakan sumber, didapatkan faktor koreksi :

$$\begin{aligned} K_{PT} &= \frac{T + 273.15 \text{ K}}{T_0 + 273.15 \text{ K}} \times \frac{P_0}{P} \\ &= \frac{(19.5 + 273.15)}{(20 + 273.15)} \times \frac{1013.25}{1008} \\ &= 1.0035 \end{aligned}$$

Setelah diketahui nilai dari faktor koreksi suhu dan tekanan, maka akan diketahui pula besar laju dosis serap dari medan radiasi beta dengan menggunakan persamaan Laju Kerma :

$$K_a = \left(\frac{W}{e}\right)_{eff} \frac{1}{(\pi r^2)_{eff}} \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{dQ}{dX}\right)_x$$

Dimana :

K_a : Laju Kerma (Gy/h)

$\left(\frac{W}{e}\right)_{eff}$: nilai rata-rata energi yang dibutuhkan untuk diproduksi pasangan ion diudara (33,83 J/s)

$\frac{1}{(\pi r^2)_{eff}}$: Luas pengukuran efektif dengan jari-jari (1,5 cm), (0,14 cm²)

$\frac{1}{\rho_0}$: Densitas udara saat tekanan 101,3Kpa dan Temperatur 273,15
 K ($\rho = 7,73 \times 10^5 \text{ cm}^3/\text{kg}$)

$\left(\frac{dQ}{dX}\right)_x$: pengukuran arus fungsi jarak eletroda pada saat mendekati nol

Dengan mengetahui pula nilai tetapan dari peramaan Kerma maka dapat pula diketahui dosisnya.

$\frac{dQ}{dX}$ = pada persamaan Grafik ($7,125 \times 10^{-12} \frac{\text{C/s}}{\text{cm}}$)

Sehingga nilai dosis didapat :

$$\begin{aligned} K_a &= \left(\frac{W}{e}\right)_{eff} \frac{1}{(\pi r^2)_{eff}} \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{dQ}{dX}\right)_x \\ &= (33,83 \text{ J/s}) \times (0,14 \text{ cm}^2) \times (7,73 \times 10^5 \text{ cm}^3/\text{kg}) \times (7,125 \times 10^{-12} \frac{\text{C/s}}{\text{cm}}) \\ &= 2,6 \times 10^{-5} \text{ Gy/s} \\ &= 93,71 \text{ mGy/h} \end{aligned}$$

L.2.2 Perhitungan Fungsi Variasi Jarak Radiasi Beta

Misalnya pengambilan data diambil dari tabel L.4 dengan sumber radioaktif Kr-85. Nilai rata-rata dari pengukuran fungsi variasi jarak dari sumber radioaktif (Kr-85), Dengan atau tanpa menggunakan sumber radioaktif, nilai rata-rata itu di kalikan dengan nilai faktor koreksi suhu dan tekanan, nilai faktor koreksi didapat dari persamaan :

Berdasarkan dari prinsip variasi jarak yang telah diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$D_2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \times D_1$$

Dimana :

D_1 : paparan pada bacaan optimal (30cm)

R_1 : jarak optimal (30cm)

R_2 : variasi jarak (40,50,60,70,80,90,100 cm)

Kemudian di cari perbedaan dengan persamaan persentase :

$$\% = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100$$

Dimana :

A : hasil cacahan dari pengukuran

B : hasil perhitungan menggunakan persamaan variasi jarak

Dengan menggunakan sumber radioaktif Sr-90/Y-90, dengan jarak 40 cm dengan Gap standart 10 mm.

$$\begin{aligned}D_2 &= \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \times D_1 \\&= \left(\frac{30}{40}\right)^2 \times 1.164 \\&= 0.65 \text{ nC/menit/cm}\end{aligned}$$

Setelah diketahui nilai dari variasi jaraknya barulah dapat menghitung berapa persentase perbedaannya. Dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned}\% &= \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \\&= \frac{0,645}{0.65} \times 100 \\&= 0.11\%\end{aligned}$$

L.2.3 Perhitungan Fungsi Sudut Radiasi Beta

Sama halnya dengan perhitungan untuk menentukan paparan laju serap dosis beta yang dipancarkan, pada pengukuran dan perhitungan fungsi sudut. Jika pada pengukuran laju paparan menggunakan jarak optimal tetapi menggunakan variasi Gap, lain halnya dengan pengukuran pada fungsi sudut yaitu menggunakan jarak optimal dan Gap standar, hanya saja saat pengukuran ini menggunakan variasi sudut untuk mendapatkan paparan laju serap dosis dengan. Pada proses pengolahan data perhitungan yang digunakan sama dengan perhitungan yang digunakan saat pengolahan data pada paparan laju serap tersebut, dengan mfaktor koreksi dan Kerma udara untuk mengetahui dosis yang terpapar dengan jarak optimal tersebut.

L.2.4 Perhitungan dosis kedalaman

Dengan menggunakan massa jenis dari material yang digunakan dengan massa jenis kulit kita sendiri sehingga pada diketahui faktor koreksi dari faktor gamma yang terdapat pada sumber radioaktif Krypton-85 yaitu sebesar 0.9%. dari hasil cacahan yang diperoleh ini disetarakan dengan massa jenis dari kulit itu sendiri sebagai aplikasi yang digunakan, massa jenis dari kulit itu sendiri adalah $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$. Dengan material yang dipakai adalah

PET dengan massa jenis $\rho = 1.34 \text{ g/cm}^3$. Dengan itu kemudian hasil cacahan dengan massa jenis PET yang diperoleh disetarakan dengan massa jenis kulit dengan menggunakan persamaan faktor koreksi :

$$Fk = \left(\frac{\rho_{kulit} + \rho_{PET}}{\rho_{kulit} + \rho_{udara}} \right)$$

Dengan itu diperoleh hasil yang setara dengan massa jenis kulit sebenarnya.

$$\begin{aligned} Fk &= \left(\frac{\rho_{kulit} + \rho_{PET}}{\rho_{kulit} + \rho_{udara}} \right) \\ &= \left(\frac{0.9 + 0.83}{0.9 + 1.18} \right) \\ &= 0.832 \end{aligned}$$



Lampiran Gambar Penelitian

L.3.1 Peralatan Penelitian



Gambar L.3.1 Peralatan Penelitian

L.3.2 Bahan Penelitian



Gambar L.3.2. Bahan Penelitian