

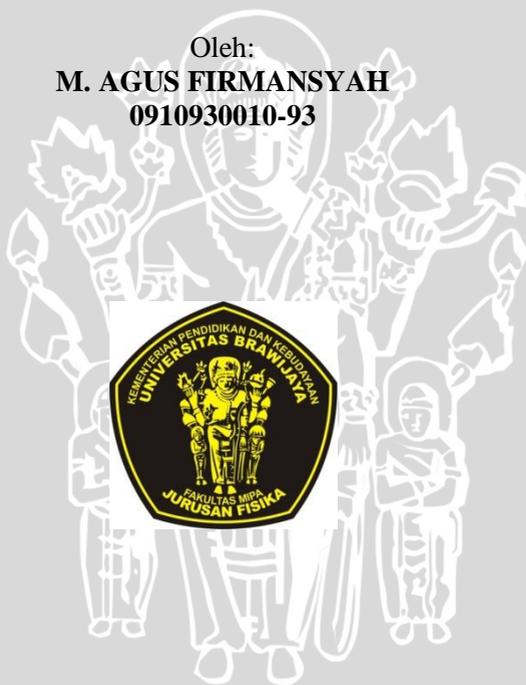
**PENGUKURAN NEUTRON CEPAT DI RUANG LINAC MEDIS
MENGUNAKAN DETEKTOR JEJAK NUKLIR CR-39**

SKRIPSI

Oleh:

M. AGUS FIRMANSYAH

0910930010-93



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2014**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**PENGUKURAN NEUTRON CEPAT DI RUANG LINAC MEDIS
MENGUNAKAN DETEKTOR JEJAK NUKLIR CR-39**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Oleh:

M. AGUS FIRMANSYAH

0910930010-93



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2014**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGUKURAN NEUTRON CEPAT DI RUANG LINAC MEDIS
MENGUNAKAN DETEKTOR JEJAK NUKLIR CR-39**

Oleh:

**M. AGUS FIRMANSYAH
0910930010-93**

**Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika**

Pembimbing I

Pembimbing II

**Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc
NIP. 196501111990021002**

**Drs. Bunawas, APU
NIP. 195608071986021001**

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya**

**Drs. Adi Susilo, Ph.D
NIP. 196312271991031002**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Agus Firmansyah
NIM : 0910930010
Jurusan : Fisika
Penulis tugas akhir berjudul :

PENGUKURAN NEUTRON CEPAT DI RUANG LINAC MEDIS MENGUNAKAN DETEKTOR JEJAK NUKLIR CR-39

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Tugas Akhir ini adalah benar-benar karya saya sendiri, dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka TA ini, semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi TA saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat hukum dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang,
Yang menyatakan,

(M. Agus Firmansyah)
NIM. 0910930010

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



PENGUKURAN NEUTRON CEPAT DI RUANG LINAC MEDIS MENGUNAKAN DETEKTOR JEJAK NUKLIR CR-39

ABSTRAK

Akselerator linear medis (linac) merupakan pesawat pemercepat partikel yang digunakan dalam radioterapi. Linac dapat menghasilkan foton sinar-X energi tinggi yang sangat efektif untuk menyembuhkan tumor atau kanker. Akan tetapi linac yang dioperasikan lebih dari 8 MV dapat menghasilkan radiasi tambahan berupa neutron. Neutron tersebut dapat meningkatkan dosis pada pasien selama proses terapi maupun pada pekerja. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran neutron untuk mengetahui distribusi dosis dan fluks neutron, khususnya neutron cepat, di ruang linac medis tersebut.

Pengukuran neutron dilakukan dengan menggunakan detektor jejak nuklir CR-39, yang dilapisi radiator polietilen dan filter Cu. Detektor dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan sumber neutron standar $^{241}\text{Am-Be}$ di laboratorium neutron PTKMR-BATAN dan diperoleh kurva kalibrasi berupa garis lurus linear. Sejumlah detektor kemudian diletakkan pada beberapa titik di ruangan 10 MV linac medis di rumah sakit Siloam Simatupang. Setelah penyinaran, detektor dietsa dengan larutan NaOH 6,25 N pada suhu 70°C selama 7 jam, kemudian jejak pada detektor dihitung dengan menggunakan mikroskop optik. Hasil pengukuran menunjukkan distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis tersebut nilainya bervariasi mulai dari yang terbesar di titik isocenter pada meja pasien, kemudian menurun seiring semakin jauh jaraknya dari isocenter, dan minimum pada ruang kontrol.

Kata kunci: linac, radioterapi, neutron, neutron cepat, detektor jejak nuklir CR-39, kurva kalibrasi, dosis dan fluks neutron.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



FAST NEUTRON MEASUREMENTS IN THE MEDICAL LINAC ROOM USING CR-39 NUCLEAR TRACK DETECTORS

ABSTRACT

A medical linear accelerator (linac) is a type of particle accelerator that used in radiotherapy. Linac can generate high energy photon X-ray to treat tumor or cancer effectively. But when operating linac at energies above 8 MV, neutrons are produced as secondary radiation. These unwanted neutrons contribute to the patient dose during the treatment, as well as radiation workers in linac room. The aim of this research was to measure and investigate the distribution of neutron dose and fluence, particularly for fast neutron, in the medical linac room.

In this research, CR-39 nuclear track detectors, covered by polyethylene radiator and Cu filter, were applied to measure neutron. The detectors were calibrated using a $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source at neutron laboratory of PTKMR-BATAN and obtained a linear line of calibration curve. A number of detectors were placed and distributed inside and outside the therapy room of 10 MV medical linac at Siloam Hospital Simatupang. After exposure, chemical etching was performed using 6,25 N NaOH solution at 70°C , for 7 hours and the tracks were counted using an optical microscope. The neutron dose and fluence distribution were found maximum at isocenter point in the patient couch. By increasing the distance from isocenter, the neutron dose and fluence decreased rapidly and the minimum at control room.

Keywords: linac, radiotherapy, neutron, fast neutron, CR-39 nuclear track detectors, calibration curve, neutron dose and fluence.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Pengukuran Neutron Cepat di Ruang Linac Medis Menggunakan Detektor Jejak Nuklir CR-39” ini dengan sebaik-baiknya. Sholawat dan salam tetap tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Dalam pelaksanaan maupun penyusunan laporan Tugas Akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, saudara, dan seluruh keluarga yang selalu memberi semangat, doa, dan dukungan kepada penulis
2. Drs. Adi Susilo, Ph.D selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya
3. Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc selaku pembimbing I sekaligus dosen pembimbing akademik, atas segala bimbingan yang diberikan kepada penulis
4. Drs. Bunawas, APU selaku pembimbing II, atas segala bimbingan yang diberikan kepada penulis
5. Seluruh dosen, staf, dan karyawan di Jurusan Fisika, PTKMR-BATAN, dan RS. Siloam Simatupang atas segala bantuannya
6. Pak Syarbaini, Pak Eko, Pak Asep Setiawan, Pak Asep Warsona, Bu Yurfida, Pak Dani, Pak Hasnel, Pak Nurman, Pak Bukhori, Pak Wahyudi, Pak Agung, Pak Ghulam, Bu Ida, Bu Rini, Pak Iman, Pak Ferdi, Pak Salimun, Pak Joni dan seluruh staf dan karyawan PTKMR-BATAN atas segala bantuannya
7. Dokter Yudhi, Bu Sisca, Bu Neli, dan seluruh staf dan karyawan unit Radioterapi RS. Siloam Simatupang atas segala bantuannya
8. Keluarga kos 243 Malang dan keluarga kos Bu Marjo Jakarta atas segala bantuannya
9. Teman-teman Fisika UB 2009 atas segala bantuan dan dukungannya serta semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Akhir kata, penulis memohon maaf sebesar-besarnya atas segala bentuk kekurangan dalam pelaksanaan maupun penyusunan

laporan Tugas Akhir ini dan tetap mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan laporan ini. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga segala yang tertulis dalam laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan. Amin.

Malang, 15 Januari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK/ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Radiasi.....	5
2.2 Radiasi Neutron	5
2.2.1 Sumber radiasi neutron	7
2.2.2 Klasifikasi neutron	9
2.3 Interaksi Radiasi Neutron dengan Materi	9
2.4 Dosimetri Neutron.....	12
2.5 Pengukuran Neutron.....	13
2.5.1 Detektor jejak nuklir	14
2.5.2 Detektor jejak nuklir CR-39.....	18
2.6 Linear Accelerator.....	20
2.6.1 Sumber radiasi neutron dari linac	22
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	25
3.2.1 Fasilitas penyinaran di laboratorium neutron dan rumah sakit Siloam Simatupang	25
3.2.2 Fasilitas etsa kimia di laboratorium kimia lingkungan	25
3.2.3 Fasilitas pembacaan jejak di laboratorium radon	25
3.2.4 Bahan	26
3.2.4 Alat penunjang	26

3.3 Tahap Penelitian	26
3.3.1 Pra penyinaran.....	27
3.3.2 Penyinaran untuk kalibrasi detektor CR-39.....	27
3.3.3 Penyinaran di ruang linac medis	28
3.3.4 Proses etsa detektor CR-39.....	30
3.3.5 Pembersihan detektor CR-39	31
3.3.6 Pembacaan jejak pada detektor CR-39.....	31
3.4 Pengolahan Data	32
3.4.1 Konversi satuan jumlah jejak.....	32
3.4.2 Penentuan fluks neutron	32
3.4.3 Penentuan sensitivitas detektor CR-39	32
3.4.4 Penentuan batas deteksi minimum detektor CR-39.....	33
3.4.5 Pembuatan kurva kalibrasi detektor CR-39	33
3.4.6 Penentuan distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Hasil Pra Penyinaran.....	35
4.1.1 Optimalisasi waktu etsa.....	36
4.2 Hasil Kalibrasi Detektor CR-39.....	38
4.2.1 Data hasil pembacaan jejak.....	38
4.2.3 Kurva kalibrasi.....	40
4.3 Distribusi Dosis dan Fluks Neutron di Ruang Linac Medis	44
4.3.1 Dosis dan fluks neutron di meja pasien	44
4.3.2 Dosis dan fluks neutron di dinding ruangan	45
BAB V PENUTUP	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	50
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik kestabilan inti atom.....	6
Gambar 2.2 Daya tembus radiasi.....	6
Gambar 2.3 Reaksi fisi di dalam reaktor nuklir.....	8
Gambar 2.4 Spektrum neutron sumber $^{241}\text{Am-Be}$	9
Gambar 2.5 Penghamburan elastis dan tidak elastis	11
Gambar 2.6 Reaksi penyerapan inti atom	12
Gambar 2.7 Pemutusan ikatan molekul dan ukuran jejak laten.....	14
Gambar 2.8 Pembentukan jejak tampak pada proses etsa.....	15
Gambar 2.9 Teknik etsa kimia dan elektrokimia.....	17
Gambar 2.10 Ukuran jejak untuk waktu etsa yang berbeda	18
Gambar 2.11 Jejak untuk beberapa sudut datang	18
Gambar 2.12 Struktur kimia CR-39.....	19
Gambar 2.13 Proses pendeteksian neutron dan contoh jejak	20
Gambar 2.14 Bagian-bagian linac	21
Gambar 2.15 Pembangkitan berkas foton dan elektron	22
Gambar 2.16 Spektrum fotoneutron linac	23
Gambar 2.17 Proses fotodisintegrasi dan elektrodintegrasi.....	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	26
Gambar 3.2 Susunan detektor pada pra penyinaran.....	27
Gambar 3.3 Posisi detektor pada fantom dan sumber neutron	28
Gambar 3.4 Posisi detektor pada meja pasien dan ruang linac.....	29
Gambar 3.5 Posisi detektor pada penjepit dalam gelas etsa.....	30
Gambar 3.6 Posisi detektor CR-39 pada preparat.....	32
Gambar 4.1 Jejak pada detektor CR-39 tanpa Cu dan dengan Cu.....	35
Gambar 4.2 Grafik antara waktu etsa dan jejak pada detektor CR-39	37
Gambar 4.3 Jejak detektor CR-39 dengan parameter etsa optimal.....	38
Gambar 4.4 Grafik dosis neutron dan jejak pada detektor CR-39.....	42
Gambar 4.5 Grafik fluks neutron dan jejak pada detektor CR-39.....	43
Gambar 4.6 Distribusi dosis neutron di ruang 10 MV linac.....	46

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Energi foton minimal untuk beberapa atom.....	8
Tabel 2.2 Klasifikasi neutron	9
Tabel 2.3 Nilai faktor bobot radiasi neutron	13
Tabel 2.4 Parameter etsa detektor jejak nuklir	16
Tabel 2.5 Sifat-sifat detektor CR-39 Baryotrak.....	19
Tabel 4.1 Data hasil pembacaan jejak.....	38
Tabel 4.2 Sensitivitas detektor CR-39	39
Tabel 4.3 Perbandingan sensitivitas detektor CR-39	40
Tabel 4.4 Hasil pengukuran dosis dan fluks neutron di meja pasien ..	44
Tabel 4.5 Hasil pengukuran dosis dan fluks neutron di ruang linac ...	46



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Laju Dosis Sumber Neutron Standar $^{241}\text{Am-Be}$	57
Lampiran 2	Penentuan Luasan Field Pada Mikroskop	58
Lampiran 3	Perhitungan Penentuan Waktu Pra Penyinaran	59
Lampiran 4	Perhitungan Penentuan Waktu Penyinaran Kalibrasi	60
Lampiran 5	Pembuatan Larutan Etsa NaOH 6,25 N	61
Lampiran 6	Gambar Alat dan Bahan Penelitian.....	62
Lampiran 7	Data Hasil Pembacaan Jejak.....	66



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Akselerator linear medis atau *medical linear accelerator* (linac) merupakan salah satu aplikasi radiasi dalam bidang kesehatan khususnya untuk keperluan terapi. Terapi dengan menggunakan radiasi atau radioterapi, telah terbukti dapat menyembuhkan penyakit khususnya yang terkait dengan perkembangan sel yang tidak normal, yaitu tumor dan kanker, sehingga radioterapi banyak dijadikan alternatif penyembuhan selain dengan kemoterapi maupun operasi. Menurut Vukovic, dkk. (2010), keberadaan linac dalam radioterapi saat ini sudah menggantikan posisi mesin teleterapi kobalt dan cesium, meskipun keduanya juga masih digunakan. Hal ini dikarenakan linac tidak menggunakan sumber radioaktif, sehingga dirasa lebih aman dari sudut pandang radiologi. Selain itu, foton sinar-X dari linac memiliki energi yang sangat tinggi, sehingga dosis radiasi yang diterima kulit dan jaringan permukaan kulit dapat dikurangi tetapi tetap efektif untuk menghancurkan tumor atau kanker yang letaknya lebih dalam di bawah permukaan kulit (Hsu, dkk., 2010). Akan tetapi, linac yang dioperasikan lebih dari 8 MV, selain dapat menghasilkan foton energi tinggi juga dapat menghasilkan radiasi tambahan berupa radiasi neutron (Hashemi, dkk., 2008).

Linac dapat menghasilkan neutron melalui reaksi fotonuklir (γ, n) antara foton energi tinggi dan bahan dengan nomor atom (Z) tinggi. Sebagian besar dihasilkan pada bahan target tungsten (W), pada kolimator dari bahan timah (Pb), pada filter besi (Fe), dan pada bagian lainnya di dalam kepala linac. Reaksi fotonuklir lain antara foton dengan dinding ruangan, meja pasien, dan tubuh pasien sendiri juga memungkinkan dapat menghasilkan neutron (Al-Ghamdi, dkk., 2008; Szydowski, dkk., 2013). Neutron-neutron yang dihasilkan memiliki jangkauan energi yang lebar, tetapi paling banyak adalah neutron cepat, dengan puncak energi di sekitar 1 – 2 MeV (Al-Othmany, dkk., 2010). Adanya tambahan radiasi neutron cepat tersebut dapat meningkatkan dosis pasien selama proses terapi dan jika mengenai organ tubuh yang sehat akan berpeluang untuk menimbulkan kanker sekunder maupun penyakit non-kanker lainnya

karena neutron sendiri termasuk jenis radiasi pengion dan memiliki faktor bobot radiasi yang besar, yaitu 5 sampai 20, sehingga lebih menyebabkan kerusakan dibandingkan dengan foton hamburan yang hanya memiliki nilai faktor bobot radiasi 1. Adanya tambahan radiasi neutron juga dapat meningkatkan dosis yang diterima pekerja di ruang linac tersebut.

Salah satu metode untuk mendeteksi dan mengukur neutron adalah dengan detektor jejak nuklir atau *nuclear track detectors* (NTDs). Detektor jejak nuklir dapat mendeteksi dan mengukur dosis neutron berdasarkan jejak laten nuklir pada bahan detektor akibat proses ionisasi. Namun jejak tersebut bukan dihasilkan oleh ionisasi neutron secara langsung, karena neutron bermuatan netral, melainkan oleh partikel bermuatan dari hasil reaksi antara neutron dengan inti atom bahan detektor. Jejak laten pada detektor dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop optik setelah diproses terlebih dahulu dengan proses etsa (*etching*). Castillo, dkk. (2013), melaporkan bahwa detektor jejak nuklir jenis CR-39 memiliki efisiensi yang bagus dalam mendeteksi neutron, termasuk neutron cepat.

Berdasarkan penjelasan tersebut maka akan dilakukan penelitian yang berjudul “Pengukuran Neutron Cepat di Ruang Linac Medis Menggunakan Detektor Jejak Nuklir CR-39”. Sebelum digunakan untuk pengukuran, detektor harus dikalibrasi terlebih dahulu dengan menggunakan sumber neutron standar. Detektor jejak nuklir CR-39 sendiri dipilih selain karena efisiensinya yang bagus, juga karena tidak sensitif terhadap foton energi tinggi dari linac sehingga hanya neutron saja yang dapat terdeteksi dan menghasilkan jejak (Castillo, dkk., 2013; Szydowski, dkk., 2013).

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana melakukan optimalisasi tanggapan detektor jejak nuklir CR-39 terhadap neutron cepat, bagaimana membuat kurva kalibrasi dari detektor jejak nuklir CR-39, serta bagaimana distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini dibuat beberapa batasan masalah, yaitu detektor yang digunakan adalah detektor jejak nuklir CR-39 dengan nama dagang Baryotrak buatan Fukuvi Jepang, detektor jejak nuklir

CR-39 dikalibrasi dengan sumber neutron standar $^{241}\text{Am-Be}$ 3 Ci di laboratorium neutron PTKMR-BATAN, pengukuran distribusi dosis dan fluks neutron dilakukan di ruang 10 MV linac medis rumah sakit Siloam Simatupang, serta efek radiasi dari radiasi neutron di ruang linac medis dan rencana proteksi radiasinya tidak dibahas secara detail.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan optimalisasi tanggapan detektor jejak nuklir CR-39 terhadap neutron cepat, membuat kurva kalibrasi dari detektor jejak nuklir CR-39, serta untuk mengetahui distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan data kalibrasi dari detektor jejak nuklir yang dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis. Dengan mengetahui distribusi dosis dan fluks tersebut, maka dapat direncanakan proses proteksi radiasi yang tepat, baik itu untuk pasien maupun pekerja di ruang linac medis itu sendiri, sehingga efek dari tambahan radiasi neutron tersebut dapat dikurangi seminimal mungkin.

Selain itu saat ini telah dikembangkan pula terapi dengan menggunakan neutron cepat (*fast neutron therapy*) untuk tumor atau kanker yang sulit diterapi dengan foton (Rashed, 2010). Pengukuran radiasi neutron yang tepat dapat digunakan sebagai acuan dosimetri neutron untuk proses terapi tersebut.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi

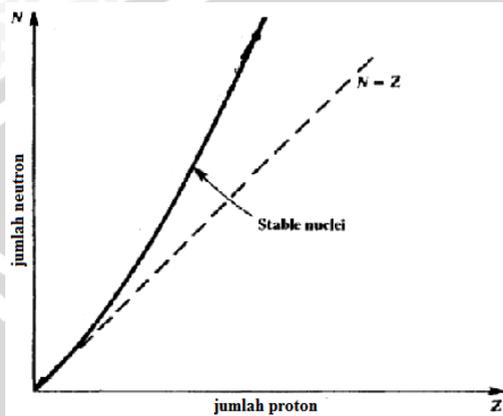
Radiasi merupakan suatu cara perambatan atau pancaran energi dalam bentuk partikel ataupun gelombang elektromagnetik dari sumber ke lingkungannya tanpa membutuhkan medium. Sumber radiasi dapat terjadi secara alamiah maupun buatan. Sumber radiasi alamiah terjadi melalui proses alami di bumi dan atmosfer, contohnya radiasi dari sinar kosmis dan dari peluruhan radioaktif. Sedangkan sumber radiasi buatan berasal dari aktivitas manusia, contohnya radiasi dari aplikasi medis dan dari berbagai peralatan seperti akselerator, siklotron, dan reaktor nuklir (Boel, 2009).

