

**KAJIAN TEKNIK PENGIMEJAN MENGGUNAKAN SUMBER NEUTRON
TERTERMA**

NOR ABIDIN BIN ASHARI

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2009

**KAJIAN TEKNIK PENGIMEJAN MENGGUNAKAN SUMBER NEUTRON
TERTERMA**

oleh

NOR ABIDIN BIN ASHARI

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

JANUARI 2009

PENGHARGAAN

Yang pertamanya ialah saya ingin memanjat kesyukuran yang tidak terhingga kepada Allah S.W.T kerana atas kurniaanNYA, saya telah berjaya menyiapkan tesis ini.

Saya juga ingin mengucapkan berbanyak-banyak terima kasih kepada Dr. Junita Mohamad Saleh selaku penyelia utama kajian ini yang telah sudi menyelia dan memberi panduan di dalam proses menyiapkan kajian saya ini. Tidak lupa kepada penyelia kedua dan penyelia lapangan yang masing-masing merangkap ketua projek bagi kajian ini iaitu Prof. Mohd. Zaid Abdullah dan Dr. Abdul Aziz Mohamed kerana memberikan saya dorongan dan bantuan di dalam proses menyiapkan kajian ini. Dengan panduan yang diberikan oleh mereka semua inilah yang membolehkan saya berjaya menamatkan kajian ini.

Di sini saya juga ingin berterima kasih kepada pihak-pihak lain yang turut sama terlibat di dalam merealisasikan kajian ini termasuklah staf-staf kumpulan teknologi bahan (MTEG), bengkel kejuruteraan dan bahagian reaktor di Nuklear Malaysia. Selain itu, saya amat berterima kasih kepada kawan-kawan seperjuangan yang turut sama memberi bantuan sama ada daripada segi idea mahupun tenaga bagi membolehkan kajian ini direalisasikan. Kajian ini ditanggung sepenuhnya oleh kerajaan Malaysia melalui projek IRPA di Nuklear Malaysia. Juga sekalung terima kasih kepada mereka yang menguruskan kajian ini terutamanya Dr. Abdul Aziz dan Faridah Mohd Idris melalui program *Reactor Interest Group* (RIG). Saya berharap agar kajian ini akan dapat menjadi titik tolak kepada perkembangan dalam bidang tomografi neutron yang lebih rancak di masa hadapan.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
SUSUNAN KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	viii
SENARAI RAJAH	ix
SENARAI SIMBOL	xiv
SENARAI ISTILAH	xvi
SENARAI SINGKATAN	xix
SENARAI LAMPIRAN	xxi
SENARAI PENERBITAN DAN SEMINAR	xxii
ABSTRAK	xxiii
ABSTRACT	xxiv
BAB 1 PENGENALAN	
1.0 Pengenalan	1
1.1 Tomografi Neutron	2
1.2 Pernyataan Masalah	3
1.3 Objektif Penyelidikan	5
1.4 Garis Panduan Tesis	6
BAB 2 TOMOGRAFI NEUTRON	
2.0 Pengenalan	7
2.1 Sifat-Sifat Am Alur Neutron	8
2.2 Reaktor Triga Mark II	12
2.3 Kemudahan Neutron Terserak Bersudut Kecil (SANS)	14
2.3.1 Kriostat	17
2.3.2 Monokromator	18
2.3.3 Lubang Pengkolimat	19
2.4 Nisbah Pengkolimatan (L/D)	20
2.5 Sumber Neutron Monokromat	22
2.6 Pengesan Neutron	23
2.6.1 Pengesan Sensitif Kedudukan (PSD)	23

2.6.1(a) Proses Pengesanan	26
2.6.1(b) Sistem Baca-Keluar Pengesan	28
2.6.2 Pengesan Peranti Cas Terganding (CCD)	32
2.6.2(a) Proses Pengesanan	33
2.7 Aplikasi Tomografi Neutron	36
2.8 Neutron Untuk Pengimejan Objek	40
2.9 Kualiti Imej	42
2.9.1 Resolusi Imej	42
2.9.1(a) Resolusi Kontras	43
2.9.1(b) Resolusi Ruang	43
2.9.2 Penentuan Kualiti Imej Bina Semula	43
2.9.2(a) Nisbah Isyarat-Hingar	44
2.9.2(b) Resolusi Ruang Imej	45
2.10 Hingar	47
2.11 Artifak	48
2.12 Status Tomografi Neutron	48
2.13 Ringkasan Bab	51