Berdasarkan energinya, radiasi digolongkan ke dalam dua jenis yaitu radiasi pengion dan radiasi non-pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang memiliki energi cukup tinggi untuk dapat mengakibatkan ionisasi di dalam materi atau bahan yang dilaluinya, contohnya radiasi sinar gamma, sinar-X, sinar kosmik, partikel alfa, beta, dan neutron. Sedangkan radiasi non-pengion adalah radiasi yang tidak dapat menimbulkan ionisasi, contohnya radiasi inframerah, gelombang radio, gelombang mikro, dan cahaya tampak (Anies, 2009).

2.2 Radiasi Neutron

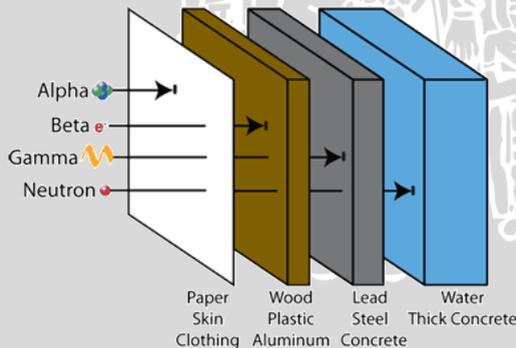
Neutron merupakan partikel yang tidak bermuatan listrik (netral) dan memiliki massa yang kurang lebih sama dengan proton, yaitu $1,6750 \times 10^{-27}$ kg. Neutron, bersama dengan proton, dikenal sebagai *nukleon* yang merupakan penyusun inti atom. Keberadaan neutron di dalam inti atom pertama kali diketahui oleh James Chadwick pada tahun 1932 yang melakukan penelitian dengan menembakkan logam berilium dengan radiasi alfa (Halliday, 1962). Di dalam inti atom, neutron menjadi identitas yang menjelaskan perbedaan antara nomor atom dan nomor massa atom. Secara umum, inti atom disimbolkan sebagai A_ZX , dimana X adalah simbol kimia dari atom, Z adalah nomor atom yang merupakan jumlah proton atau elektron pada atom netral, sedangkan A adalah nomor massa atom yang merupakan jumlah total nukleon (proton dan neutron). Jumlah neutron di dalam inti atom juga menentukan kestabilan inti atom

seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut. Neutron sendiri di luar atom akan bersifat tidak stabil dan memiliki waktu paruh sekitar 10 menit untuk meluruh melalui peluruhan beta (Beiser, 2003; Cember, 1983).



Gambar 2.1 Grafik kestabilan inti atom (Gautreau dan Savin, 1999)

Neutron termasuk jenis radiasi pengion yang dapat menimbulkan ionisasi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Tetapi ionisasi yang ditimbulkan adalah secara tidak langsung karena neutron bermuatan netral. Selain itu, neutron tidak terpengaruh oleh medan listrik di sekitarnya sehingga neutron memiliki daya tembus yang besar (Halliday, 1962), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Daya tembus radiasi (<http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/07springsummer/images/radiation.gif>)

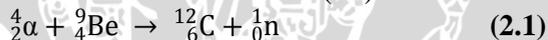
2.2.1 Sumber radiasi neutron

Sumber radiasi neutron dapat dibagi menjadi empat kelompok, yaitu radioisotop, fotodisintegrasi, akselerator partikel, dan reaktor nuklir.

1. Radioisotop

Ada dua macam sumber neutron radioisotop, yaitu secara langsung dan tidak langsung. Neutron dapat dihasilkan secara langsung dari radioisotop yang meluruh secara alami melalui proses *fisi* (pembelahan inti) spontan, yaitu californium-252 (^{252}Cf). Radioisotop ^{252}Cf ini paling banyak digunakan sebagai sumber neutron dan memiliki waktu paruh 2,65 tahun. Neutron yang dipancarkan memiliki jangkauan energi yang besar dengan energi paling mungkin 1 MeV dan rata-rata 2,3 MeV (Cember, 1983).

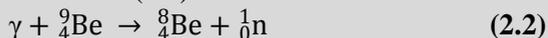
Sumber radioisotop yang tidak langsung adalah radionuklida yang memancarkan partikel alfa. Neutron kemudian dihasilkan dari reaksi nuklir (α, n) antara partikel alfa dengan inti atom target yang stabil, seperti ditunjukkan pada Persamaan reaksi (2.1). Radioisotop yang umum digunakan adalah ^{241}Am -Be, yaitu americium-241 (^{241}Am) sebagai sumber pemancar alfa dengan waktu paruh 432,2 tahun, dan targetnya adalah inti atom berilium (Be).



Energi neutron yang dihasilkan memiliki jangkauan yang besar pula dengan rata-rata 4,2 MeV dan maksimum sekitar 10 MeV (Asamoah, dkk., 2011). Americium juga dapat diganti dengan polonium (Po-Be), seperti pada penelitian yang dilakukan James Chadwick, atau dengan radium (Ra-Be). Sumber pemancar alfa yang digunakan harus dicampur dengan baik dengan berilium karena jangkauan alfa yang pendek. Biasanya campuran berupa bubuk halus dan diletakkan rapat di dalam suatu kapsul (Halliday, 1962).

2. Fotodisintegrasi

Neutron dari sumber fotodisintegrasi dihasilkan oleh interaksi antara foton dengan inti atom melalui reaksi nuklir (γ, n) seperti pada Persamaan reaksi (2.2) berikut.



Foton harus memiliki energi minimal sama dengan energi ikat inti atom untuk dapat menghasilkan neutron, contohnya untuk berilium energi foton harus melebihi 1,67 MeV. Sedangkan untuk

beberapa inti atom lainnya, energi foton harus lebih besar dari 6 MeV seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Energi foton minimal untuk beberapa atom (Wang, 2003)

Inti atom	Energi foton (MeV)
Al	13,1
Fe	11,2
Cu	10,9
W	7,3
Pb	7,4

Jangkauan energi neutron yang dihasilkan dari fotodisintegrasi foton ini lebih monoenergitik daripada neutron dari sumber radioisotop karena biasanya foton yang digunakan juga monoenergitik (Halliday, 1962).

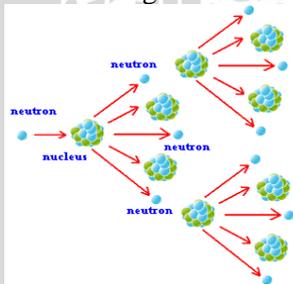
3. Akselerator partikel

Neutron juga dapat dihasilkan dengan akselerator partikel melalui reaksi D-D dan D-T. Selain itu penembakan berilium dengan deutron-deutron berenergi tinggi dalam sebuah siklotron akan menghasilkan neutron melalui Persamaan reaksi (2.3) berikut.



4. Reaktor nuklir

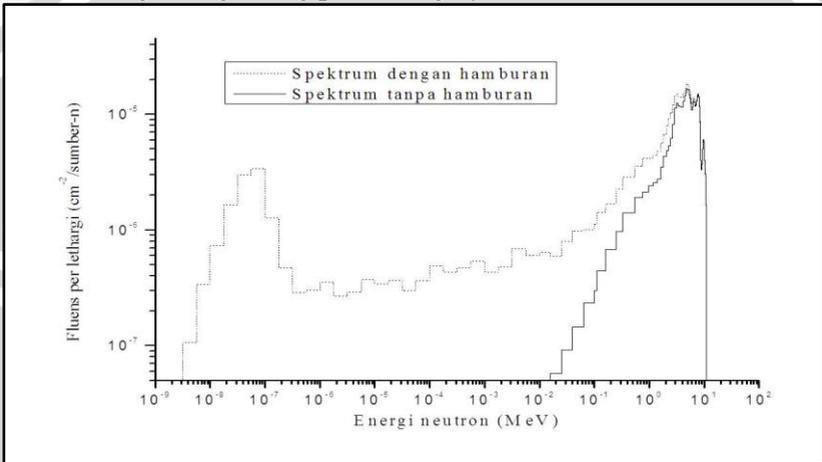
Reaktor nuklir merupakan sumber penghasil neutron yang paling banyak. Pembelahan inti uranium atau inti plutonium di dalam suatu reaktor nuklir akan selalu disertai dengan pemancaran beberapa neutron seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Neutron-neutron hasil pembelahan ini memiliki kisaran energi yang besar, dengan puncak energi pada 0,7 MeV dan nilai tengah sebesar 2 MeV.



Gambar 2.3 Reaksi fisi di dalam reaktor nuklir (<http://images.tutorvista.com/cms/images/95/nuclear-fission-chain-reaction.png>)

2.2.2 Klasifikasi neutron

Neutron memiliki kisaran jangkauan energi yang sangat besar dan distribusi energinya yang bervariasi yang dikenal sebagai spektrum neutron, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 (Vega-Carillo, dkk., 2009). Maka dari itu neutron diklasifikasikan sesuai dengan energinya karena tipe reaksi atau interaksi yang dialami neutron sangat bergantung pada energinya.



Gambar 2.4 Spektrum neutron sumber $^{241}\text{Am-Be}$ (Dumais, 2012)

Secara garis besar neutron dibagi menjadi tiga, yaitu neutron lambat (*slow neutron*), neutron sedang (*intermediate neutron*), dan neutron cepat (*fast neutron*). Namun ada pula yang mengklasifikasikan neutron sebagai neutron termal (*thermal neutron*), neutron epitermal (*epithermal neutron*), dan neutron cepat, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi neutron (Cember, 1983; Hill, 2005)

Nama		Energi
Neutron lambat	Neutron termal	< 0,025 eV
	Neutron epitermal	0,025 eV – 0,5 eV
Neutron sedang		0,5 eV – 100 keV
Neutron cepat		> 100 keV

2.3 Interaksi Radiasi Neutron dengan Materi

Jika suatu neutron berinteraksi dengan materi atau bahan, jumlah neutron akan berkurang secara eksponensial seperti halnya

foton. Tetapi pengurangan jumlah neutron bukan bergantung pada koefisien atenuasi linear melainkan tergantung pada tampang lintang nuklir (*cross-section nuclear*). Secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$I = I_0 e^{-\sigma N x} \quad (2.4)$$

Dengan I_0 adalah intensitas neutron awal (neutron/s, selanjutnya ditulis n/s), I adalah intensitas (n/s) setelah melewati bahan dengan tebal x (cm), σ adalah tampang lintang nuklir (cm^2/atom), dan N adalah kerapatan atom bahan (atom/cm^3).

Mekanisme interaksi neutron tersebut dapat terjadi melalui dua proses, yaitu penghamburan dan penyerapan.

1. Penghamburan (*scattering*)

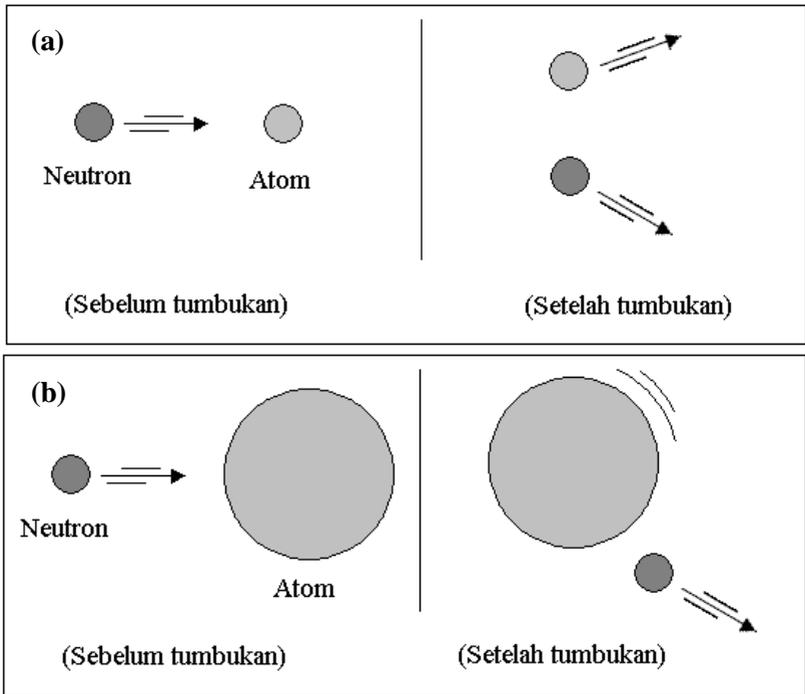
Neutron yang berinteraksi atau bertumbukan dengan inti atom dapat mengalami proses penghamburan baik secara elastis maupun tidak elastis. Jika mengalami penghamburan tidak elastis, neutron akan mengaktifkan inti atom dalam bahan dan akan memancarkan energi berupa neutron dan foton. Ambang batas energi neutron untuk penghamburan tidak elastis ini sekitar beberapa MeV dan tampang lintangnya bernilai kecil.

Untuk neutron cepat akan lebih memungkinkan terjadi penghamburan elastis karena memiliki energi yang cukup tinggi untuk menumbuk dan menghamburkan/melontarkan inti atom. Inti atom yang terhambur ini kemudian menjadi partikel pengion, kebanyakan adalah inti atom hidrogen (proton) sehingga penghamburan elastis ini sering ditulis sebagai reaksi inti (n,p). Pada interaksi penghamburan elastis ini berlaku hukum kekekalan energi dan momentum, dan energi neutron (E) setelah tumbukan adalah sebagai berikut (Stabin, 2008; Cember, 1983).

$$E = E_0 \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \quad (2.5)$$

Dengan E_0 adalah energi awal neutron, m adalah massa neutron, dan M adalah massa inti atom yang terhambur. Dari persamaan tersebut diketahui energi neutron akan semakin kecil jika M mendekati m , yaitu bahan dengan nomor atom rendah. Maka dari itu, bahan yang banyak mengandung atom hidrogen, seperti parafin sangat baik sebagai perisai radiasi neutron. Metode penghamburan elastis ini juga digunakan pada reaktor nuklir untuk melemahkan neutron cepat menjadi neutron termal agar radiasi neutron yang dihasilkan dapat

dikurangi (Wiryosimin, 1995). Proses penghamburan ini ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut.



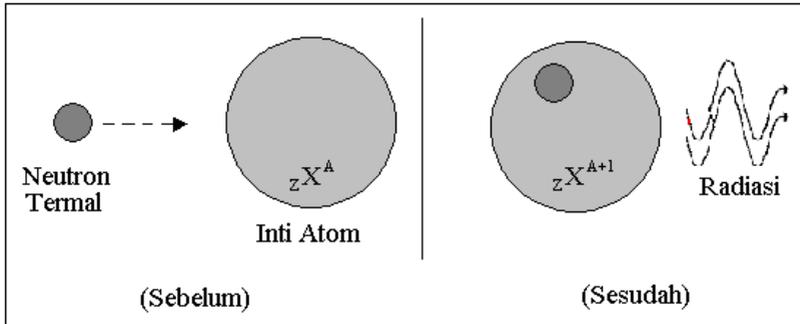
Gambar 2.5 Penghamburan elastis (a) dan tidak elastis (b)
(Pusdiklat BATAN, 2008)

2. Penyerapan (*absorption*)

Neutron cepat yang telah menjadi atau mendekati energi neutron termal dari proses penghamburan elastis akan memilikiampang lintang yang besar dan kemungkinan untuk ditangkap dan diserap oleh inti atom bahan meningkat. Inti atom yang menyerap neutron akan menjadi radioaktif dengan reaksi inti yang berbeda, diantaranya (n,γ) , (n,α) , (n,p) , dan lain-lain sehingga proses penyerapan ini juga disebut sebagai proses aktivasi neutron, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Proses ini sangat berguna terutama untuk memproduksi radionuklida untuk keperluan medis (radiofarmaka). Jumlah radionuklida yang terbentuk dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$\lambda N = \phi \sigma n (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.6)$$

Dengan ϕ adalah fluks neutron ($n/cm^2.s$), σ adalah tampang lintang nuklir ($cm^2/atom$), n adalah jumlah atom target, N adalah jumlah atom radioaktif, dan λ adalah konstanta peluruhan radioaktif (Stabin, 2008; Cember, 1983).



Gambar 2.6 Reaksi penyerapan inti atom (Pusdiklat BATAN, 2008)

2.4 Dosimetri Neutron

Dosimetri membahas tentang besaran dan satuan radiasi. Sama seperti jenis radiasi lainnya, radiasi neutron juga memiliki beberapa besaran yang penting seperti fluks, intensitas neutron, dosis serap, dan dosis ekuivalen.

1. Fluks neutron

Fluks neutron (ϕ) merupakan hasil bagi dN dengan da , dimana dN adalah jumlah neutron yang melewati suatu tampang lintang seluas da .

$$\phi = \frac{dN}{da} \quad (2.7)$$

Satuan fluks neutron ini adalah neutron/ m^2 atau sering dinyatakan juga dengan n/cm^2 . Selanjutnya dikenal laju fluks neutron ($\dot{\phi}$) yang menyatakan jumlah fluks dalam selang waktu dt tertentu.

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

Satuan laju fluks neutron adalah $n/cm^2.s$ (ISO, 2000).

2. Intensitas neutron

Intensitas neutron merupakan nilai rata-rata dari jumlah neutron yang dipancarkan (dN^*) oleh suatu sumber neutron dalam selang waktu tertentu. Besaran ini dikenal juga sebagai kuat sumber neutron (B).

$$B = \frac{dN^*}{dt} \quad (2.9)$$

Satuan kuat sumber neutron ini adalah n/s (ISO, 2000).

3. Dosis serap

Dosis serap (D) merupakan hasil bagi dE dengan dm, dimana dE menyatakan energi yang diberikan oleh radiasi pengion pada massa dm tertentu dalam suatu bahan.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.10)$$

Satuan dosis serap ini adalah J/kg atau *gray* (Gy).

4. Dosis ekuivalen

Dosis ekuivalen didefinisikan sebagai hasil kali dosis serap (D) dan w_R , dimana w_R adalah faktor bobot radiasi.

$$H = D \times w_R \quad (2.11)$$

Faktor bobot radiasi untuk neutron berbeda-beda sesuai dengan energinya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3. Satuan dari dosis ekuivalen adalah J/kg atau dinamakan *sievert* (Sv) untuk membedakannya dengan dosis serap. Besaran ini sering dinyatakan juga sebagai laju dosis ekuivalen, \dot{H} .

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (2.12)$$

Satuan laju dosis ekuivalen adalah Sv/s (ISO, 2000).

Tabel 2.3 Nilai faktor bobot radiasi neutron (Wiryosimin, 1995)

Energi neutron	w_R
< 10 keV	5
10 keV – 100 keV	10
> 100 keV – 2 MeV	20
> 2 MeV – 20 MeV	10
> 20 MeV	5

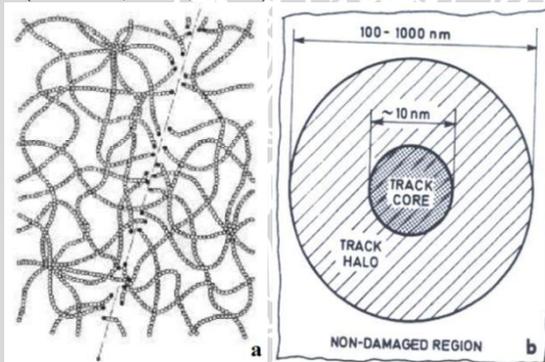
2.5 Pengukuran Neutron

Neutron tidak dapat mengionisasi atom secara langsung, maka untuk mendeteksinya neutron harus bereaksi dengan suatu bahan lain sehingga dihasilkan suatu foton ataupun partikel bermuatan yang dapat dideteksi detektor. Reaksi yang memungkinkan adalah melalui reaksi penghamburan maupun reaksi penyerapan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Beberapa detektor telah dikembangkan untuk mendeteksi neutron berdasarkan kedua reaksi tersebut diantaranya detektor proporsional gas boron (BF_3), detektor albedo, detektor gelembung (*bubble detectors*), dan detektor jejak nuklir (Stabin, 2008).

2.5.1 Detektor jejak nuklir

Detektor jejak nuklir atau *nuclear track detectors* (NTDs) biasanya merupakan film detektor zat padat atau *solid state nuclear track detectors* (SSNTDs). Ada beberapa jenis zat padat yang digunakan seperti dari jenis anorganik misalnya kristal kuarsa, kaca silika, dan mika. Dari jenis zat padat organik misalnya polimer atau plastik seperti selulosa nitrat (LR-115, CN-85, CA-80), polikarbonat (Lexan, Makrofol, Iupilon), poly allyldiglicol carbonat (PADC) seperti CR-39, dan lain-lain (Purba, 1992).

Detektor jejak nuklir dapat mendeteksi neutron berdasarkan kerusakan yang ditimbulkan oleh partikel bermuatan sepanjang lintasannya pada bahan detektor. Kerusakan ini merupakan hasil pemutusan ikatan molekul di dalam bahan detektor, akibat proses ionisasi dan eksitasi dari partikel bermuatan, yang kemudian dapat ditandai dengan terbentuknya jejak laten seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 (Castillo, dkk., 2013).



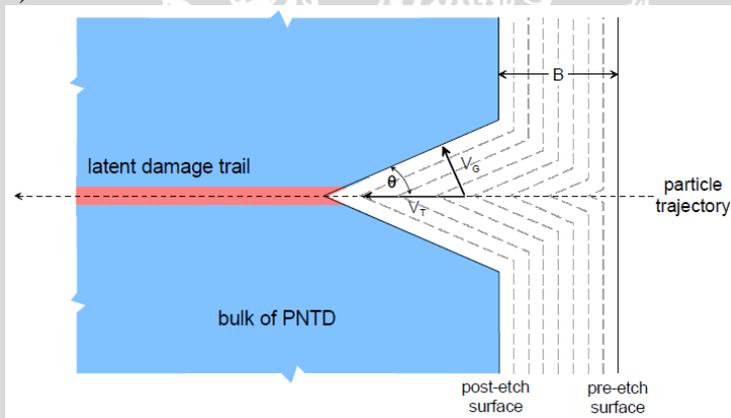
Gambar 2.7 Pemutusan ikatan molekul yang membentuk jejak laten partikel (a) dan ukuran jejak laten (b) (Manzoor, 2007)

Partikel bermuatan yang dihasilkan berasal dari interaksi neutron dengan bahan detektor maupun dengan bahan tambahan lain sesuai dengan energi neutron. Untuk neutron cepat, partikel yang dihasilkan adalah proton melalui proses interaksi penghamburan elastis (n,p). Neutron cepat memiliki cukup energi untuk menghamburkan/melontarkan proton pada bahan detektor. Proton hamburan (*proton recoil*) ini yang kemudian menyebabkan ionisasi dan menghasilkan jejak pada detektor. Untuk meningkatkan respon atau sensitivitas dari detektor dapat dilakukan dengan menambah

bahan radiator yang banyak mengandung hidrogen, seperti polietilen, karena proton recoil juga dapat dihasilkan di dalamnya (Ipe, dkk., 1992).

Sedangkan untuk neutron termal tidak dapat langsung berinteraksi dengan bahan detektor karena energinya yang kecil, sehingga harus ditambahkan bahan radiator berupa litium borat yang dapat menghasilkan partikel alfa melalui reaksi (n,α) . Partikel alfa kemudian dapat menyebabkan ionisasi dan menghasilkan jejak pada detektor (Ramain, 1991).

Jejak yang dihasilkan pada detektor tidak dapat dilihat langsung karena ukurannya dalam orde nanometer seperti pada gambar 2.4, sehingga diperlukan suatu proses untuk membuat jejak laten tersebut menjadi jejak yang tampak, yang dikenal dengan proses etsa (*etching*). Proses etsa ini dapat dikatakan sebagai proses pelarutan atau pengikisan. Bagian detektor yang telah terputus ikatan molekulnya akibat proses ionisasi akan lebih cepat terlarut, sehingga akan terbentuk suatu jejak berupa lubang kerucut atau silinder seperti pada Gambar 2.8. Setelah dilakukan proses etsa, ukuran jejak akan bertambah besar sampai orde mikro dan dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop optik (BAPETEN, 2003; Castillo, dkk., 2013).



Gambar 2.8 Pembentukan jejak tampak pada proses etsa (Benton, 2012)

Ada dua teknik etsa yang umum digunakan, yaitu teknik etsa kimia biasa dan teknik etsa elektrokimia.

1. Teknik etsa kimia biasa

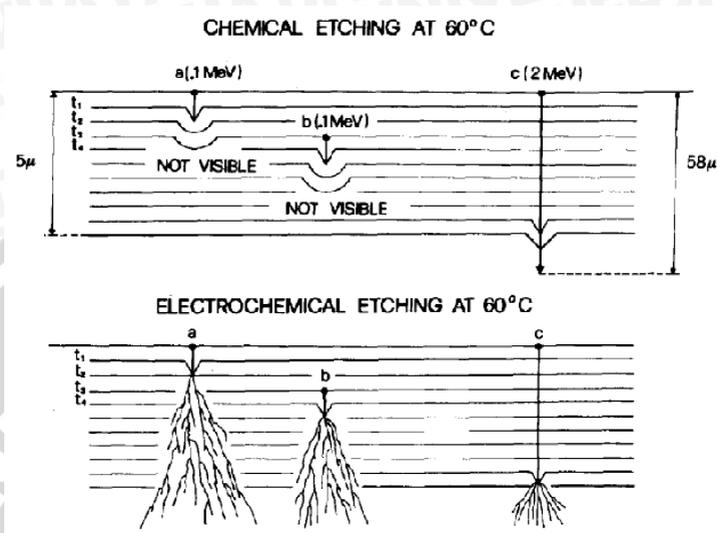
Ada beberapa parameter etsa yang harus diperhatikan pada teknik etsa kimia biasa ini, yaitu konsentrasi larutan etsa, temperature etsa, dan waktu etsa. Parameter etsa berbeda-beda sesuai dengan detektor jejak nuklir yang digunakan agar diperoleh hasil jejak dengan kondisi atau kualitas yang optimal (Castillo, dkk., 2013). Pada Tabel 2.4 ditampilkan parameter etsa untuk beberapa detektor jejak nuklir.

Tabel 2.4 Parameter etsa detektor jejak nuklir (Indriyani, 2011)

	Detektor	Parameter etsa
Anorganik	Mika	20% HF, 23°C, 2 jam
	Kuarsa	48% HF, 52°C, 24 jam
	Kaca silika	48% HF, 23°C, 1 menit
Organik	Selulosa asetat kodacell, Triafol	28% KOH, 60°C, 30 menit
	Selulosa nitrat Daicell	6,25 N NaOH, 23°C, 2-4 jam
	Polikarbonat: Lexan, Makrofol, Merlon, Kimfol	6,25 N NaOH, 50°C, 20 menit
	CR-39	6,25 N NaOH, 70°C, 6-7 jam

2. Teknik etsa elektrokimia

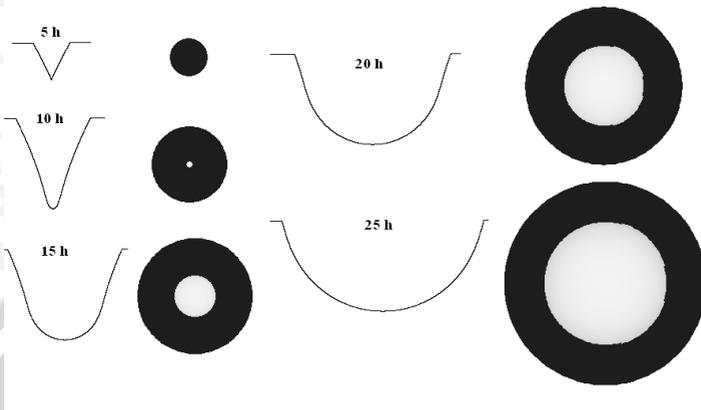
Teknik etsa elektrokimia ini sedikit berbeda dengan teknik etsa kimia biasa, yaitu adanya tambahan sumber tegangan AC dan frekuensi tinggi yang diberikan di antara elektroda selama etsa berlangsung. Sumber tegangan AC yang dihubungkan pada detektor berfungsi untuk menghasilkan medan listrik sehingga akan mempercepat proses penembusan larutan etsa ke dalam jejak laten dan permukaan detektor. Jejak yang terbentuk akan meyerupai pohon (*treeing phenomenon*) karena pada ujung-ujung lubang medan listriknya lebih besar daripada bagian tengah.. Hasil jejak yang terbentuk diameternya akan lebih besar beberapa puluh mikro sehingga pengamatannya menjadi lebih mudah. Perbandingan antara teknik etsa kimia dan elektrokimia ditunjukkan pada Gambar 2.9 berikut (Indriyani, 2011).



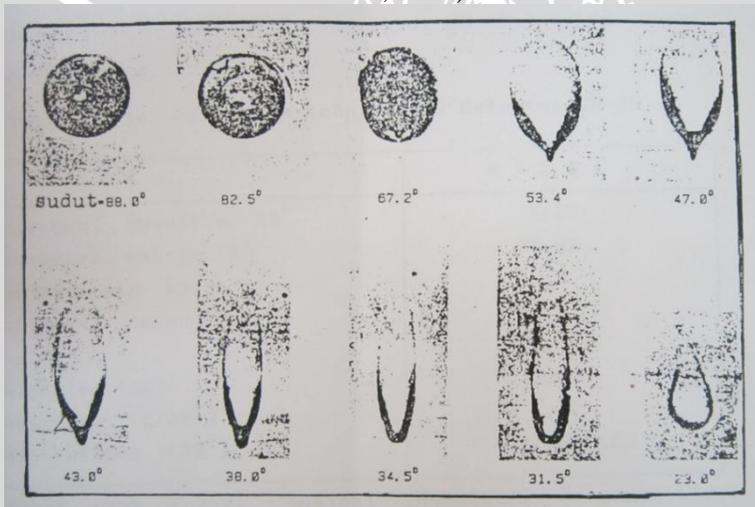
Gambar 2.9 Teknik etsa kimia dan elektrokimia (Tommasino, dkk., 1984)

Struktur jejak yang dihasilkan pada detektor tergantung dari bahan detektor itu sendiri. Ukuran jejak pada zat padat organik biasanya lebih besar karena ikatan molekulnya lebih lemah dibandingkan dengan zat padat anorganik sehingga pada saat proses etsa lebih cepat melarut dan ukurannya pun menjadi lebih besar. Parameter etsa yang digunakan juga sangat mempengaruhi struktur jejak yang terbentuk. Dengan konsentrasi larutan dan suhu yang sama, ukuran jejak akan semakin besar dengan bertambahnya waktu etsa seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 (Purba, 1992).

Selain itu struktur jejak juga dipengaruhi oleh energi dan sudut datang partikel bermuatan yang menumbuk dengan detektor. Semakin besar energi partikel yang datang, semakin jauh partikel tersebut menembus bahan sehingga ukuran jejaknya akan menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan partikel berenergi rendah yang hanya mampu menembus sampai permukaan saja. Sedangkan arah datang partikel lebih mempengaruhi bentuk dari jejak yang dihasilkan. Jika partikel datang tegak lurus terhadap detektor maka jejak akan tampak berbentuk bulat sempurna. Semakin miring sudut datang partikel maka semakin runcing bentuk jejak yang tampak seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Ukuran jejak untuk waktu etsa yang berbeda (Nikezic dan Yu, 2009)

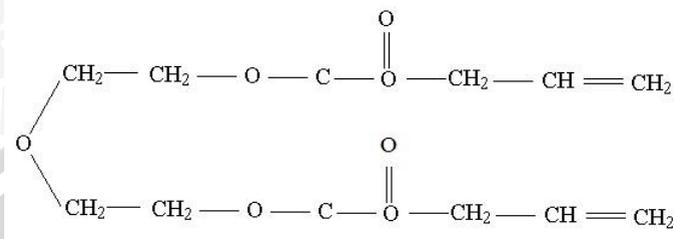


Gambar 2.11 Jejak untuk beberapa sudut datang (Purba, 1992)

2.5.2 Detektor jejak nuklir CR-39

Detektor jejak nuklir yang saat ini banyak digunakan adalah dari jenis zat padat organik polimer atau plastik karena tidak perlu diasah atau dihaluskan seperti detektor anorganik. Detektor dari jenis polimer ini juga lebih sensitif dan di antara yang paling sensitif adalah detektor plastik CR-39. Detektor CR-39 (*Columbia Resin-39*) terbuat dari bahan poly allyldiglicol carbonat (PADC) berupa

lembaran padat dan transparan dengan komposisi kimianya $C_{12}H_{18}O_7$ dan struktur kimianya sebagai berikut (Dhairyawan, dkk., 2003).

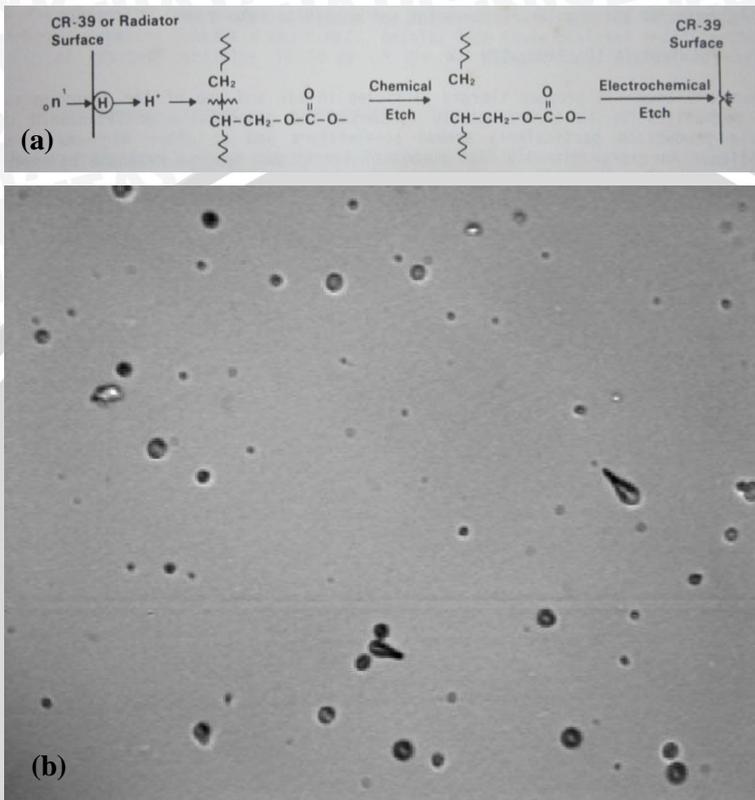


Gambar 2.12 Struktur kimia CR-39 (<http://www.bo.infn.it/slim/images/formCR39.GIF>)

Detektor CR-39 mempunyai sifat-sifat optik seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5. Selama beberapa tahun terakhir ini banyak dikembangkan dan digunakan untuk penelitian karena memang memiliki beberapa kelebihan diantaranya stabil untuk waktu lama karena tidak ada pemudaran jejak, dan tidak sensitif terhadap gamma, UV, sinar-X. Selain itu tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan dan sensitif terhadap jangkauan energi yang lebar dengan nilai ambang batas energinya 50 keV, ringan, ukurannya kecil dan dapat dibuat sesuai keperluan. Sedangkan kekurangannya antara lain mudah retak dan waktu etsa yang cukup lama (Castillo, dkk., 2013; Widayati, 1991). Proses pendeteksian neutron pada detektor CR-39 dan contoh jejak yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.13.

Tabel 2.5 Sifat-sifat detektor CR-39 Baryotrak (Purba, 1992; Indriyani, 2011)

Sifat	Nilai
Gravitasi spesifik 25°C	1,32
Transmisi cahaya (%)	90-92
Absorpsi air (%)	0,7
Potensial ionisasi (eV)	70,2
A/Z	1,877
Ketebalan (mm)	0,80
Kerapatan (g/cm^3)	1,32
Daya rentang (10^5 psi)	5,0-6,03
Panas spesifik (cal/g°C)	0,55

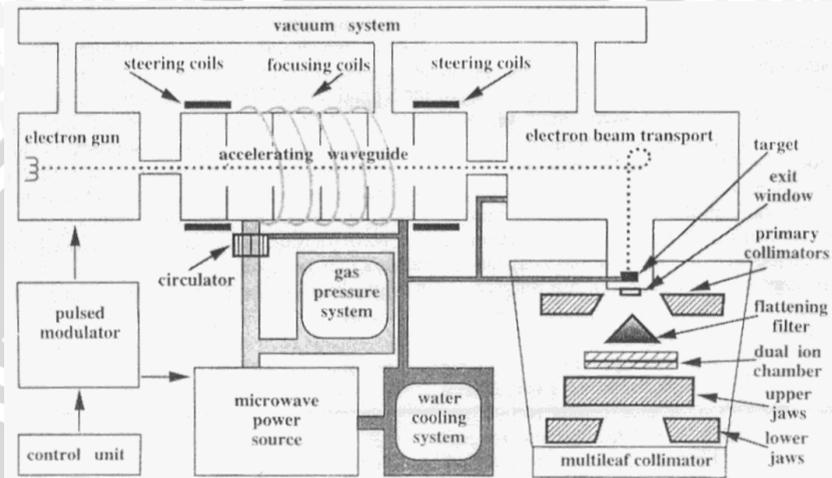


Gambar 2.13 Proses pendeteksian neutron (a) dan contoh jejak pada detektor CR-39 (b) (Parkhurst, dkk., 1986; Hashemi-Nezhad, dkk., 2002)

2.6 Linear Accelerator

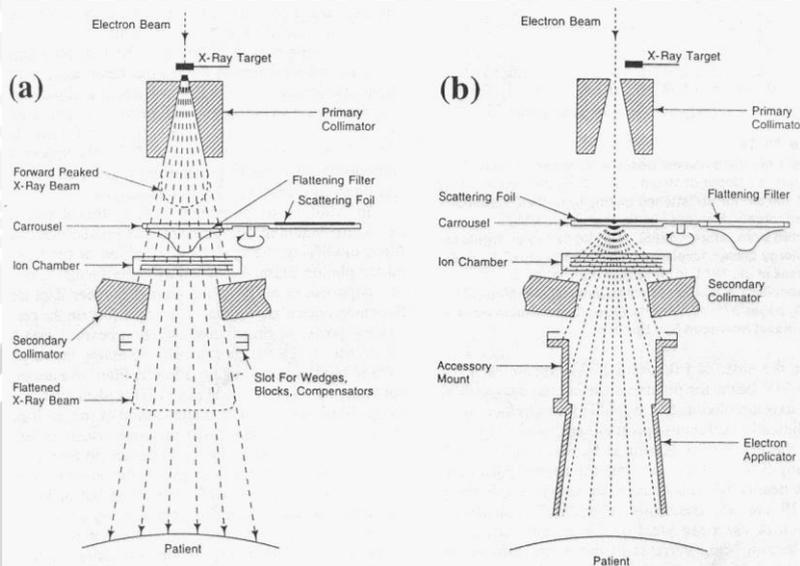
Linear accelerator (linac) merupakan pesawat pemercepat partikel. Dalam radioterapi, linac dapat digunakan untuk mengobati tumor atau kanker karena dapat menghasilkan radiasi pengion energi tinggi dalam orde megavoltage. Dengan energi yang tinggi tersebut dapat memberikan dosis yang lebih efektif ke jaringan kanker dan menurunkan efek terhadap jaringan sehat. Radiasi yang dihasilkan linac dapat berupa berkas elektron ataupun berkas foton (sinar-X). berkas elektron biasanya digunakan untuk terapi tumor dekat permukaan sedangkan sinar-X energi tinggi digunakan untuk tumor yang jauh di dalam kulit.