BAB 3 PEMBINAAN SEMULA IMEJ TOMOGRAFI

3.0 Pengenalan	53
3.1 Geometri Sinaran dan Generasi Tomografi	55
3.2 Perwakilan Matematik Untuk Data Pengecilan	57
3.3 Kaedah Unjuran Balik (BP)	60
3.4 Kaedah Analisis	63
3.4.1 Kaedah <i>Fourier Reconstruction</i> (FR)	65
3.4.2 Kaedah Unjuran Balik Bertapis	67
3.4.2(a) Kaedah <i>Filtered Back Projection</i> (FBP)	68
3.4.2(b) Fungsi Penapis Ruang Frekuensi	70
3.4.2(c) Kaedah <i>Convolutd Back Projection</i> (CBP)	73
3.4.2(d) Pelingkar Ram-Lak dan Shepp-Logan	74
3.5 Kaedah Lelaran	76
3.5.1 Jenis-Jenis Pembetulan	78
3.5.2 Jujukan Pembetulan	79
3.5.2(a) Pembetulan Serentak (ILST)	80
3.5.2(b) Pembetulan Titik ke Titik (SIRT)	80

3.5.2(c) Pembetulan Sinaran demi Sinaran (ART)	81
3.6 Jumlah Unjuran Minimum Yang Diperlukan	83
3.7 Perisian Pembinaan Semula Imej RECLBL™	84
3.8 Perisian Igor Pro™	85
3.9 Ringkasan Bab	86
BAB 4 KAEDAH KAJIAN DAN PERALATAN	
4.0 Pengenalan	87
4.1 Pengumpulan Data Pengimbasan	88
4.1.1 Persediaan Proses Pengumpulan Data	90
4.2 Penggunaan Kemudahan Neutron Terserak Bersudut Kecil (SANS)	92
4.2.1 Penggunaan Pengesan Sensitif Kedudukan (PSD)	93
4.2.1(a) Penentuan Set-an Pengesan	95
4.2.2 Penggunaan Pengesan Peranti Cas Terganding (CCD)	97
4.3 Motor Langkah	98
4.3.1 Pembangunan Sistem Kawalan Motor Langkah	99
4.4 Meja Pengimbasan	100
4.5 Penggunaan Perisai Tambahan	101
4.6 Pra pemprosesan	103
4.7 Pembinaan Semula Imej dan Paparan Imej	105
4.7.1 Penggunaan Perisian RECLBL™	106
4.7.2 Kaedah Pembinaan Semula Imej	109
4.7.3 Perlaksanaan Pembinaan Semula Imej	111
4.7.3(a) Penyediaan Data	111
4.7.3(b) Pemilihan Parameter	111
4.7.3(c) Pembinaan Sinogram	112
4.7.3(d) Proses Pembinaan Semula Imej	113
4.7.3(e) Paparan Imej	113
4.8 Eksperimen-Eksperimen	114
4.8.1 Penentuan Penapis Bersesuaian	115
4.8.2 Penentuan Masa Dedahan Yang Bersesuaian	115
4.8.3 Pemilihan Jumlah Unjuran Yang Bersesuaian	117
4.8.4 Kajian Ke Atas Penggunaan Sampel Ujian Yang Sama	117

4.8.5	Kajian Ke Atas Resolusi Minimum Yang Mampu Dikesan	118
4.8.6	Kajian Ke Atas Sel Bateri	120
4.9	Ringkasan Bab	122

BAB 5 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.0	Pengenalan	123
5.1	Ciri Profil Unjuran Yang Diperolehi	123
5.2	Tomografi Palam Pencucuh	124
5.3	Penggunaan Penapis Berlainan	127
5.4	Masa Dedahan Yang Berlainan	129
5.4.1	Kesan Suhu Ke Atas Eksperimen	134
5.5	Pembinaan Semula Imej Menggunakan Pelbagai Bilangan Sampel	139
5.6	Penggunaan Jumlah Unjuran Yang Berlainan	142
5.7	Penggunaan Sampel Ujian Yang Sama	146
5.8	Resolusi Terkecil Yang Dapat Dikesan	147
5.9	Pelbagai Kaedah Pembinaan Semula Imej	149
5.10	Eksperimen Melibatkan Sel Bateri	154
5.11	Ringkasan Bab	156

BAB 6 KESIMPULAN DAN CADANGAN

6.0	Kesimpulan Kajian	158
6.1	Cadangan-Cadangan Penambahbaikan Sistem Tomografi Neutron	160
6.1.1	Penggunaan Pengesan 2-Dimensi	160
6.1.2	Pembinaan Pengkolimat Tambahan	162
6.1.3	Penambahbaikan Perisian Pembinaan Semula Imej	163
6.1.4	Penambahbaikan Sistem Kriostat	164
6.1.5	Penambahbaikan Sistem Perisaian dan Motor Langkah	165
6.1.6	Pengautomasian Sistem	166

SENARAI RUJUKAN	164
------------------------	-----

LAMPIRAN A	175
-------------------	-----

LAMPIRAN B	184
-------------------	-----

SENARAI JADUAL

	Muka surat	
1.1	Resolusi imej yang dapat dicapai oleh kaedah-kaedah tomografi yang ada pada masa kini (Masschaele, 2002)	2
2.1	Sifat-sifat am alur neutron (Dierick, 2005)	9
2.2	Pengkelasan neutron berdasarkan tenaga dan panjang gelombang (Dierick, 2005)	10
2.3	Parameter-parameter untuk kemudahan SANS	16
2.4	Alatan-alatan yang digunakan di dalam kemudahan SANS	17
2.5	Keamatan fluks untuk kemudahan SANS (Ramli dan Fatah, 1994)	20
2.6	Ciri-ciri sintilator untuk neutron terma (Oed, 2004)	36
5.1	Nilai SNR bagi kaedah FBP dan CBP menggunakan penapis yang berbeza	128
5.2	Nilai-nilai SNR bagi imej yang diperolehi untuk eksperimen masa dedahan	132
5.3	Ketepatan imej bina semula bagi masa dedahan yang berlainan	134
5.4	Nilai SNR untuk bilangan sampel per unjuran, N_s yang berlainan	142
5.5	SNR bagi imej yang diperolehi daripada eksperimen jumlah unjuran berlainan	144
5.6	Ketepatan imej bina semula bagi unjuran berlainan	146
5.7	Perbandingan kualiti imej dan masa pemprosesan untuk kaedah yang berlainan	151
5.8	Ketepatan imej yang dibina semula bagi kaedah-kaedah pembinaan semula yang digunakan	154

SENARAI RAJAH

	Muka surat
2.1 Perbandingan berkaitan interaksi untuk bahan-bahan tertentu antara neutron dan sinar-x. Bulatan yang lebih besar bermaksud interaksi yang lebih besar berlaku (www.neutra.web.psi.ch)	12
2.2 Pandangan atas dewan Reaktor Triga Mark II di Agensi Nuklear Malaysia	13
2.3 Keratan rentas Reaktor Triga Mark II di Nuklear Malaysia	14
2.4 Susun atur sistem pengkolimat kemudahan SANS	15
2.5 Kriostat dan penapis berilium	18
2.6 Monokromator yang digunakan pada kemudahan SANS	19
2.7 Susunan skema bagi fasiliti pengimejan neutron	21
2.8 Ketidaktajaman alur	21
2.9 Gambaran am bagi pengesan PSD yang digunakan	24
2.10 Kesan perbezaan tekanan ke atas kecekapan pengesan (Smith, 2001)	25
2.11 Tindakbalas nuklear yang berlaku apabila gas Helium bertindakbalas dengan atom neutron. Titik centroid bagi proton teranjak lebih daripada titik centroid triton (Souza <i>et al.</i> , 2003)	27
2.12 Binaan asas sistem baca-keluar pengesan PSD	28
2.13 Sistem pemprosesan isyarat PSD daripada Mesytec	29
2.14 Binaan dalaman bagi modul MPSD	30
2.15 Binaan dalaman penguat duaan	30
2.16 Binaan dalaman modul MPCD	32
2.17 Binaan asas bagi pengesan kamera CCD	33
2.18 Keratan rentas bagi CCD (Smith, 1997)	34
2.19 Rekabentuk CCD 2-dimensi. Telaga-telaga cas disusun di dalam lajur dan baris (Smith, 1997)	35
2.20 Bilah turbin yang diimej menggunakan tomografi neutron (www.neutra.web.psi.ch)	37
2.21 Penggunaan tomografi neutron di dalam bidang automatif. (a) Palam pencucuh, (b) gelas bebola dan (c) enjin kereta (Lehmann <i>et al.</i> , 2000)	38
2.22 Tomografi neutron untuk bateri Litium di mana (a) bateri penuh dan (b) bateri kosong (Kardjilov <i>et al.</i> , 2005)	38