Bagian-bagian utama linac terdiri dari pembangkit gelombang *radiofrequency* (RF), tabung pembangkit dan pemercepat elektron, dan bagian kepala linac, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Bagian-bagian linac (http://ojs.ujf.cas.cz/~mitja/presentations/AV04/slike/posp_linac.png)

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa elektron dihasilkan di dalam electron gun atau tabung elektron. Elektron kemudian ditembakkan ke dalam tabung accelerating waveguide. Di dalam tabung tersebut elektron dipercepat karena adanya medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh gelombang mikro. Elektron yang telah dipercepat energinya bisa mencapai 4-25 MeV. Bila diinginkan penyinaran berkas elektron, maka elektron energi tinggi tersebut dapat digunakan langsung. Elektron yang dihasilkan merupakan berkas pensil dengan diameter 2-3 cm sehingga untuk menghasilkan distribusi dosis yang merata pada daerah penyinaran, elektron-elektron tersebut harus dilewatkan pada lapisan penghambur (scattering foil). Sedangkan untuk pemakaian sinar-X, elektron energi tinggi tersebut harus ditumbukkan ke bahan target agar dapat dihasilkan sinar-X. Sinar-X yang dihasilkan dilewatkan pada penyaring (flattening filter) agar profil sinarnya rata. Proses pembangkitkan berkas elektron dan berkas foton tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.15 (Herwiningsih, 2011).



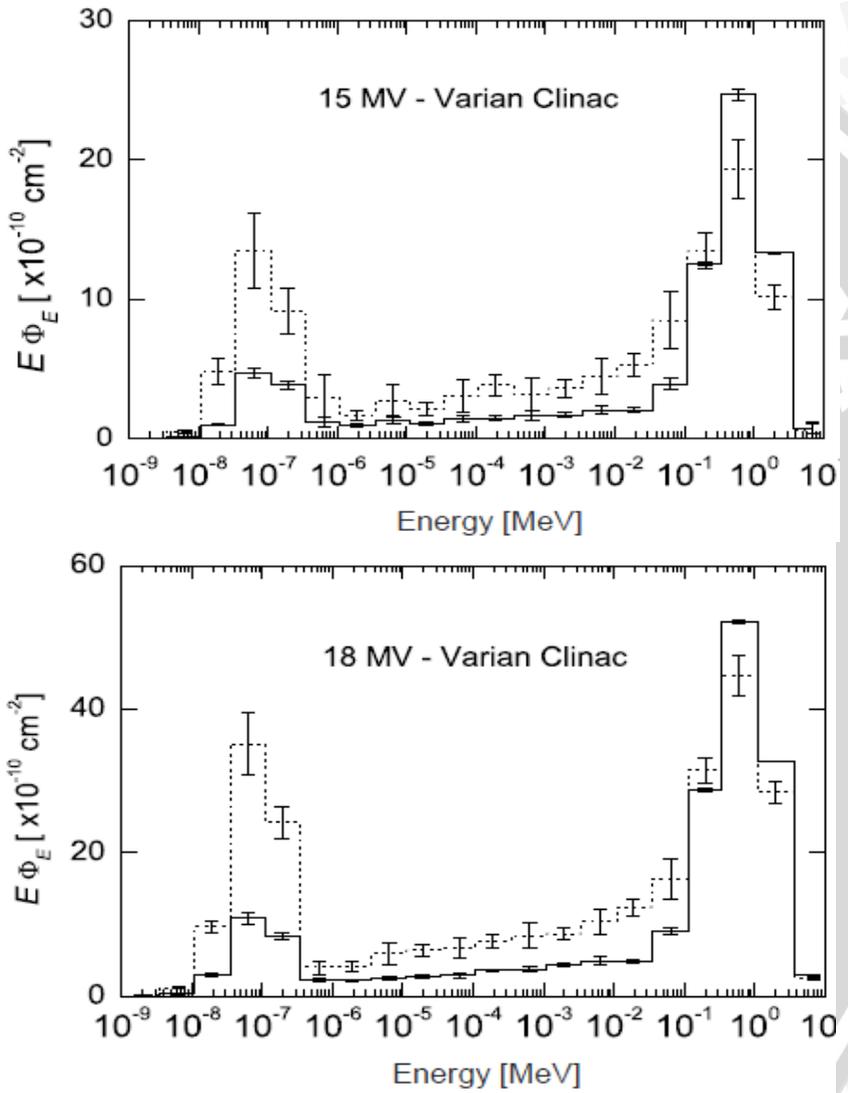
Gambar 2.15 Pembangkitan berkas foton (a) dan elektron (b) (http://ojs.ujf.cas.cz/~mitja/presentations/AV04/slike/posp_glava.png)

2.6.1 Sumber radiasi neutron dari linac

Neutron dari linac sebagian besar dihasilkan melalui proses fotodisintegrasi, yaitu interaksi atau reaksi fotonuklir (γ, n) antara foton sinar-X energi tinggi dengan bahan bernomor atom tinggi di bagian kepala linac seperti bahan target tungsten (W), bahan kolimator timah (Pb), *flattening filter* besi (Fe), *multi leaf collimator*, dan pelindung (*shielding*) kepala linac. Dinding ruangan, meja pasien, dan tubuh pasien sendiri juga memungkinkan dapat menghasilkan neutron melalui proses tersebut. Batas ambang energi untuk terjadinya proses fotodisintegrasi berbeda-beda untuk setiap atom seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Al-Ghamdi, dkk, 2008).

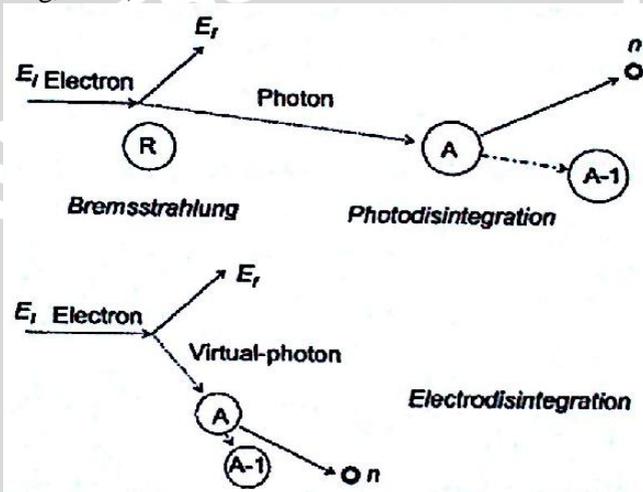
Proses fotodisintegrasi dapat terjadi ketika foton menumbuk inti atom dan energinya terdistribusi merata sehingga membuat neutron di permukaan inti memiliki cukup energi untuk keluar secara isotropis sebagai *evaporation neutron*. Selain itu, foton juga dapat memberi semua energinya ke satu neutron dan mengeluarkannya dari inti atom searah foton datang. Neutron ini dikenal sebagai *knock-on neutron*. Neutron dari fotodisintegrasi ini, sering disebut fotoneutron, memiliki range energi yang lebar dengan rata-rata energi dan

puncaknya di sekitar 1 – 2 MeV, dan puncak lainnya di sekitar 0,025 eV. Gambar 2.16 menunjukkan contoh spektrum fotoneutron dari Varian Clinac 15 MV dan 18 MV (Barquero, dkk, 2005; Vega-Carillo, dkk, 2012).



Gambar 2.16 Spektrum fotoneutron linac (Martinez-Ovalle, 2013)

Selain fotodisintegrasi (γ, n), neutron dari linac juga dapat dihasilkan dari reaksi ($\gamma, 2n$), (γ, pn), ($\gamma, \alpha n$), serta proses elektrodintegrasi ($e, e'n$). Akan tetapi, semua reaksi tersebut memiliki cross section yang sangat kecil yaitu kira-kira 137 kali lebih kecil dari cross section fotodisintegrasi. Kontribusi neutron dari elektrodintegrasi pun hanya sekitar 10% dari fotodisintegrasi, dimana neutron fotodisintegrasi hanya menghasilkan sekitar 0,5% dari dosis foton di titik isocenter. Perbandingan proses fotodisintegrasi dan elektrodintegrasi ditunjukkan pada Gambar 2.17 (Wang, 2003).



Gambar 2.17 Proses fotodisintegrasi dan elektrodintegrasi (Wang, 2003)

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Neutron, Laboratorium Kimia Lingkungan, dan Laboratorium Radon Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN Jakarta Selatan, ruang linac Rumah Sakit Siloam Simatupang, dan Laboratorium Biologi Dasar FMIPA UB, mulai Oktober 2013 sampai dengan Desember 2013.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut. Gambar masing-masing alat dan bahan tersebut ditunjukkan pada Lampiran 6.

3.2.1 Fasilitas penyinaran di laboratorium neutron dan rumah sakit Siloam Simatupang

- Sumber neutron standar $^{241}\text{Am-Be}$ 3 Ci
- Fantom plexiglass ukuran 40 x 40 x 15 cm³
- Meja kalibrasi
- Pesawat linac Varian Trilogy

3.2.2 Fasilitas etsa kimia di laboratorium kimia lingkungan

- Larutan etsa NaOH 6,25 N
- Gelas etsa
- Penjepit
- Oven (Memmert, Jerman)
- Ultrasonic cleaner (Branson 5510, Amerika)
- Desikator/dry keeper

3.2.3 Fasilitas pembacaan jejak di laboratorium radon

- Mikroskop (Nikon Optiphot-2, Jepang)
- Counter
- Kaca preparat
- Mikrometer objektif
- Kamera digital
- Laptop
- Software pengolah citra ImageJ dan digiCamControl.

3.2.4 Bahan

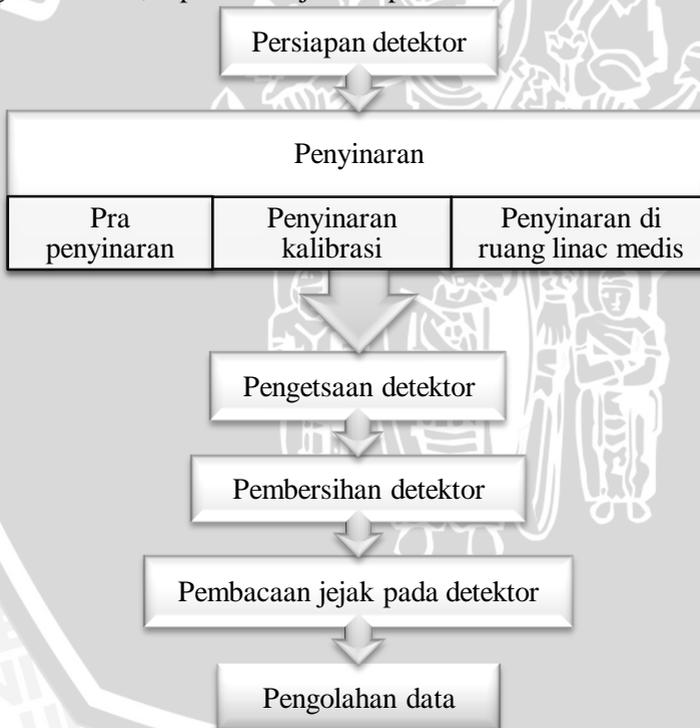
- Detektor jejak nuklir zat padat CR-39 (Baryotrak, Fukuvi Chemical Industry Company, Ltd., Jepang)
- Radiator polietilen dengan tebal 2 mm
- Filter tembaga (Cu) dengan tebal 0,05 mm

3.2.4 Alat penunjang

- Obeng, sarung tangan, masker, tisu, selotip, gunting, cutter, penggaris, serta alat tulis lainnya

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tiga tahapan utama, yaitu pra penyinaran, penyinaran kalibrasi, dan penyinaran di ruang linac medis. Untuk setiap penyinaran dilakukan proses mulai dari persiapan detektor sampai pembacaan jejak pada detektor dan pengolahan data, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3.1 Pra penyinaran

Pra penyinaran ini dilakukan sebagai pendahuluan untuk menentukan metode yang tepat pada penyinaran selanjutnya sehingga dapat diperoleh tanggapan detektor yang optimal.

Sebagai rujukan awal, metode yang digunakan pada pra penyinaran ini berdasarkan Szydowski, dkk. (2013). Ada 2 susunan detektor yang digunakan, susunan pertama detektor CR-39 ukuran $1 \times 1,5 \text{ cm}^2$ dan tebal 0,8 mm hanya dilapisi dengan polietilen dengan tebal 2 mm pada kedua sisinya dan susunan yang kedua detektor CR-39 dilapisi dengan Cu dengan tebal 0,1 mm dan polietilen pada kedua sisinya, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut.



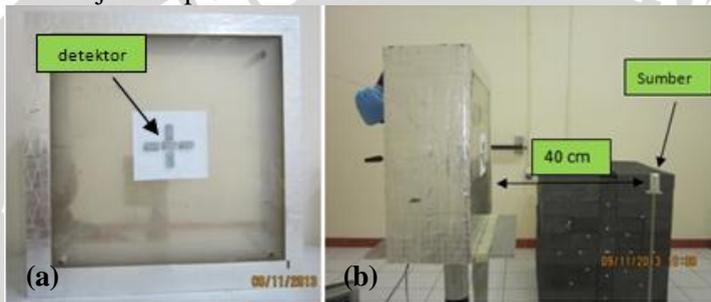
Gambar 3.2 Susunan detektor pada pra penyinaran

Detektor kemudian diberi tanda pada bagian yang aktif, yang lebih sensitif terhadap radiasi, sehingga pada saat penyinaran tidak tertukar dengan bagian yang tidak aktif. Detektor yang telah disiapkan kemudian diletakkan di atas fantom dan disinari dengan berkas neutron standar $^{241}\text{Am-Be}$ dengan dosis kurang lebih 16 mSv atau selama kurang lebih 66,5 jam pada jarak 60 cm dari sumber. Penentuan lamanya waktu penyinaran tersebut ditunjukkan pada Lampiran 3.

3.3.2 Penyinaran untuk kalibrasi detektor CR-39

Penyinaran ini dilakukan untuk memperoleh kurva kalibrasi detektor CR-39 antara dosis dan jumlah jejak pada detektor. Maka dari itu penyinaran berkas neutron akan dilakukan dengan beberapa variasi dosis. Dosis yang diberikan disarankan tidak melebihi batas dosis radiasi sebesar 20 mSv/tahun. Selain itu karena penyinaran berkas neutron di laboratorium neutron PTKMR BATAN masih dilakukan secara manual maka dipilih dosis yang waktu penyinarannya diperkirakan dapat selesai pada hari aktif/kerja, dan telah ditentukan antara lain 1, 3,6, 10, 12, dan 20 mSv.

Untuk penyinaran kalibrasi ini detektor CR-39 disiapkan dengan ukuran $1 \times 2 \text{ cm}^2$ karena berdasarkan pra penyinaran, ukuran $1 \times 1,5 \text{ cm}^2$ terlalu kecil dan sulit untuk menyusun detektor. Dari hasil pra penyinaran juga telah ditetapkan susunan detektor yang digunakan untuk penyinaran kalibrasi dan penyinaran selanjutnya adalah susunan yang kedua, yaitu detektor CR-39 yang dilapisi Cu dan polietilen pada kedua sisinya. Detektor yang telah disiapkan kemudian diletakkan di atas fantom dan disinari dengan berkas neutron dengan variasi dosis tersebut pada jarak 40 cm dari sumber, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



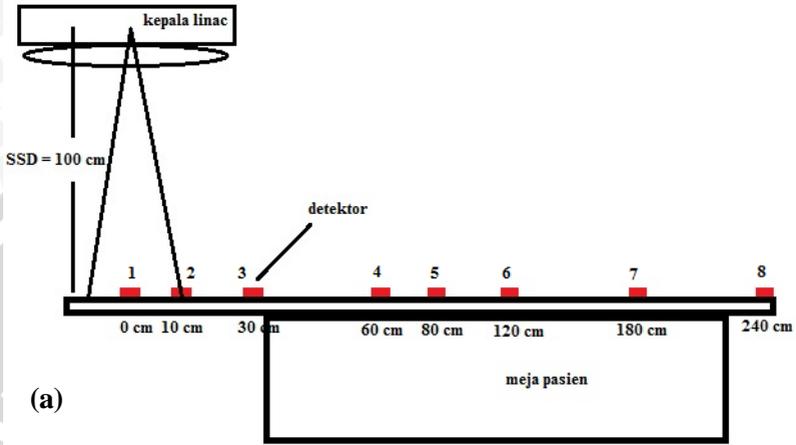
Gambar 3.3 Posisi detektor pada fantom (a) dan posisi fantom dan sumber neutron (b)

Seperti halnya pada pra penyinaran, lama waktu penyinaran untuk setiap dosis ditentukan terlebih dahulu berdasarkan data laju dosis sumber neutron (pada Lampiran 1) yang telah diukur dengan alat ukur neutron standar. Untuk masing-masing variasi dosis tersebut diperoleh waktu penyinaran yaitu selama 2, 7,3, 20, 24, dan 40 jam seperti ditunjukkan pada Lampiran 4. Beberapa detektor yang tidak disinari juga disiapkan untuk penentuan background.

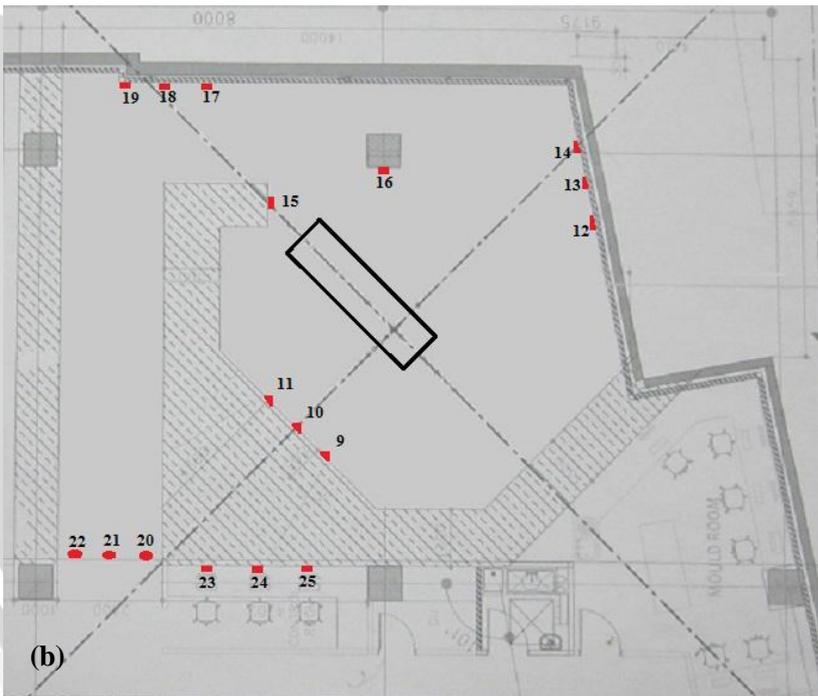
3.3.3 Penyinaran di ruang linac medis

Penyinaran ini dilakukan untuk mengetahui adanya tambahan radiasi neutron cepat dan bagaimana distribusi dosisnya di ruang linac medis. Penyinaran dilakukan dalam dua tahap. Pertama, detektor diletakkan di beberapa titik pada meja pasien dan disinari dengan dosis 8000 MU (laju dosis 400 MU/menit), dimana 1 MU sama dengan 1 cGy, pada lapangan (*field size*) $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Kedua, detektor diletakkan di beberapa titik pada dinding ruangan linac dan ruang kontrol dan disinari selama proses pembuatan kurva PDD

untuk 10 MV (total 28147 MU). Posisi detektor ditunjukkan pada Gambar 3.4.



(a)

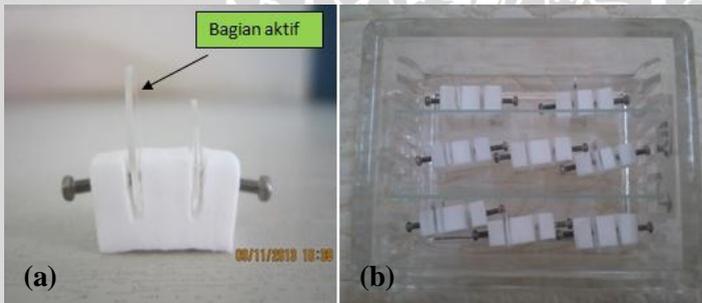


(b)

Gambar 3.4 Posisi detektor pada meja pasien (a) dan dinding ruangan linac (b)

3.3.4 Proses etsa detektor CR-39

Proses etsa yang dilakukan pada penelitian ini adalah etsa kimia biasa karena alat dan bahan yang digunakan serta langkah-langkahnya yang sederhana. Detektor CR-39 yang sudah disinari dilepas dari susunannya dan diletakkan pada penjepit khusus etsa dengan bagian aktif detektor menghadap ke arah dalam penjepit. Pada saat melepas dan meletakkan detektor pada penjepit harus dilakukan dengan hati-hati agar bagian aktif detektor tetap bersih, tidak terkena kotoran maupun minyak dari tangan. Detektor yang sudah dijepit dimasukkan ke dalam gelas etsa dengan urut. Bagian tengah gelas etsa diberi pembatas kaca preparat agar posisi penjepit yang berisi detektor teratur dan tidak tertukar seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Kemudian gelas etsa diisi dengan larutan etsa, sampai seluruh bagian penjepit dan detektor terendam larutan, dan dimasukkan ke dalam oven pada suhu dan selama waktu tertentu. Detektor CR-39 yang tidak disinari untuk penentuan *background* juga dietsa bersamaan.



Gambar 3.5 Posisi detektor pada penjepit (a) dan posisi penjepit dalam gelas etsa (b)

Pada pra penyinaran, detektor yang telah disinari dietsa dengan larutan etsa NaOH 6,25 N pada suhu 70°C selama 5 jam. Parameter etsa tersebut berdasarkan Sydlowski, dkk., (2013) dan digunakan sebagai uji awal. Hasil etsa yang diperoleh ternyata kualitasnya tidak terlalu bagus sehingga dilakukan pra penyinaran ulang. Detektor yang telah disinari ulang kemudian tetap dietsa dengan larutan etsa NaOH 6,25 N pada suhu 70°C tetapi dengan variasi waktu 5, 6, 7, dan 8 jam. Hal ini untuk mengetahui dan mencari waktu etsa yang optimal dari detektor CR-39 yang digunakan. Ternyata diperoleh kondisi optimal yaitu pada waktu etsa

7 jam sehingga untuk penyinaran selanjutnya detektor yang telah disinari dietsa dengan larutan etsa NaOH 6,25 N pada suhu 70°C selama 7 jam. Pembuatan larutan etsa NaOH 6,25 N ditunjukkan pada Lampiran 5.

3.3.5 Pembersihan detektor CR-39

Pembersihan detektor CR-39 ini dilakukan untuk menghilangkan larutan etsa yang masih menempel pada detektor. Larutan etsa di buang lalu gelas etsa diisi dengan akuades sampai penjepit dan detektor terendam seluruhnya. Gelas etsa kemudian dibersihkan di dalam ultrasonic cleaner yang telah berisi air selama 10 menit. Selanjutnya akuades dibuang dan gelas etsa diisi dengan akuades baru. Proses pembersihan ini diulang sebanyak 3 kali agar detektor dapat benar-benar bersih dari larutan etsa.

Detektor CR-39 yang sudah dibersihkan kemudian dikeringkan di dalam desikator selama satu hari. Setelah benar-benar kering, detektor dilepaskan dari penjepit dan dilap dengan tisu untuk membersihkan debu yang menempel.

3.3.6 Pembacaan jejak pada detektor CR-39

Detektor CR-39 yang sudah siap dibaca jejaknya diletakkan terlebih dahulu di atas kaca preparat, dengan bagian aktif detektor menghadap ke atas seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6, karena pembacaan akan dilakukan secara manual dengan mikroskop optik dengan perbesaran 400 kali. Jumlah jejak dihitung tiap satuan luas 1 cm², tetapi dengan menganggap berkas neutron yang datang terdistribusi secara merata pada detektor maka pembacaan jejak cukup dilakukan di sekitar pusat detektor pada beberapa lapangan (*field*) sebanyak 25 field, di mana satu field sama dengan satu luas pandang lensa objektif pada mikroskop atau kira-kira sama dengan lingkaran dengan luas 160000 μm². Dari luasan field ini diperoleh bahwa dalam 1 cm² terdapat 625 field, seperti ditunjukkan pada Lampiran 2. Hal inilah yang juga menjadi alasan pembacaan jejak cukup sebanyak 25 field, yaitu untuk efisiensi waktu pembacaan. Sedangkan untuk pembacaan jejak background hampir dilakukan pada seluruh luasan 1 cm² detektor karena jejaknya yang sedikit. Untuk memudahkan pembacaan jejak, jumlah jejaknya dihitung dengan menggunakan counter.



Gambar 3.6 Posisi detektor CR-39 pada preparat

3.4 Pengolahan Data

Data dari pembacaan jejak yang berupa jumlah jejak tersebut harus diolah terlebih dahulu sehingga diperoleh hasil yang diinginkan, yaitu kurva kalibrasi detektor CR-39 dan distribusi dosis neutron cepat di ruang linac medis.

3.4.1 Konversi satuan jumlah jejak

Pada saat pembacaan jejak dilakukan sebanyak 25 field sehingga satuan jumlah jejaknya adalah jejak/25 field. Sedangkan luasan yang ingin diamati pada detektor dan yang umum digunakan adalah tiap 1 cm² sehingga data jumlah jejak (J) tersebut harus dikonversi menjadi jejak/cm². Karena pada 1 cm² terdapat 625 field, maka konversi satuan dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$J = J \left(\frac{\text{jejak}}{25 \text{ field}} \right) \times 25 \left(\frac{25 \text{ field}}{\text{cm}^2} \right) \quad (3.1)$$

3.4.2 Penentuan fluks neutron

Fluks neutron (ϕ) yang melewati detektor dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\phi = \frac{B \text{ (n/s)} \times t \text{ (s)}}{4\pi r^2 \text{ (cm}^2\text{)}} \quad (3.2)$$

Dengan B adalah kuat sumber neutron ²⁴¹Am-Be 3 Ci yaitu sebesar (5,48 ± 0,18) × 10⁶ n/s (Mendez-Villafane, 2010), t adalah waktu penyinaran dan r adalah jarak antara sumber dengan detektor.

3.4.3 Penentuan sensitivitas detektor CR-39

Sensitivitas (S) atau kepekaan detektor CR-39 dapat diartikan sebagai perbandingan antara banyaknya jumlah jejak yang terbentuk dan banyaknya jumlah neutron yang datang.

Sensitivitas ini dapat dinyatakan dalam dua satuan, yaitu jejak/cm².mSv dan jejak/neutron, dengan persamaan berikut.

$$S = \frac{J(\text{jejak/cm}^2)}{D(\text{mSv})} \quad (3.3)$$

$$S = \frac{J(\text{jejak/cm}^2)}{\phi(\text{n/cm}^2)} \quad (3.4)$$

Dengan D adalah dosis neutron dan ϕ adalah fluks neutron.

3.4.4 Penentuan limit deteksi minimum detektor CR-39

Batas deteksi minimum didefinisikan sebagai jumlah hitungan (dalam hal ini termasuk jejak juga) di atas background yang dapat dideteksi oleh suatu detektor. Secara matematis Curie menuliskan limit deteksi minimum, untuk tiga kali simpangan baku atau tingkat kepercayaan 95%, sebagai berikut.

$$\text{LDM}_{\text{jejak}} = 4,66\sigma_{\text{bg}} + 3 \quad (3.5)$$

Dimana σ_{b} adalah simpangan baku dari background (Stabin, 2008)

3.4.5 Pembuatan kurva kalibrasi detektor CR-39

Setelah ditentukan jumlah jejak dalam satuan jejak/cm² maka dapat dibuat kurva kalibrasi antara dosis dengan jumlah jejak tersebut dengan menggunakan Microsoft excel. Dari kurva tersebut juga dapat ditentukan persamaan garis dan nilai regresinya (R²). Jika diketahui nilai regresinya mendekati 1 maka terdapat hubungan yang sangat erat antara dosis dan jumlah jejak, ditunjukkan oleh persamaan garis yang diperoleh. Kurva kalibrasi antara fluks neutron dengan jumlah jejak juga dapat dibuat dengan cara yang sama.

3.4.6 Penentuan distribusi dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis

Dosis dan fluks neutron cepat di ruang linac medis kemudian dapat diperkirakan dengan mensubstitusi data jumlah jejak dari hasil penyinarannya ke dalam persamaan garis kurva kalibrasi yang telah diperoleh.

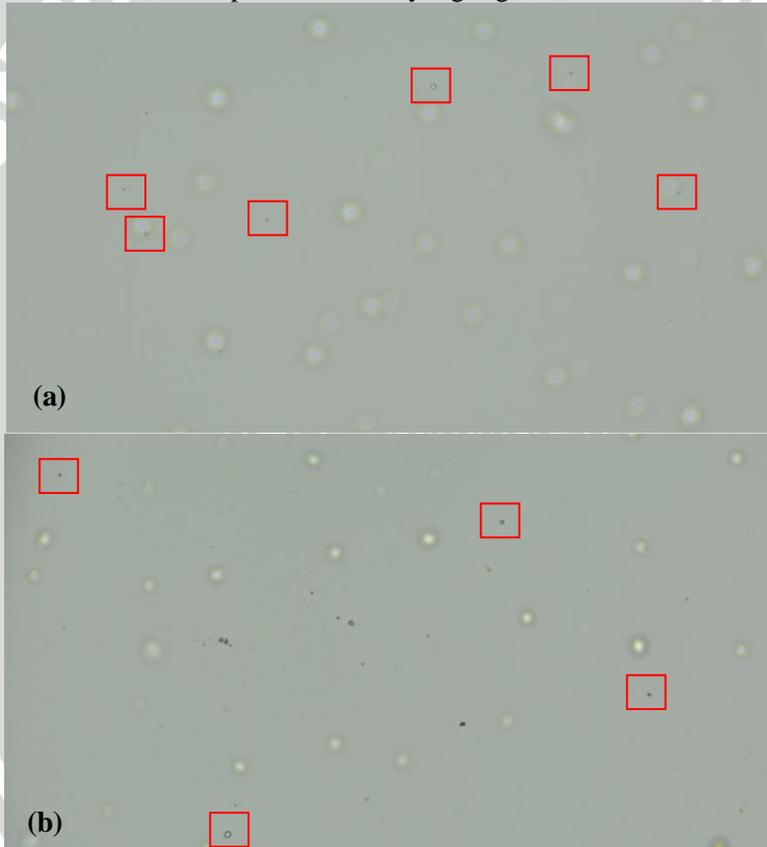
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pra Penyinaran

Jejak yang dihasilkan saat pra penyinaran ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut. Dari hasil pra penyinaran ini dapat diketahui tanggapan detektor CR-39 yang paling optimal terhadap neutron cepat. Hasil tanggapan yang optimal tidak hanya ditandai dengan jumlah jejak yang banyak, tetapi yang paling penting adalah jejak yang jelas dan mudah diamati pada detektor, yang dipengaruhi oleh susunan detektor dan parameter etsa yang digunakan.



Gambar 4.1 Jejak yang tampak pada detektor CR-39 tanpa Cu (a) dan dengan Cu (b)

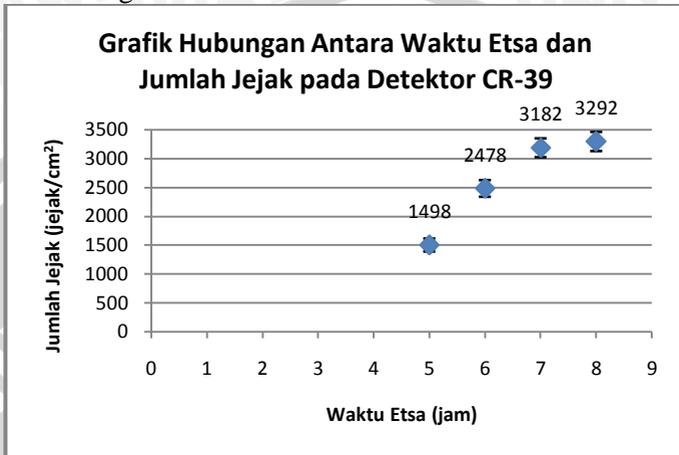
Gambar 4.1 (a) menunjukkan jejak yang dihasilkan (ditandai kotak merah) pada detektor CR-39 yang hanya dilapisi polietilen pada kedua sisinya. Kualitasnya tidak terlalu bagus karena jejak yang dihasilkan sangat kecil, hanya berupa titik dan masih belum terlihat dengan jelas. Jejak yang belum jelas ini disebabkan oleh proton recoil energi tinggi yang dapat menembus detektor lebih dalam yang dihasilkan di dalam bahan radiator polietilen. Radiator polietilen ini digunakan karena sumber neutron $^{241}\text{Am-Be}$ yang digunakan memiliki spektrum energi yang lebar seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Jika tanpa radiator polietilen, detektor CR-39 memiliki sensitivitas maksimum pada energi neutron 4 MeV dan mengalami penurunan setelahnya (Sofyan, 1996). Sedangkan jika ditambah polietilen, detektor CR-39 dapat meningkatkan sensitivitasnya sampai energi 20 MeV (Ipe, dkk., 1992). Hal ini karena polietilen mengandung atom hidrogen yang lebih banyak dari detektor CR-39 sehingga kemungkinan neutron untuk menumbuk dan menghasilkan proton recoil dengan energi tinggi akan meningkat.

Untuk Gambar 4.1 (b) menunjukkan jejak yang dihasilkan pada detektor CR-39 yang dilapisi polietilen dan ditambah filter Cu pada kedua sisinya. Terlihat bahwa jejak yang dihasilkan sudah lebih jelas, meskipun ukurannya masih kecil. Hal ini disebabkan oleh adanya filter Cu yang berfungsi untuk mengurangi energi dari neutron maupun proton recoil yang dihasilkan di dalam polietilen. Karena adanya pengurangan energi tersebut, proton recoil tidak menembus detektor terlalu dalam dan setelah di tsa jejaknya akan tampak lebih jelas dibandingkan dengan detektor yang tidak diberi filter. Maka dari itu untuk mempermudah pengamatan jejak, susunan detektor yang digunakan untuk penyinaran selanjutnya adalah detektor yang dilapisi polietilen dan Cu pada kedua sisinya.

4.1.1 Optimalisasi waktu etsa

Meskipun jejak yang tampak pada detektor polietilen+Cu sudah lebih jelas tetapi ukurannya masih kecil. Hal ini menunjukkan parameter etsa yang digunakan belum optimal karena jejak yang diperoleh masih sulit untuk diamati. Bisa jadi jejak yang kecil itu adalah kotoran, terutama yang berasal dari Cu (karena detektor kontak langsung dengan Cu). Tetapi tidak menutup kemungkinan jejak yang kecil itu merupakan jejak dari proton recoil yang masih

mampu menembus detektor lebih dalam meskipun sudah mengalami penurunan energi.

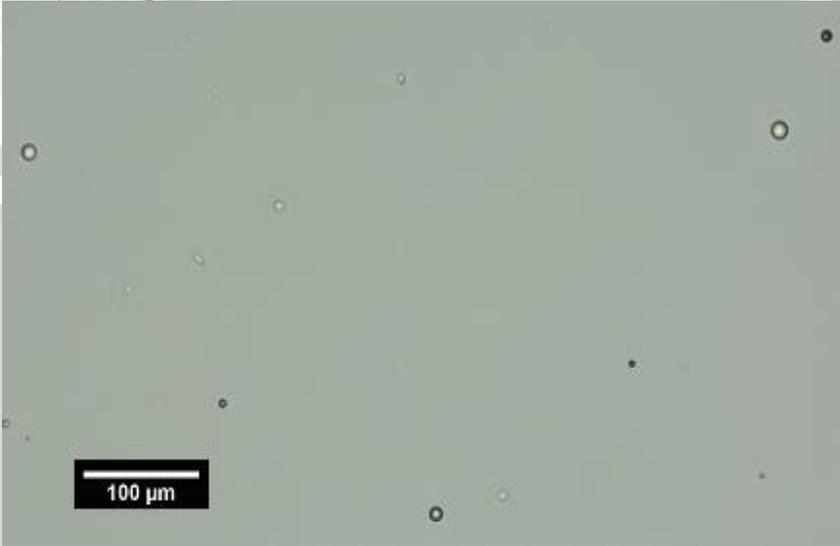


Gambar 4.2 Grafik hubungan antara waktu etsa dan jumlah jejak pada detektor CR-39

Gambar 4.2 tersebut menunjukkan hasil optimalisasi waktu etsa. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa jumlah jejak akan semakin banyak seiring dengan bertambahnya waktu etsa. Hal ini karena jejak yang tadinya kecil ukurannya akan membesar dan jejak akibat proton recoil yang energinya tinggi juga mulai tampak. Pada waktu etsa 6 jam sebenarnya jejak sudah mulai tampak lebih jelas ditandai dengan meningkatnya jumlah jejak dan semakin meningkat jumlah jejaknya untuk waktu etsa 7 dan 8 jam. Tetapi untuk waktu etsa yang lebih lama lagi, jumlah jejak tidak akan bertambah banyak malah akan mengalami penurunan. Hal ini karena meskipun jejak yang lebih dalam akan bermunculan tetapi jejak yang hanya dipermukaan atau tidak terlalu dalam akan habis terkikis dan menghilang. Maka dari itu Castillo, dkk. (2013), menentukan waktu etsa optimal adalah waktu dimana jumlah jejaknya sudah tidak meningkat secara signifikan lagi, yaitu hanya sekitar 5%. Dari definisi tersebut, waktu etsa yang optimal untuk detektor CR-39 pada penelitian ini adalah 7 jam karena peningkatan jumlah jejaknya hanya sekitar 3% bila dibandingkan dengan waktu etsa 8 jam, seperti ditunjukkan pada Lampiran 6.

Kebersihan detektor juga mempengaruhi kualitas jejak yang dihasilkan. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 masih ada larutan etsa

yang menempel pada detektor berupa bercak/noda putih. Maka untuk penyinaran selanjutnya, setelah detektor dietsa dengan larutan etsa NaOH 6,25 N pada 70°C selama 7 jam, detektor dibersihkan/dicuci dengan 3 kali pengulangan. Hasil jejak pada detektor CR-39 dengan polietilen+Cu yang telah dietsa dengan parameter etsa optimal ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Jejak yang tampak pada detektor CR-39 dengan parameter etsa optimal

4.2 Hasil Kalibrasi Detektor CR-39

4.2.1 Data hasil pembacaan jejak

Data hasil pembacaan jumlah jejak pada penyinaran kalibrasi dengan variasi dosis neutron ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Data hasil pembacaan jejak

Dosis (mSv)	Waktu (jam)	Fluks ($\times 10^7$ n/cm ²)	Jumlah jejak (jejak/cm ²)
1	2	0.20	310 ± 27
3.6	7.3	0.72	920 ± 38
10	20	1.96	2200 ± 62
12	24	2.36	2550 ± 80
20	40	3.93	3815 ± 93

Dari data tersebut diketahui bahwa semakin besar dosis yang diberikan maka semakin banyak jejak yang dihasilkan pada detektor. Hal ini karena jumlah neutron yang diberikan (fluks neutron) juga semakin banyak sehingga kemungkinan neutron untuk menumbuk dan menghasilkan proton recoil meningkat. Data jumlah jejak tersebut merupakan jumlah jejak rata-rata per 25 field, dari pembacaan 5 buah detektor, yang telah dikonversi menjadi jumlah jejak per cm^2 menggunakan Persamaan (3.1). Jumlah jejak tersebut juga sudah dikurangi dengan jejak latar belakang (*background*) sebesar 20 jejak/ cm^2 . Jejak background ini dapat disebabkan oleh kontaminasi radon (radiasi partikel alfa) karena memang detektor disiapkan/dipotong di ruang kerja kantor (tidak ada tempat khusus pemotongan detektor). Tetapi untuk mengurangi kontaminasi tersebut, detektor yang telah dipotong langsung disimpan di dalam freezer. Selain itu jejak background ini dapat disebabkan oleh cacat detektor itu sendiri.

Berdasarkan data hasil pembacaan jejak juga dapat ditentukan sensitivitas detektor CR-39 dengan Persamaan (3.3) dan (3.4) seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Sensitivitas detektor CR-39

Dosis (mSv)	Fluks ($\times 10^7 \text{ n/cm}^2$)	Sensitivitas (jejak/ $\text{cm}^2 \cdot \text{mSv}$)	Sensitivitas ($\times 10^{-4}$ jejak/n)
1	0.2	310.0	1.58
3.6	0.7	255.6	1.28
10	1.9	220.0	1.12
12	2.3	212.5	1.08
20	3.9	190.8	0.97

Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa sensitivitas detektor CR-39 bergantung pada besarnya dosis dan diperoleh sensitivitas rata-rata sebesar 238 jejak/ $\text{cm}^2 \cdot \text{mSv}$ atau $1,2 \times 10^{-4}$ jejak/n. Meskipun jumlah jejaknya semakin bertambah seiring bertambahnya dosis neutron yang diberikan, tetapi sensitivitasnya malah mengalami penurunan. Beberapa perbandingan sensitivitas detektor CR-39 pada penelitian ini dengan penelitian orang lain ditunjukkan pada Tabel 4.3. Terlihat bahwa nilainya berbeda satu sama lain. Hal ini disebabkan oleh perbedaan bahan detektor (termasuk susunannya) dan proses etsa yang digunakan. Kedua

faktor tersebut sangat mempengaruhi sensitivitas detektor (Ipe, dkk., 1992).