2.23	Tomografi neutron yang dilakukan ke atas (1) kokain dan (2) bahan letupan yang diletakkan di dalam (a) besi dan (b) plumbum	40
2.24	Penebaran minyak mentah di dalam batu diimej menggunakan tomografi neutron (Dierick, 2005)	40
2.25	Ruang B yang mempunyai diameter, D_2 dan ketumpatan, μ_2 yang berada di dalam ruang yang lebih besar iaitu A dengan diameter, D_1 dan ketumpatan μ_1	46
3.1	Unjuran untuk objek yang dilihat daripada pelbagai sudut	53
3.2	Geometri yang digunakan di dalam kaedah tomografi (a) geometri sinaran selari, (b) geometri sinaran kipas dan (c) geometri sinaran kon	55
3.3	Tomografi generasi pertama yang memerlukan objek diputar dan digerakkan untuk mengumpul unjuran	56
3.4	Tomografi generasi ketiga yang hanya memerlukan objek diputar sahaja sepanjang proses pengumpulan data dilakukan	57
3.5	Tomografi generasi kelima yang menggunakan pengesan 2-dimensi untuk menghasilkan imej tomografi 3-dimensi	57
3.6	Sistem koordinat untuk data unjuran dan operasi pengecilan yang berlaku	58
3.7	Unjuran untuk objek bagi sudut θ	60
3.8	Unjuran yang dibalikkan disusun ke dalam satu bulatan (Dove, 2001)	61
3.9	Fungsi penapis lurus rendah digunakan di dalam kaedah unjuran balik	72
3.10	Fungsi pelingkar yang digunakan di dalam geometri sinaran selari	75
3.11	Sel yang digunakan di dalam pembinaan semula imej menggunakan kaedah lelaran. Objek yang digunakan terletak di dalam bulatan yang mengandungi n sel.	76
4.1	Susun atur sistem tomografi yang digunakan di Nuklear Malaysia	88
4.2	Carta alir proses pengumpulan data untuk tomografi generasi ketiga	90
4.3	Kedudukan susun atur eksperimen pada kemudahan SANS	92
4.4	Pengesan PSD 1-dimensi yang digunakan	93
4.5	Bukaan melintang yang terletak di hadapan perisaian	94
4.6	Sistem perisaian dan pengkolimatan neutron bagi pengesan	94

4.7	Profil unjuran yang diperolehi menggunakan gandaan 0.5 dan voltan ambang 50 %. Profil ini digunakan di sepanjang eksperimen	96
4.8	Profil unjuran yang diperolehi jika voltan ambang maksimum tidak digunakan	96
4.9	Profil unjuran yang diperolehi jika gandaan yang digunakan adalah melebihi 0.5	97
4.10	Binaan asas sistem perisaian untuk pengesan CCD	98
4.11	Motor langkah yang digunakan sepanjang eksperimen	99
4.12	Meja pengimbasan yang menempatkan pengesan dan objek ujian	101
4.13	Sistem perisaian yang dibina untuk memastikan susun atur eksperimen bebas daripada kesan hingar persekitaran	102
4.14	Contoh fail yang mengandungi unjuran yang diperolehi daripada eksperimen	103
4.15	Pra pemrosesan ke atas setiap unjuran di mana (a) unjuran asal, (b) unjuran bertapis dan (c) unjuran selepas pemotongan	105
4.16	Carta alir proses pelaksanaan pembinaan semula imej menggunakan perisian RECLBL™	107
4.17	Paparan imej pembinaan semula menggunakan perisian (a) RECLBL™ dan (b) Igor Pro™	109
4.18	(a) Objek sampel, dan (b) sinogram bagi objek dalam (a)	112
4.19	(a) Objek sampel, dan (b) sinogram bagi objek dalam (a)	112
4.20	Pilihan-pilihan kaedah pembinaan semula imej yang disediakan	113
4.21	Paparan imej tomografi menggunakan perisian Igor Pro™	114
4.22	Blok aluminium yang digunakan dalam penentuan masa dedahan yang bersesuaian	116
4.23	Blok aluminium yang digunakan bagi kajian menggunakan sampel sama	118
4.24	Blok aluminium yang digunakan dalam kajian menentukan resolusi terkecil yang mampu dikesan oleh sistem tomografi neutron	119
4.25	Bateri Zink-Karbon yang digunakan di dalam eksperimen. Yang bertanda X adalah bateri ternyahcas	120
4.26	Keratan rentas bagi bateri Zink-Karbon (www.micro.magnet.fsu.edu)	121
5.1	Profil unjuran yang diperolehi bagi blok aluminium di dalam Rajah 4.22	123
5.2	Gambar radiografi bagi palam pencucuh	125

5.3	Pembinaan semula imej palam pencucuh bagi keratan (a) bahagian kepala, (b) bahagian elektrod dan (c) bahagian grafit	126
5.4	Carta bar menunjukkan nilai SNR bagi penggunaan penapis yang berlainan	127
5.5	Imej bina semula menggunakan kaedah FBP untuk masa dedahan (a) 20 saat, (b) 40 saat dan (c) 60 saat	130
5.6	Carta bar SNR bagi imej bina semula berdasarkan masa dedahan yang berlainan menggunakan pelbagai algoritma pembinaan semula imej	131
5.7	Ralat mutlak bagi lubang d10 dan d5	133
5.8	Tempoh pengumpulan data bagi eksperimen masa dedahan	134
5.9	Sinogram untuk unjuran bagi dedahan 20 saat dan keratan rentas bagi garisan dari A ke A'	135
5.10	Sinogram untuk unjuran bagi dedahan 40 saat dan keratan rentas bagi garisan dari A ke A'	136
5.11	Sinogram untuk unjuran bagi dedahan 60 saat dan keratan rentas bagi garisan dari A ke A'	137
5.12	Perbandingan keseragaman bilangan neutron yang diperolehi di sepanjang eksperimen bagi masa dedahan berlainan	139
5.13	Kesan penggunaan N_s yang berlainan ke atas SNR: (i) 50 sampel, (ii) 100 sampel (iii) 200 sampel dan (iv) 400 sampel. Nilai SNR untuk pelbagai algoritma pembinaan semula imej: (a) FR, (b) FBP, (c) CBP and (d) ILST	140
5.14	Carta bar menunjukkan SNR bagi imej bina semula untuk nilai N_s yang berlainan	141
5.15	Imej bina semula menggunakan kaedah FBP untuk (a) 100 unjuran, (b) 150 unjuran dan (c) 200 unjuran	143
5.16	Carta bar perbandingan SNR bagi imej bina semula untuk jumlah unjuran yang berlainan berdasarkan pelbagai algoritma pembinaan semula imej	144
5.17	Ralat untuk imej bina semula bagi d10 dan d5	145
5.18	Imej bina semula menggunakan bahan ujikaji yang sama bagi objek di dalam Rajah 4.23 berdasarkan kaedah pembinaan semula imej FBP	146
5.19	Plot permukaan bagi imej bina semula dalam Rajah 5.18	147
5.20	Keputusan untuk eksperimen penentuan resolusi menggunakan kaedah FBP	148
5.21	Plot-plot permukaan untuk ketumpatan imej bagi (a) Rajah 5.20(a) dan (b) Rajah 5.20(b)	149
5.22	Imej bina semula menggunakan kaedah (a) FR, (b) FBP (c) CBP dan (d) ILST	150