Tabel 4.3 Perbandingan sensitivitas detektor CR-39

Penelitian	Detektor CR-39	Sensitivitas
Boschung, dkk	PN3/CU + PE, etsa kimia	160 jejak/cm ² .mSv
Boschung, dkk	Tastrak, etsa kimia	30 jejak/cm ² .mSv
Garcia, dkk	Pershore + PE + Makrofol, etsa elektrokimia	350 jejak/cm ² .mSv
Szydowski, dkk	PM-355 + PE + Cu, etsa kimia	1,0 x 10 ⁻³ jejak/n
Penelitian ini	Baryotrak + PE + Cu, etsa kimia	238 jejak/cm ² .mSv 1,2 x 10 ⁻⁴ jejak/n

4.2.3 Kurva kalibrasi

Dari hasil pembacaan jejak maka dapat dibuat kurva kalibrasi antara jumlah jejak yang dihasilkan pada detektor dengan dosis neutron yang diberikan. Dengan mengetahui definisi sensitivitas detektor seperti pada Persamaan (3.3) dan (3.4) maka dibuat interpolasi kurva kalibrasi yang linear dan menghasilkan persamaan:

$$y = 201,4x \quad (4.1)$$

dengan x adalah dosis neutron dalam mSv dan y adalah jumlah jejak dalam jejak/cm² seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Kurva kalibrasi antara fluks neutron dan jumlah jejak juga dibuat linear seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan menghasilkan persamaan:

$$y = (1,03 \times 10^{-4})x \quad (4.2)$$

dengan x adalah fluks neutron dalam n/cm² dan y adalah jumlah jejak dalam jejak/cm². Nilai regresi yang dihasilkan dari kedua persamaan tersebut masing-masing adalah 0,980 dan 0,981. Nilai ini menunjukkan bahwa kurva kalibrasi yang dihasilkan memiliki tingkat kelinearan yang bagus karena nilai regresinya mendekati 1. Tingkat kelinearan menyatakan ukuran seberapa baik kurva kalibrasi yang menghubungkan antara variabel bebas (dalam hal ini dosis dan fluks neutron) dengan variabel terikatnya (jumlah jejak). Jadi dengan menginterpolasikan secara linear saja, sudah terdapat hubungan yang sangat kuat, baik antara dosis dengan jumlah jejak maupun antara fluks neutron dengan jumlah jejak. Meskipun demikian, untuk dapat memperoleh hasil yang lebih baik lagi, maka dapat dianalisis lebih

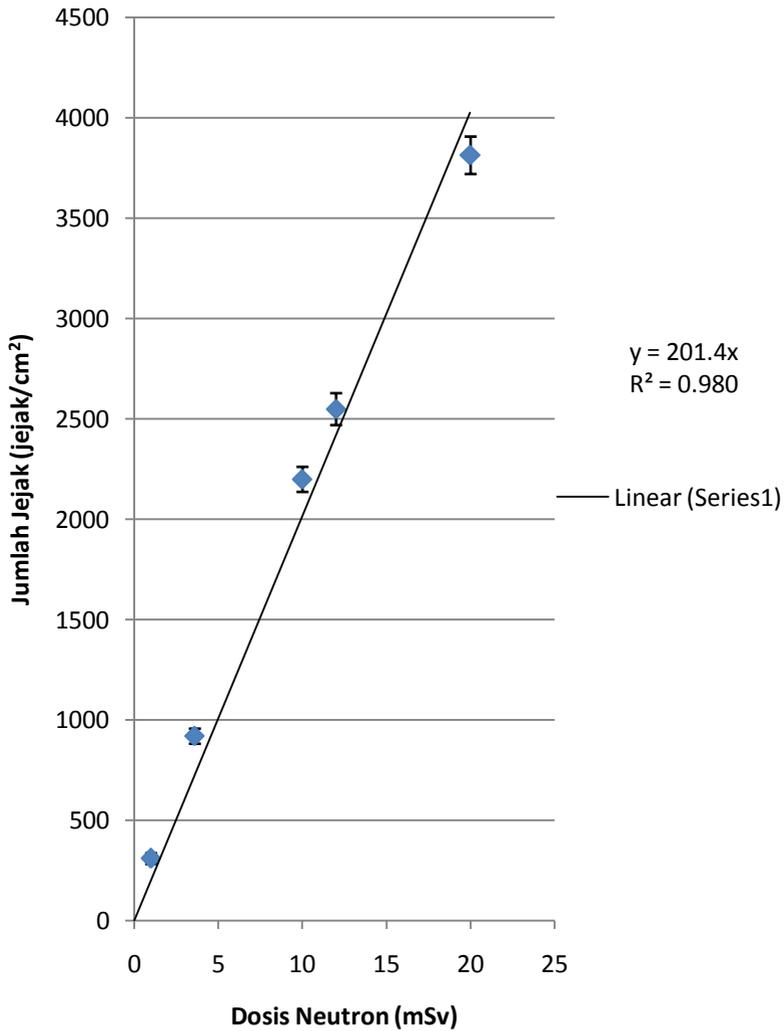
lanjut dengan interpolasi yang lebih kompleks lagi seperti ditunjukkan pada Lampiran 7.

Dari kurva kalibrasi yang dihasilkan juga dapat ditentukan tingkat kemiringannya atau *slope* ($\frac{y}{x}$) yang juga dapat menyatakan sensitivitas dari detektor. Diperoleh bahwa tingkat kemiringannya sebesar 201,4 untuk dosis neutron dan $1,03 \times 10^{-4}$ untuk fluks neutron. Artinya untuk setiap kenaikan dosis sebesar 1 mSv maka jejak pada detektor akan bertambah sebesar 201,4. Begitu juga dengan kenaikan fluks neutron sebesar 1 n/cm^2 maka jejak akan bertambah sebesar $1,03 \times 10^{-4}$. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan sensitivitas rata-rata yang dihitung berdasarkan Tabel 4.2.

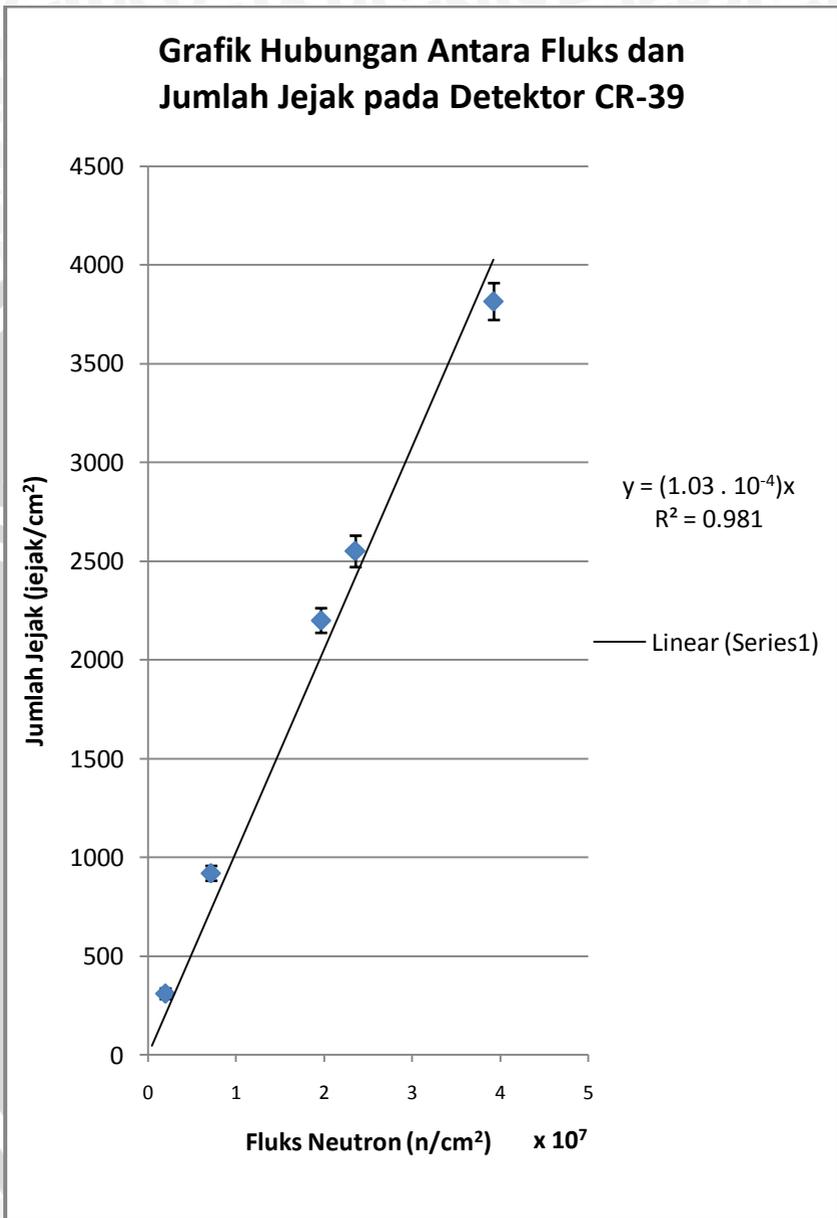
Selain itu dengan menggunakan kedua persamaan kalibrasi tersebut maka dapat diketahui dosis minimum yang dapat dideteksi detektor CR-39 untuk menghasilkan jejak minimum sebesar 12 jejak/cm², yang telah ditentukan sebelumnya dengan Persamaan (3.5), yaitu sebesar 59,6 μSv atau sebanyak $1,2 \times 10^5 \text{ n/cm}^2$. Nilai dosis minimum ini masih lebih kecil dari nilai dosis minimum yang direkomendasikan ICRP yaitu sebesar 80 μSv .

Dari semua keterangan di atas mengenai tingkat kelinearan kurva kalibrasi yang tinggi, kesesuaian sensitivitas detektor yang diperoleh dari perhitungan rata-rata dan interpolasi kurva, dan juga limit deteksi minimum yang masih dibawah nilai rekomendasi, menunjukkan bahwa detektor masih dalam keadaan bagus, metode yang digunakan pada penelitian ini juga cukup bagus, dan langkah atau prosedur kerja yang dilakukan telah sesuai dengan yang diharapkan.

Grafik Hubungan Antara Dosis dan Jumlah Jejak pada Detektor CR-39



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara dosis neutron dan jumlah jejak pada detektor CR-39



Gambar 4.5 Grafik hubungan antara fluks neutron dan jumlah jejak pada detektor CR-39

4.3 Distribusi Dosis dan Fluks Neutron di Ruang Linac Medis

4.3.1 Dosis dan fluks neutron di meja pasien

Tabel 4.4 menunjukkan hasil dosis neutron, dinyatakan dalam dosis ekuivalen (mSv/Gy) dan fluks neutron cepatnya ($n/cm^2.Gy$). Hasil ini didapatkan dengan mensubstitusi jumlah jejak ke dalam Persamaan kalibrasi (4.1) dan (4.2). Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai dosis dan fluks neutron bervariasi mulai dari yang tertinggi pada titik isocenter yaitu 0,4255 mSv/Gy atau $8,32 \times 10^5 n/cm^2.Gy$ dan berkurang seiring dengan semakin jauh jaraknya dari titik isocenter.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran dosis dan fluks neutron di meja pasien

No	Posisi	mSv/Gy	$n/cm^2.Gy$
1	0 cm (IC)	0.4255	8.32×10^5
2	10 cm	0.2331	4.56×10^5
3	30 cm	0.1275	2.49×10^5
4	60 cm	0.0479	9.38×10^4
5	80 cm	0.0360	7.04×10^4
6	120 cm	0.0217	4.24×10^4
7	180 cm	0.0105	2.05×10^4
8	240 cm	0.0071	1.40×10^4

Hasil yang diperoleh pada titik isocenter pada penelitian ini juga sudah sesuai dengan hasil penelitian orang lain, seperti Hashemi dkk (18 MV linac, 3,7 mSv/Gy) dan Szdlowski, dkk (15 MV linac, $1,2 \times 10^6 n/cm^2.Gy$). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi energi foton maka akan semakin banyak neutron yang dihasilkan karena proses fotodisintegrasi akan semakin banyak terjadi. Untuk energi foton 10 MV pada penelitian ini, proses fotodisintegrasi hanya terjadi pada inti atom target tungsten dan kolimator timah. Sedangkan untuk energi foton di atas 15 MV, sudah melebihi semua batas ambang energi untuk proses fotodisintegrasi inti atom komponen-komponen dalam kepala linac sehingga neutron yang dihasilkan lebih banyak.

Berdasarkan data spesifikasi alat dari Linac Varian Trilogy, kebocoran neutronnya (*neutron leakage*) tidak melebihi 0,2% dinyatakan dalam dosis ekuivalen (Sv/Gy) pada titik isocenter. Sedangkan dari hasil penelitian ini diperoleh dosis ekuivalen pada titik isocenter hanya sebesar 0,04% Sv/Gy. Hal ini menunjukkan

kondisi linac yang masih bagus karena tidak melebihi batas yang ditentukan. Namun demikian, kontribusi neutron ini tetap harus diperhitungkan. Misalkan pada sekali terapi pasien disinari dengan dosis 2 – 4 Gy, maka pasien akan mendapat tambahan radiasi neutron sekitar 0,8 – 1,6 mSv. Meskipun nilainya kecil, neutron ini dapat menyebabkan kanker sekunder jika mengenai jaringan sehat karena neutron termasuk radiasi pengion dan neutron cepat yang dihasilkan dari linac memiliki faktor bobot radiasi 20 sehingga lebih menyebabkan kerusakan dibanding foton hamburan. Apalagi dalam prakteknya, pada saat terapi seringkali menggunakan *wedge* karena bentuk tumor yang tidak rata. Dari penelitian Hashemi, dkk (2013), penambahan *wedge* dapat meningkatkan produksi neutron menjadi 3,3 kalinya.

Memang dalam suatu radioterapi tidak diterapkan batas dosis bagi pasien. Dosis yang diberikan pada pasien dapat seratus kali lebih besar dibandingkan dengan batas dosis untuk para pekerja radiasi. Hal ini didasarkan pada prinsip justifikasi, yaitu manfaat yang diperoleh dari pengobatan ini akan lebih besar daripada bahaya yang diakibatkan oleh dosis yang diberikan walaupun dosisnya tinggi. Tanpa radioterapi dan tanpa menerima dosis radiasi, pengaruh tumor dan kanker tetap berakibat fatal (Walhstrom, 1996). Namun untuk menghindari timbulnya kanker sekunder akibat adanya tambahan radiasi neutron, maka untuk upaya proteksi radiasinya, kontribusi neutron ini hendaknya dimasukkan juga ke dalam *treatment planning system* (TPS).

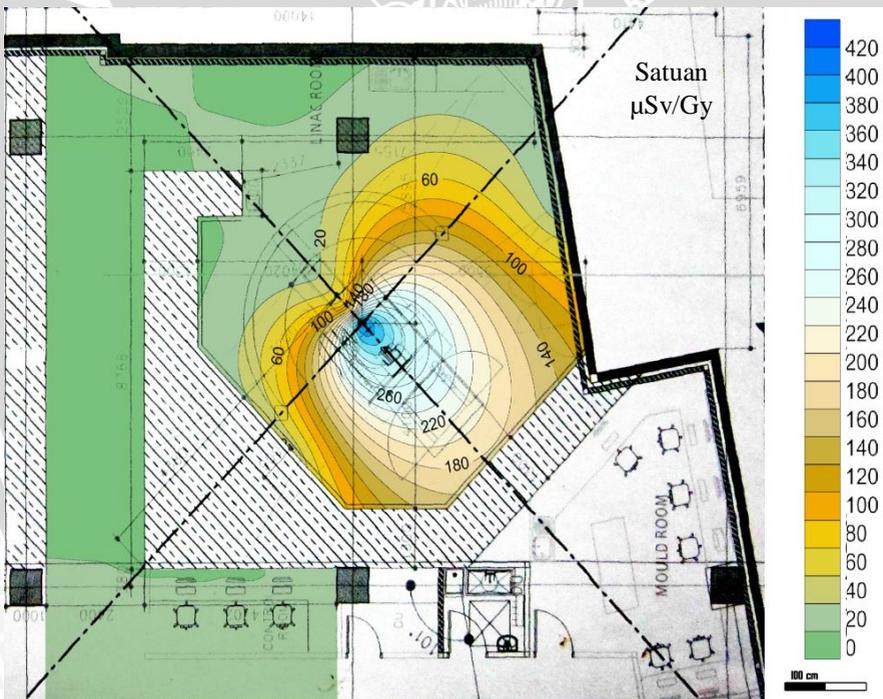
4.3.2 Dosis dan fluks neutron di dinding ruangan

Untuk dosis dan fluks neutron di beberapa titik di dalam ruangan linac ditunjukkan pada Tabel 4.5, sedangkan gambaran distribusi dosis neutron di seluruh ruangan linac ditunjukkan pada Gambar 4.6. Nilai dosis dan fluks neutron pada tabel tersebut sangat kecil bila dibandingkan dengan dosis dan fluks neutron pada meja pasien dan akan semakin kecil untuk posisi yang lebih jauh lagi dari titik isocenter. Pada posisi maze misalnya (17, 18, 19), dosisnya sudah sangat menurun apabila dibandingkan dengan dosis pada posisi 9 – 16. Hal ini selain karena jaraknya yang lebih jauh dari isocenter, juga karena terdapat tembok penghalang (*wall shielding*). Pada pintu masuk dan ruang kontrol (*control room*) dosisnya juga menjadi lebih kecil lagi karena adanya tembok penghalang yang

lebih tebal. Dosis terkecil sebesar $0,8 \mu\text{Sv/Gy}$ yaitu pada ruang kontrol. Dosis ini akan setara dengan $34,32 \text{ mSv/tahun}$ dengan mengangap linac akan memancarkan sebanyak 42900 Gy/tahun .

Tabel 4.5 Hasil pengukuran dosis dan fluks neutron di ruang linac

No	mSv/Gy	n/cm ² .Gy	No	mSv/Gy	n/cm ² .Gy
9	0.0071	1.40×10^4	18	0.0014	2.76×10^3
10	0.0096	1.87×10^4	19	0.0010	1.90×10^3
11	0.0107	2.09×10^4	20	0.0014	2.76×10^3
12	0.0041	7.93×10^3	21	0.0012	2.35×10^3
13	0.0034	6.66×10^3	22	0.0019	3.62×10^3
14	0.0043	8.38×10^3	23	0.0008	1.48×10^3
15	0.0041	7.93×10^3	24	0.0010	1.90×10^3
16	0.0087	1.70×10^4	25	0.0012	2.35×10^3
17	0.0008	1.48×10^3	-	-	-



Gambar 4.6 Distribusi dosis neutron di ruang 10 MV linac

Nilai dosis yang diterima pekerja di ruang kontrol tersebut masih di bawah batas dosis tahunan sebesar 50 mSv/tahun tetapi lebih besar dari batas dosis rata-rata selama 5 tahun sebesar 20 mSv/tahun. Maka dari itu, bagi para pekerja radiasi sebaiknya juga diperhatikan upaya proteksi radiasinya karena memang selain berada di ruang kontrol, pekerja radiasi ini juga dituntut untuk keluar masuk ruangan untuk mengkondisikan pasien yang akan diterapi. Upaya proteksinya dapat menggunakan prinsip “PeJaBat” (Pelindung, Jarak, dan Batasan waktu). Namun untuk prinsip Jarak tidak bisa dilakukan karena pekerja radiasi tidak boleh berada jauh dari ruang linac untuk memperhatikan kondisi pasien (minimal berada di ruang kontrol) sehingga selanjutnya para pekerja di ruang linac diharapkan dapat melakukan prinsip Pelindung dan Batasan waktu. Pekerja harus dapat bekerja dengan cepat dan seminimal mungkin berada di dalam ruangan. Kalaupun memang harus lebih lama lagi berada di dalam ruangan, sebaiknya menggunakan pelindung radiasi. Hal ini untuk menghindari paparan radiasi neutron yang tidak diinginkan, yang dapat meningkatkan dosis yang diterima pekerja radiasi.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran neutron cepat di ruang linac medis menggunakan detektor jejak nuklir CR-39. Hasil tanggapan yang optimal, ditandai dengan jejak yang banyak, jelas, dan mudah diamati pada detektor, diperoleh pada susunan detektor CR-39 yang dilapisi dengan radiator polietilen dan filter Cu, serta parameter etsa optimal pada konsentrasi larutan NaOH 6,25 N, suhu etsa 70°C, dan waktu etsa 7 jam.

Kurva kalibrasi hubungan antara dosis dan fluks neutron dengan jumlah jejak dari detektor CR-39 diperoleh berupa garis lurus linear dengan persamaan $y = 201,4x$ dan $y = (1,03 \cdot 10^{-4})x$, dimana y adalah jumlah jejak dan x masing-masing adalah dosis dan fluks neutron.

Sedangkan distribusi dosis dan fluks neutron di ruang linac medis 10 MV diperoleh nilainya bervariasi mulai dari yang tertinggi sebesar 0,4 mSv/Gy atau $8,32 \times 10^5$ n/cm².Gy di titik isocenter dan yang terendah 0,8 µSv/Gy atau $2,35 \times 10^3$ n/cm².Gy di ruang kontrol. Nilai dosis maksimum di titik isocenter ini masih berada di bawah batas yang telah ditentukan, namun tetap harus diperhatikan mengenai upaya proteksi radiasi dari neutron tersebut.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya diharapkan detektor CR-39 dapat dikalibrasi langsung di bawah linac agar benar-benar diperoleh tanggapan detektor yang optimal terhadap neutron cepat yang dihasilkan dari linac.

Upaya proteksi radiasi neutron juga diharapkan dapat lebih ditekankan lagi, terutama mengenai bagaimana metode yang tepat untuk memasukkan kontribusi dosis neutron ke dalam TPS, dan mengenai manajemen waktu, serta pelindung radiasi yang tepat bagi pekerja di ruang linac.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghamdi, H., Fazal-ur-Rehman, M.I. Al-Jarallah dan N. Maalej. 2008. Photoneutron intensity variation with field size around radiotherapy linear accelerator 18-MeV X-ray beam. *Radiation Measurements*. 43: S495-S499.
- Al-Othmany, D.S., S. Abdul-Majid dan M.W. Kadi. 2010. Fast neutron dose mapping in a linac radiotherapy facility. *Tenth Radiation Physics & Protection Conference, Cairo 27-30 November 2010*. 123-128.
- Anies. 2009. Cepat Tua Akibat Radiasi? – Pengaruh Radiasi Elektromagnetik Ponsel dan Berbagai Peralatan Elektronik. PT Elex Media Komputindo. Jakarta.
- Asamoah, M., B.J.B. Nyarko, J.J. Fletcher, R.B.M. Sogbadji, S. Yamoah, S.E. Agbemava dan E. Mensimah. 2011. Neutron flux distribution in the irradiation channels of Am-Be neutron source irradiation facility. *Annals of Nuclear Energy*. 38(6): 1219-1224.
- BAPETEN, Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2003. Sistem pelayanan pemantauan dosis eksterna perorangan. KK BAPETEN No. 02-P/Ka-BAPETEN/I-03.
- Barquero, R., R. Mendez, H.R. Vega-Carillo, M.P. Iniguez, dan T.M. Edwards. 2005. Neutron spectra and dosimetric features around an 18 MV linac accelerators. *Health Phys*. 88: 38-58.
- Beiser, A. 2003. Concepts of Modern Physics. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York.
- Benton, E. 2012. Space radiation passive dosimetry. Artikel, Oklahoma State University.
- Boel, T. 2009. Dental Radiologi – Prinsip dan Teknik. USU Press. Medan.
- Boschung, M., A. Fiechtner, S. Mayer dan C. Wernli. 2008. Field calibration and comparison of personal neutron dosimeter designs based on CR-39 for the use around high-energy accelerators. *Radiation Measurements*. 43: 1081-1084.
- Castillo, F., G. Espinosa, J.I. Golzarri, D. Osorio, J. Rangel, P.G. Reyes dan J.J.E. Herrera. 2013. Fast neutron dosimetry using CR-39 track detectors with polyethylene as radiator. *Radiation Measurements*. 50: 71-73.

- Cember, H. 1983. Pengantar Fisika Kesehatan. IKIP Semarang. Semarang.
- Dhairyan, M.P., P.K. Marathe dan O.P. Massand. 2003. Use of CR-39 solid state nuclear track detector in neutron personnel monitoring. *Radiation Measurements*. 36: 435-438.
- Garcia, M.J., K. Amgarou, C. Domingo dan F. Fernandez. 2005. Neutron response study of two CR-39 personal dosimeters with air and Nylon converters. *Radiation Measurements*. 40: 607-611.
- Gautreau, R. dan W. Savin. 1999. Theory and Problems of Modern Physics. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York.
- Halliday, D. 1962. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Hashemi, S.M., B. Hashemi-Malayeri, G. Raisali, P. Shokrani, A.A. Sharafi dan F. Torkzadeh. 2008. Measurement of photoneutron dose produced by wedge filters of a high energy linac using polycarbonate films. *J. Radiat. Res.* 49(3): 279-283.
- Hashemi-Nezhad, S.R., M. Dolleiser, R. Brandt, W. Westmeier, R. Odoj, M.I. Krivopustov, B.A. Kulakov dan A.N. Sosnin. 2002. Determination of energetic neutron spatial distribution using neutron induced nuclear recoil events. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 493: 121-130.
- Herwiningsih, S. 2011. Radiation equipments. Presentasi, Universitas Brawijaya Malang.
- Hill, T.M. 2005. Neutron fluence measurements of the Siemens Oncor linear accelerator utilizing gold foil activation. Tesis, Medical University of Ohio.
- Hsu, F., Y. Chang, M. Liu, S. Huang dan C. Yu. 2010. Dose estimation of the neutrons induced by the high energy medical linear accelerator using dual-TLD chips. *Radiation Measurements*. 45: 739-741.
- <http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/07springsummer/images/radiation.gif>. Diakses tanggal 30 November 2013.
- <http://images.tutorvista.com/cms/images/95/nuclear-fission-chain-reaction.png>. Diakses tanggal 30 November 2013.

- http://ojs.ujf.cas.cz/~mitja/presentations/AV04/slike/posp_glava.png.
Diakses tanggal 30 November 2013.
- http://ojs.ujf.cas.cz/~mitja/presentations/AV04/slike/posp_linac.png.
Diakses tanggal 30 November 2013.
- <http://www.bo.infn.it/slim/images/formCR39.GIF>. Diakses tanggal
30 November 2013.
- https://halldweb1.jlab.org/wiki/images/9/96/Ambe_spectrum.png.
Diakses tanggal 30 November 2013.
- Indriyani, V.D. 2011. Analisis pengaruh jumlah rokok yang dikonsumsi terhadap aktivitas Po-210 pada gigi perokok menggunakan detektor jejak nuklir CR-39. Skripsi, Universitas Brawijaya Malang
- Ipe, N.E., J.C. Liu, B.R. Buddemeier, C.J. Miles dan R.C. Yoderd. 1992. A comparison of the neutron response of CR-39 made by different manufacturers. *Proceedings of the 7th Symposium on Neutron Dosimetry, Berlin 13-18 Oktober 1991*. Diakses tanggal 19 Oktober 2013 dari <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub5655.pdf>
- ISO, the International Organization for Standardization. 2000. Reference Neutron Radiations – Part 1: Characteristics and methods of production. International Standard ISO 8529.
- Manzoor, S. 2007. Improvements and calibrations of nuclear track detectors for rare particle searches and fragmentation studies. Tesis, University of Bologna Italy. Diakses tanggal 22 Oktober 2013 dari <http://www.bo.infn.it/slim/thesis/SManzoorPhDThesis.pdf>
- Martinez-Ovalle, S.A. 2013. Neutron dose equivalent in tissue due to linacs of clinical use. *InTech*.
- Mendez-Villafane, R., J.M.L.A. Merino, E.G. Diaz dan A.L. Fillol. 2010. Determination of the emission rate of an Am-Be neutron sources with a Bonner sphere spectrometer. *Radiation Measurements*. 45: 1271-1275.
- Nikezic, D. dan K.N. Yu. 2009. Optical characteristics of tracks in solid state nuclear track detectors studied with ray tracing method. In: *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications*. ISBN: 978-1-60876-826-4. Diakses tanggal 28 Oktober 2013 dari <http://www.cityu.edu.hk/ap/nru/BookNTDChapter5.pdf>

- Parkhurst, M.A., D.E. Hadlock dan L.G. Faust. 1986. Semi-empirical model of neutron and charge particle interaction with CR-39. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum.* 12: 593-596.
- Purba, V. 1992. Pengukuran konsentrasi radon-222 menggunakan detektor jejak nuklir CR-39. Skripsi, Universitas Sumatera Utara Medan.
- Ramain, A., Bunawas dan M.T. Thamrin. 1991. Tanggapan detektor CR-39 dengan radiator litium borat terhadap neutron termik. *Prosiding Seminar Reaktor Nuklir dalam Penelitian Sains dan Teknologi Menuju Era Tinggal Landas, Bandung 8-10 Oktober 1991.* 421-424. Diakses tanggal 12 November 2013 dari [http://digilib.batan.go.id/e-prosiding/File%20Prosiding/Energi/PPTN 91/Reak Nuk PPTN 91/Abubakar 421.pdf](http://digilib.batan.go.id/e-prosiding/File%20Prosiding/Energi/PPTN%2091/Reak%20Nuk%20PPTN%2091/Abubakar%20421.pdf)
- Ramain, A., N. Rohmah dan Bunawas. 1992. Tanggapan detektor CR-39 terhadap neutron cepat dengan radiator polietilen. *Simposium Fisika Jakarta '92, Jakarta 2 September 1992.* 62-69.
- Rashed, A.N. 2010. Fast neutron dose distribution measurements inside water phantom using LR-115 track detectors. *JKAU: Sci.* 22(2): 25-34.
- Sofyan, H. 1996. Tanggapan detektor CR-39 terhadap neutron cepat menggunakan radiator D-polietilen dan H-polietilen. *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiai dan Lingkungan, 20-21 Agustus 1996.* 165-170.
- Stabin, M.G. 2008. Radiation Protection and Dosimetry – An Introduction to Health Physics. Springer Science+Business Media, Inc. New York.
- Szydlowski, A., M. Jaskola, A. Malinowska, S. Pszona, A. Wysocka-Rabin, A. Korman, K. Pytel, R. Prokopowicz, J. Rostkowska, W. Bulski dan M. Kuk. 2013. Application of nuclear track detectors as sensors for photoneutrons generated by medical accelerators. *Radiation Measurements.* 50: 74-77.
- Tommasino, L., G. Zapparoli, P. Spiezia, R.V. Griffith dan G. Espinosa. 1984. Different etching processes of damage track detectors for personnel neutron dosimetry. *Nuclear Track and Radiation Measurements.* 8: 335-339.

- Vega-Carrillo, H.R., M.R. Martinez-Blanco, V.M. Hernandez-Davila dan J.M. Ortiz-Rodriguez. 2009. Spectra and dose with ANN of ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$, and $^{239}\text{Pu-Be}$. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 281: 615-618.
- Vega-Carrillo, H.R., S.A. Martinez-Ovalle, A.M. Lallena, G.A. Mercado, dan J.L. Benitez-Rengifo. 2012. Neutron and photon spectra in linacs. *Applied Radiation and Isotopes*.
- Vukovic, B., D. Faj, M. Poje, M. Varga, V. Radolic, I. Miklavcic, A. Ivkovic dan J. Planinic. 2010. A neutron track etch detector for electron linear accelerators in radiotherapy. *Radiol. Oncol.* 44(1): 62-66.
- Wahlstrom, B. 1996. Radiasi dalam bahasa sehari-hari. BATAN. Jakarta
- Wang, Y. 2003. Linear accelerator neutron contamination. Presentasi, McGill University. Diakses tanggal 19 September 2013 dari <http://www.medphys.mcgill.ca/presentations/yizhen2003.pdf>.
- Widayati, S. 1991. Adaptasi pengukuran dosis neutron dengan CR-39. *Prosiding Seminar Reaktor Nuklir dalam Penelitian Sains dan Teknologi Menuju Era Tinggal Landas, Bandung 8-10 Oktober 1991*. 425-429. Diakses tanggal 12 November 2013 dari http://digilib.batan.go.id/e-prosiding/File%20Prosiding/Energi/PPTN_91/Reak_Nuk_PPTN_91/Sri_Widayati_425.pdf
- Wiryosimin, S. 1995. Mengenal Asas Proteksi Radiasi. ITB. Bandung.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Laju Dosis Sumber Neutron Standar ²⁴¹Am-Be

Sumber neutron : ²⁴¹Am-Be 3 Ci
 Alat standar : Neutron Monitor MK7NRM/218
 Faktor kalibrasi : 1,30 ± 10%
 Data per 1 Agustus 2013:

Tabel L.1 Laju dosis sumber neutron standar ²⁴¹Am-Be 3 Ci

SDD (cm)	Laju Dosis Equivalent Ambient, Hp*(10)	
	mRem/jam	µSv/jam
40	49,3	493
50	31,1	311
60	24,6	246
70	18,2	182
80	14,3	143
90	12,2	122
100	10,4	104
110	7,8	78
120	7,3	73
130	6,5	65
140	6,0	60
150	5,2	52
160	4,7	47
170	4,1	41
180	3,6	36

(Sumber: Data kalibrasi PTKMR BATAN, 2013)

Ket: Data acuan ini didapatkan dari peluruhan data pengukuran laju dosis equivalent ambient Hp*(10) neutron sumber ²⁴¹Am-Be 3 Ci tanggal 5 Januari 2012 dengan menggunakan AUR standar Neutron Monitor MK7NRM/218.

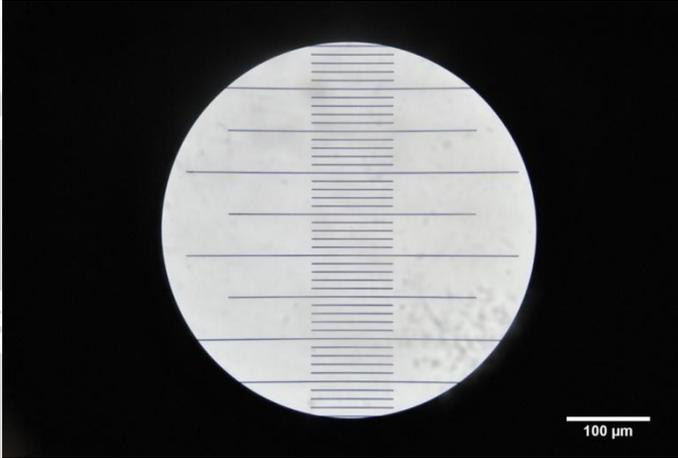
Rumus peluruhan:

$$Hp^*(10) = Hp^*(10) \exp\left(-\frac{0,693t}{T_{1/2}}\right) \quad (3.10)$$

dengan t = 573 hari dan T_{1/2} = 157788 hari

Lampiran 2 Penentuan Luasan Field Pada Mikroskop

- Luasan field pada mikroskop dapat ditentukan dengan menggunakan mikrometer objektif, seperti pada gambar L5.1 berikut.



Gambar L.1 Pengukuran diameter field pada mikroskop

- Gambar tersebut diambil pada perbesaran 400 kali dan dapat dilihat bahwa diameter field (lingkaran) pada gambar tersebut yaitu sekitar 45 skala mikrometer objektif, di mana 1 skala = 10 μm . Luasnya kemudian dapat dihitung secara manual dan diperoleh sebesar 158962,5 μm^2 (untuk mempermudah dibulatkan menjadi 160000 μm^2). Sedangkan jika dihitung dengan menggunakan software, hasilnya juga tidak jauh berbeda.
- Dari hasil tersebut kemudian dapat dihitung banyaknya field dalam luasan cm^2 ($10^8 \mu\text{m}^2$) dengan menggunakan rumus perbandingan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} 160000 \mu\text{m}^2 &\rightarrow 1 \text{ field} \\ 10^8 \mu\text{m}^2 &\rightarrow x \text{ field} \\ \Rightarrow x &= \frac{10^8 \mu\text{m}^2 \times 1 \text{ field}}{160000 \mu\text{m}^2} = 625 \text{ field} \end{aligned}$$

- Jadi pada luasan satu cm^2 terdapat 625 field

Lampiran 3 Perhitungan Penentuan Waktu Pra Penyinaran

- Berdasarkan Szydowski, dkk. (2013), detektor yang disinari sumber neutron ^{252}Cf dengan kuat sumber $4,41 \times 10^7$ n/s selama 64 jam pada jarak 25 cm, dapat menghasilkan jejak sekitar 120000 jejak/cm².
- Dari lampiran 2 diketahui terdapat 625 field pada luasan 1 cm², maka untuk mengetahui jejak yang dihasilkan setiap fieldnya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} 625 \text{ field} &\rightarrow 120000 \text{ jejak} \\ 1 \text{ field} &\rightarrow x \text{ jejak} \\ 120000 \text{ jejak} \times 1 \text{ field} \\ \Rightarrow x &= \frac{120000 \text{ jejak} \times 1 \text{ field}}{625 \text{ field}} = 192 \text{ jejak} \end{aligned}$$

- Hasil 192 jejak/field tersebut terlalu banyak, jadi ditentukan cukup 5 jejak/field saja untuk memudahkan pengamatan. Waktu yang diperlukan untuk memperoleh 5 jejak/field adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} 192 \text{ jejak/field} &\rightarrow 64 \text{ jam} \\ 5 \text{ jejak/field} &\rightarrow t \text{ jam} \\ 64 \text{ jam} \times 5 \text{ jejak/field} \\ \Rightarrow t &= \frac{64 \text{ jam} \times 5 \text{ jejak/field}}{192 \text{ jejak/field}} = 1,67 \text{ jam} \end{aligned}$$

- Jadi untuk memperoleh 5 jejak/field detektor disinari selama 1,67 jam dengan sumber ^{252}Cf . Sedangkan sumber neutron standar yang digunakan adalah $^{241}\text{Am-Be}$ 3 Ci dengan kuat sumber $(5,48 \pm 0,18) \times 10^6$ n/s (Mendez-Villafane, 2010). Sehingga waktu penyinarannya:

$$\begin{aligned} 4,41 \times 10^7 \text{ n/s} &\rightarrow 1,67 \text{ jam} \\ 5,48 \times 10^6 \text{ n/s} &\rightarrow t \text{ jam} \\ 4,41 \times 10^7 \text{ n/s} \times 1,67 \text{ jam} \\ \Rightarrow t &= \frac{4,41 \times 10^7 \text{ n/s} \times 1,67 \text{ jam}}{5,48 \times 10^6 \text{ n/s}} = 13,44 \text{ jam} \end{aligned}$$

- Jadi untuk memperoleh 5 jejak/field dengan sumber $^{241}\text{Am-Be}$ 3 Ci, detektor harus disinari selama 13,44 jam pada jarak 25 cm. Tetapi karena situasi yang tidak memungkinkan, maka detektor akhirnya disinari selama 66,5 jam pada jarak 60 cm atau setara dengan dosis kurang lebih 16 mSv. Jika dilakukan perhitungan seperti di atas, maka dengan dosis tersebut secara teori akan diperoleh 4,3 jejak/field pada detektor.

Lampiran 4 Perhitungan Penentuan Waktu Penyinaran untuk Kalibrasi Detektor CR-39

- Dari lampiran 1 diketahui laju dosis pada jarak penyinaran 40 cm dari sumber adalah 493 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ atau 0,493 mSv/jam, artinya dosis yang diterima sebanyak 0,493 mSv selama satu jam.
- Dengan mengetahui laju dosis tersebut maka dapat ditentukan waktu penyinaran untuk dosis tertentu menggunakan rumusan perbandingan biasa sebagai berikut.