5.23	Carta bar menunjukkan SNR bagi perbandingan penggunaan kaedah pembinaan semula imej yang berlainan	151
5.24	Masa pemprosesan bagi kaedah yang digunakan	151
5.25	Resolusi imej yang dicapai menggunakan (a) FR, (b) FBP, (c) CBP dan (d) ILST	153
5.26	Imej bina semula bagi bateri baru	155
5.27	Imej bina semula bagi bateri ternyahcas	155
6.1	Pengkolimat sarang lebah yang berbentuk heksagon. Setiap sel dibina dengan kepingan gadolinium bersaiz 40 μm dengan panjang sisi 2 mm (Silvani et al., 2007)	163

SENARAI SIMBOL

		Muka surat
γ	Sinar gama	3
λ	Panjang gelombang	9
m	Jisim neutron	9
E	Tenaga kinetik pada neutron	9
v_n	Kelajuan neutron	9
h	Pemalar Planck	9
σ	Pekali pengecilan linear	10
σ_{is}	Keratan rentas serakan tak kenyal	10
σ_{abs}	Keratan rentas penyerapan pada tenaga tertentu	10
v_{ref}	Tenaga neutron yang tertentu	10
Z	Nombor atom	11
L/D	Nisbah pengkolimatan	20
D	Bukaan pengkolimat	20
L	Jarak antara bukaan pengkolimat dengan pengesan	20
U_G	Ketidaktajaman alur	21
N_ϕ	Jumlah unjuran	44
N_m	Bilangan neutron pada titik tengah blok yang homogen	45
$f(x, y)$	Objek	58
$\mu(x, y)$	Pekali pengecilan linear	58
μ	Nilai pengecilan	58
$P_\theta(t)$	Jumlah sinaran untuk sudut θ	59
$b_\theta(x, y)$	Unjuran balik bagi $P_\theta(t)$	61
$f_b(x, y)$	Imej anggaran bagi $f(x, y)$	61
F_{2D}^{-1}	Operator untuk jelmaan Fourier songsang 2-dimensi	62
$1/r$	Fungsi kekaburan imej	62
$S_\theta(\omega)$	Jelmaan Fourier 1-dimensi untuk $P_\theta(t)$	63
$F(u, v)$	Jelmaan Fourier 2-dimensi untuk $f(x, y)$	64
$F(\omega, \theta)$	Jelmaan Fourier 2-dimensi dalam koordinat polar untuk $f(x, y)$	64
$Q_\theta(t)$	Unjuran bertapis	65

$F(k_x, k_y)$	Jelmaan Fourier 2-dimensi untuk $f(x, y)$	65
F_{1D}^{-1}	Operator untuk jelmaan Fourier songsang 1-dimensi	69
F_{1D}	Operator untuk jelmaan Fourier 1-dimensi	69
N_s	Bilangan sampel per unjuran	83

SENARAI ISTILAH

Bahasa Melayu	Bahasa Inggeris
Alur	Beam
Artifak gelang	Ring artifact
Bezajelas	Contrast
Bukaan	Aperture
Cahaya nampak	Visible light
Cakap silang	Cross talk
Cermin pembalik	Reflective mirror
Cuping sisi	Side lobe
Dedahan awal	Open beam
Fantom	Phantom
Faktor pemberat	Damping factor
Galas bebola	Ball bearing
Homogen	Homogeneous
Jalur peralihan	Transition band
Kadar pemotongan Bragg	Bragg cut-off
Keamatan fluks	Flux intensity
Kekaburan	Blurring
Keratan rentas makroskopik	Macroscopic cross section
Keratan rentas penyerapan	Absorption cross section
Ketepatan	Accuracy
Ketidaktajaman alur	Beam unsharpness
Kolum terma	Thermal Column
Lelaran	Iterative
Litar pemacu	Driver circuit
Lubang pancar	Beam port
Imej bina semula	Reconstructed imaged
Masa dedahan	Exposure time
Motor langkah	Stepper motor