1. Untuk dosis 1 mSv

$$0,493 \text{ mSv} \rightarrow 1 \text{ jam}$$

$$1 \text{ mSv} \rightarrow t \text{ jam}$$

$$\Rightarrow t = \frac{1 \text{ mSv} \times 1 \text{ jam}}{0,493 \text{ mSv}} \cong 2 \text{ jam}$$

2. Untuk dosis 3,6 mSv

$$\Rightarrow t = \frac{3,6 \times 1}{0,493} = 7,3 \text{ jam}$$

3. Untuk dosis 10 mSv

$$\Rightarrow t = \frac{10 \times 1}{0,493} = 20,3 \cong 20 \text{ jam}$$

4. Untuk dosis 12 mSv

$$\Rightarrow t = \frac{12 \times 1}{0,493} = 24,3 \cong 24 \text{ jam}$$

5. Untuk dosis 20 mSv

$$\Rightarrow t = \frac{20 \times 1}{0,493} = 40,5 \cong 40 \text{ jam}$$

Lampiran 5 Pembuatan Larutan Etsa NaOH 6,25 N

- Untuk membuat suatu larutan etsa, jumlah bahan yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$m = \frac{N \times Mr \times V}{\text{Valensi}} \quad (\text{L.2})$$

Dengan N adalah normalitas, Mr adalah massa molekul relatif, dan V adalah volume

- Pada penelitian ini larutan etsa yang digunakan adalah larutan etsa NaOH ($Mr = 40$) dengan normalitas 6,25 N sebanyak satu liter. Valensi untuk NaOH adalah 1 karena NaOH terurai sempurna ($1 \text{ NaOH} \rightarrow 1 \text{ Na}^+ + 1 \text{ OH}^-$). Jadi jumlah NaOH yang dibutuhkan adalah:

$$m = \frac{6,25 \times 40 \times 1}{1} = 250 \text{ gram}$$

- Jadi alat dan bahan yang diperlukan untuk membuat larutan etsa antara lain neraca analitik, NaOH padat 250 gram, beaker glass 500 ml dan 2000 ml, labu erlemeyer 1000 ml, botol plastik 1000 ml, dan akuades.
- Sebanyak 250 gram NaOH padat kemudian dilarutkan dengan akuades sedikit demi sedikit di dalam beaker glass. Jika semua NaOH sudah cukup melarut, selanjutnya dipindahkan ke dalam labu erlemeyer dan ditambah akuades sampai volumenya satu liter (volume yang diinginkan). Larutan NaOH 6,25 N yang sudah jadi kemudian disimpan dalam botol plastik 1000 ml.
- Saat melarutkan NaOH padat, sebaiknya menggunakan sarung tangan dan masker untuk menghindari panas dan bau yang menyengat.

Lampiran 6 Gambar Alat dan Bahan Penelitian



Gambar L.2 Detektor CR-39



Gambar L.3 Polietilen



Gambar L.4 Tembaga (Cu)



Gambar L.5 Fantom



Gambar L.6 Sumber neutron
 $^{241}\text{Am-Be}$



Gambar L.7 AUR neutron
standar



Gambar L.8 Meja fantom dan sumber neutron



Gambar L.9 NaOH padat



Gambar L.10 Neraca analitik



Gambar L.11 Beaker glass 500 ml, 2000 ml, dan labu erlemeyer 1000 ml



Gambar L.12 Botol plastik 1000 ml, akuades, sarung tangan, dan masker



Gambar L.13 Gelas etsa



Gambar L.14 Penjepit



Gambar L.15 Ultrasonic cleaner



Gambar L.16 Oven



Gambar L.17 Desikator



Gambar L.18 Mikroskop dan counter



Lampiran 7 Data Hasil Pembacaan Jejak

➤ Optimalisasi waktu etsa

Waktu etsa (jam)	Jumlah jejak (jejak/cm ²)	Jumlah jejak (jejak/cm ²)	Jumlah jejak net (jejak/cm ²)
5	1100	1506 ± 219	1498 ± 219
	1575		
	1850		
6	2500	2483 ± 231	2478 ± 231
	2875		
	2075		
7	3000	3192 ± 297	3182 ± 297
	3775		
	2800		
8	3550	3300 ± 126	3292 ± 126
	3200		
	3150		

Background (jejak/cm ²)	8	5	10	8
Rata-rata	8 ± 1			

$$\bullet \sigma_{bg} = \sqrt{\frac{(8-8)^2 + (5-8)^2 + (10-8)^2 + (8-8)^2}{4 \times 3}} \cong 1 \text{ jejak/cm}^2$$

Misal untuk waktu etsa 5 jam:

$$\bullet \text{Rata - rata} = \frac{1100 + 1575 + 1850}{3} \cong 1506 \text{ jejak/cm}^2$$

$$\bullet \sigma = \sqrt{\frac{(1100-1506)^2 + (1575-1506)^2 + (1850-1506)^2}{3 \times 2}} \cong 219 \text{ jejak/cm}^2$$

$$\bullet \text{Jumlah jejak net} = 1506 - 8 = 1498 \text{ jejak/cm}^2$$

$$\bullet \sigma = \sqrt{219^2 + 1^2} \cong 219 \text{ jejak/cm}^2$$

Prosentase kenaikan jumlah jejak:

$$\bullet \text{5 ke 6 jam: } \% = \frac{2478 - 1498}{1498} \cong 65\%$$

- 6 ke 7 jam: $\% = \frac{3182 - 2478}{2478} \cong 28\%$
- 7 ke 8 jam: $\% = \frac{3292 - 3182}{3182} \cong 3\%$

➤ **Penyinaran kalibrasi (r = 40 cm)**

Dosis (mSv)	Waktu (jam)	Fluks ($\times 10^7$ n/cm ²)	Jumlah jejak (jejak/cm ²)	Rata-rata	Jumlah jejak net (jejak/cm ²)
1	2	0.20	1) 275	330 ± 27	310 ± 27
			2) 350		
			3) 425		
			4) 300		
			5) 300		
3.6	7.3	0.72	1) 925	940 ± 38	920 ± 38
			2) 1000		
			3) 1050		
			4) 875		
			5) 850		
10	20	1.96	1) 2150	2220 ± 62	2200 ± 62
			2) 2325		
			3) 2375		
			4) 2025		
			5) 2225		
12	24	2.36	1) 2450	2570 ± 80	2550 ± 80
			2) 2625		
			3) 2325		
			4) 2750		
			5) 2700		
20	40	3.93	1) 3675	3835 ± 93	3815 ± 93
			2) 4050		
			3) 3600		
			4) 3800		
			5) 4050		

Background (jejak/cm ²)	23	17	20
Rata-rata (jejak/cm ²)	20 ± 3		

- $\sigma_{bg} = \sqrt{\frac{(23-20)^2+(17-20)^2+(20-20)^2}{3 \times 2}} \cong 2 \text{ jejak/cm}^2$

Misal untuk dosis 1 mSv:

- Fluks neutron = $\frac{5,48 \times 10^6 \times 2 \times 3600}{4 \times 3,14 \times 40^2} = 0,2 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$

- Rata – rata = $\frac{275+350+425+300+300}{5} = 330 \text{ jejak/cm}^2$

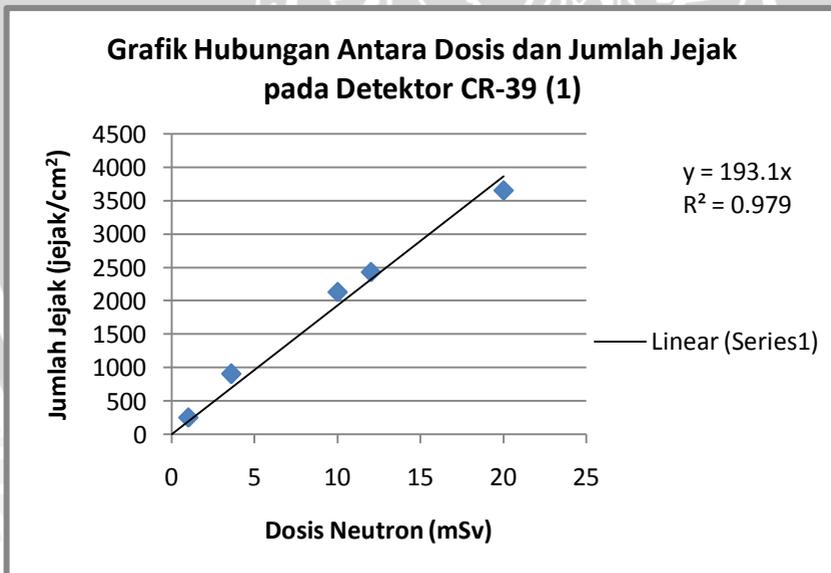
- $\sigma =$

- $\sqrt{\frac{(275-330)^2+(350-330)^2+(425-330)^2+(300-330)^2+(300-330)^2}{3 \times 2}}$
 $\cong 27 \text{ jejak/cm}^2$

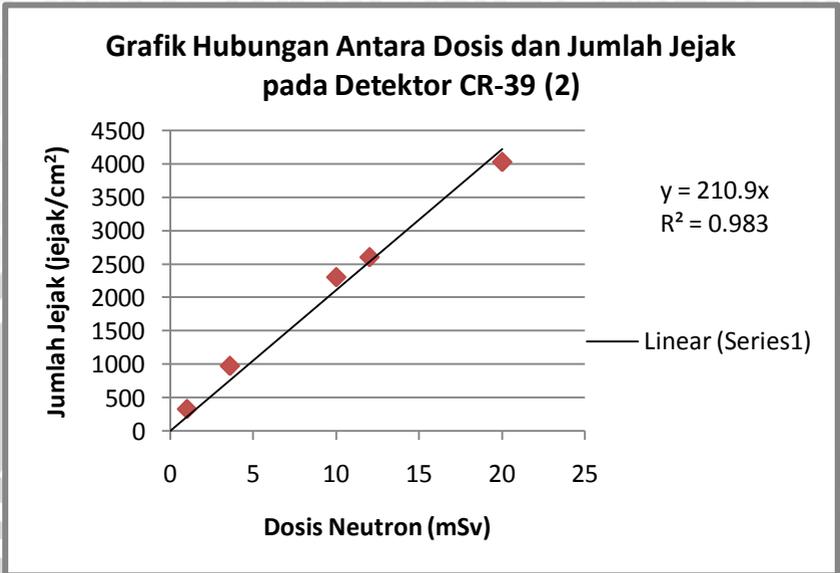
- Jumlah jejak net = $330 - 20 = 310 \text{ jejak/cm}^2$

- $\sigma = \sqrt{27^2 + 2^2} \cong 27 \text{ jejak/cm}^2$

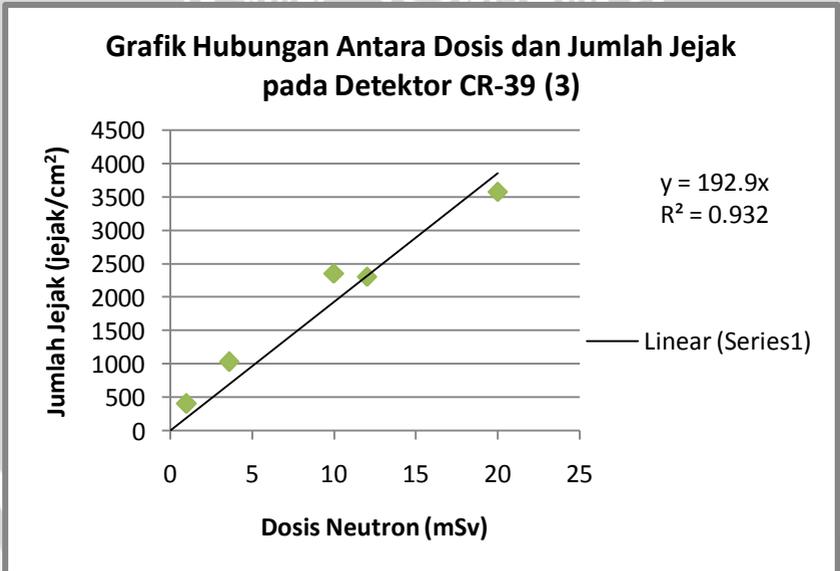
- BMD = $4,66 \times 2 + 3 \cong 12 \text{ jejak/cm}^2$



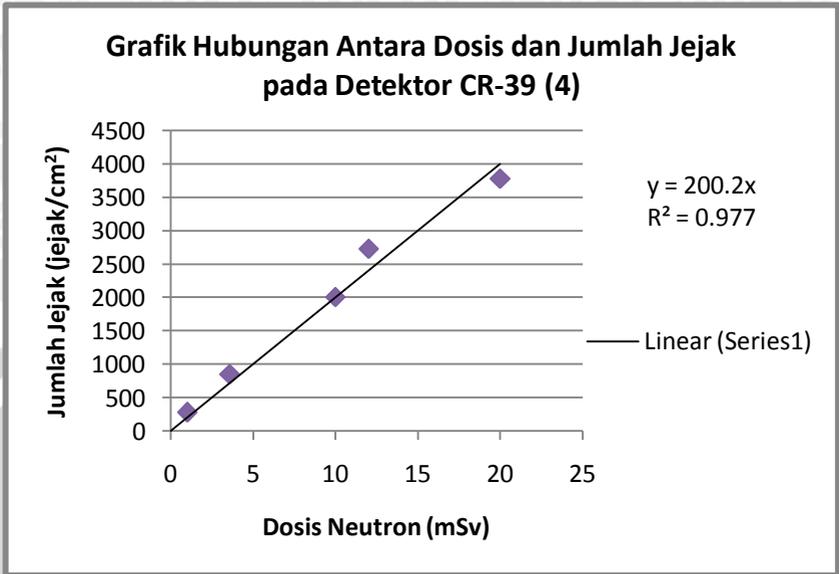
Gambar L.19 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (1)



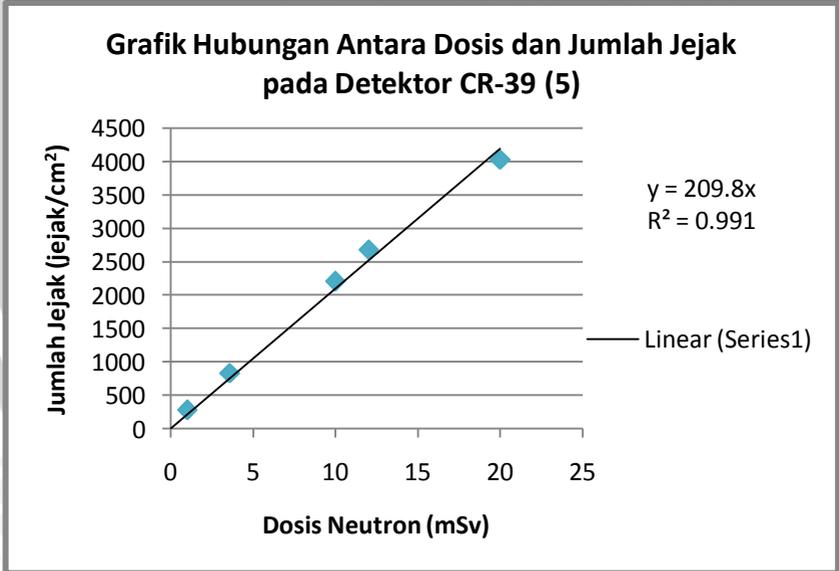
Gambar L.20 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (2)



Gambar L.21 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (3)

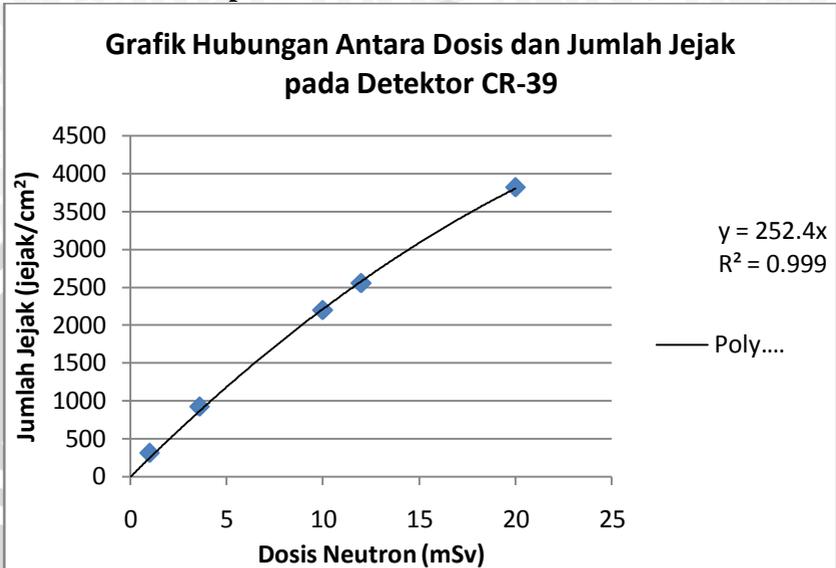


Gambar L.21 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (4)

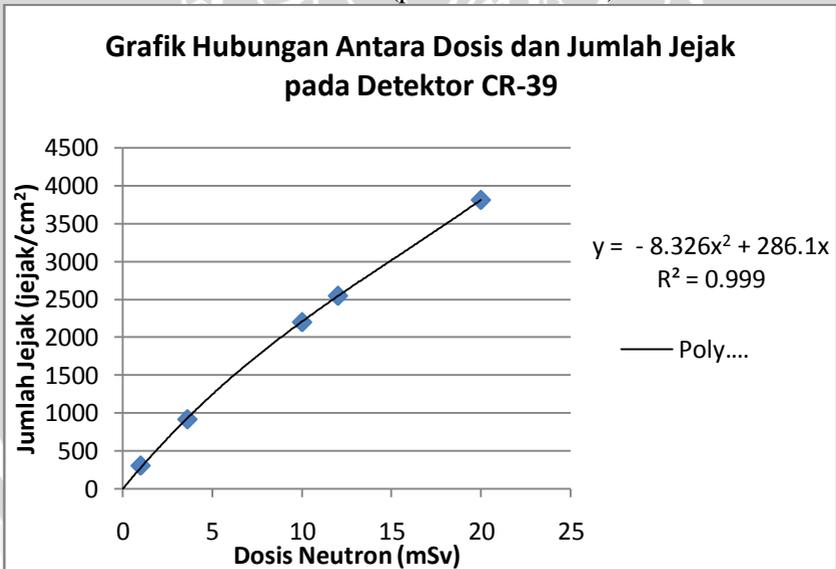


Gambar L.22 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (5)

❖ Hasil interpolasi lain



Gambar L.23 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (polinomial orde 2)



Gambar L.24 Grafik hubungan antara dosis dan jumlah jejak pada detektor CR-39 (polinomial orde 3)

➤ **Penyinaran di ruang linac**

No	Jejak/cm ²	mSv/Gy	n/cm ² .Gy
1	6855	0.4255	8.32 x 10 ⁵
2	3755	0.2331	4.56 x 10 ⁵
3	2055	0.1275	2.49 x 10 ⁵
5	580	0.0360	7.04 x 10 ⁴
4	2718	0.0479	9.38 x 10 ⁴
6	1230	0.0217	4.24 x 10 ⁴
7	593	0.0105	2.05 x 10 ⁴
8	405	0.0071	1.40 x 10 ⁴
9	405	0.0071	1.40 x 10 ⁴
10	543	0.0096	1.87 x 10 ⁴
11	605	0.0107	2.09 x 10 ⁴
12	230	0.0041	7.93 x 10 ³
13	193	0.0034	6.66 x 10 ³
14	243	0.0043	8.38 x 10 ³
15	230	0.0041	7.93 x 10 ³
16	493	0.0087	1.70 x 10 ⁴
17	43	0.0008	1.48 x 10 ³
18	80	0.0014	2.76 x 10 ³
19	55	0.0010	1.90 x 10 ³
20	80	0.0014	2.76 x 10 ³
21	68	0.0012	2.35 x 10 ³
22	105	0.0019	3.62 x 10 ³
23	43	0.0008	1.48 x 10 ³
24	55	0.0010	1.90 x 10 ³
25	68	0.0012	2.35 x 10 ³

Misal pada posisi 1:

- Dosis = $6855/201,4 = 34,0$ mSv
- Dosis ekuivalen = $34,0$ mSv/ 80 Gy = $0,4255$ mSv/Gy
- Fluks = $6855/1,03 \cdot 10^{-4} = 6,6 \times 10^7$ n/cm²
- Fluks ekuivalen = $6,6 \times 10^7$ n/cm²/80 Gy = $8,32 \times 10^5$ n/cm².Gy