Neutron epiterma	Epithermal neutron
Neutron monokromat	Monochromatic neutron
Neutron pantas	Fast neutron
Neutron polikromat	Polychromatic neutron
Neutron sejuk	Cold neutron
Neutron terma	Thermal neutron
Neutron terserak bersudut kecil	Small angle neutron scattering
Nisbah isyarat-hingar	Signal to noise ratio
Nisbah pengkolimatan	Collimation ratio
Panjang gelombang	Wavelength
Pasca pemprosesan	Post processing
Pelingkaran	Convolution
Pembetulan	Correction
Pembetulan serentak	Simultaneous correction
Pembetulan sinaran demi sinaran	Ray to ray correction
Pembetulan titik ke titik	Point by point correction
Pembiasan	Refraction
Pembinaan semula imej	Image reconstruction
Pemecut zarah	Accelerator
Penapis	Filter
Pencapahan alur	Beam divergence
Pengantaramukaan	Interfacing
Pengecilan	Attenuation
Pengerasan alur	Beam hardening
Pengesan	Detector
Pengkolimat	Collimator
Pengumpulan data	Data acquisition
Penumpuan	Convergence
Peranti Cas Terganding	Charge Couple Device
Perisai	Shielding
Perisian	Software
Pinggiran	Edge
Polietilena	Polyethylene

Pra pemrosesan	Pre processing
Ruang sebenar	Real space
Ruang Fourier	Fourier space
Resolusi ruang	Spatial resolution
Serakan	Scattering
Serapan	Absorption
Set-an	Settings
Skema	Schematic
Sinaran selari	Parallel beam
Sinaran kipas	Fan beam
Sinaran kon	Cone beam
Sistem baca-keluar	Read out systems
Susun atur	Set-up
Terterma	Thermalised
Ternormal	Normalised
Terserak	Scattered
Tomografi neutron	Neutron tomography
Tomografi pancaran	Transmission tomography
Tomografi pembelauan	Diffraction tomography
Ujian tanpa musnah	Non-destructive testing
Unjur balik	Back project
Unjuran	Projection
Unjuran balik	Back projection
Unjuran balik bertapis	Filtered back projection
Voltan ambang	Threshold voltage

SENARAI SINGKATAN

		Muka surat
μ CT	Mikro computed tomography	2
CAT	Computer aided tomography	2
MRI	Magnetic resonance imaging	2
PET	Positron emission tomography	2
SPECT	Single photon emission computed tomography	2
SANS	Small angle neutron scattering	4
PSD	Position sensitive detector	5
SNR	Nisbah isyarat-hingar	5
CCD	Charge coupled device	8
NUR 2	Kemudahan neutron radiografi	13
NAA	Neutron activation analysis	13
HOPG	Highly oriented pyrolytic graphite	18
MPSD	Mesytec PSD	28
MCPD	Mesytec central processing device	29
LAN	Local area network	29
ICU	Internal central unit	31
FPGA	Field programmable gate array	31
IAEA	International agency of atomic energy	42
ART	Algebraic reconstruction technique	50
CT	Computed tomography	54
BP	Back projection	60
CST	Central section theorem	63
FR	Fourier reconstruction	65
FFT	Jelmaan Fourier pantas	65
FBP	Filtered back projection	68
RAMP	Penapis RAMP	70
HAN	Penapis Hanning	71
HAM	Penapis Hamming	71
PARZN	Penapis Parzen	71
BUTER	Penapis Butterworth	71

CBP	Convoluted back projection	73
ILST	Iterative least-squares technique	80
SIRT	Simultaneous iterative reconstructions technique	80
USB	Universal serial bus	99
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory	100

SENARAI LAMPIRAN

	Muka surat
1.1 Aturcara dalam bahasa pengaturcaraan Fortran untuk pembinaan semula imej	175
1.2 Manual pengguna PSD	184
1.3 Manual pengguna untuk panel pembinaan semula imej (IRP)	185

SENARAI PENERBITAN DAN SEMINAR

Abdul Aziz Mohamed, Nor Abidin Ashari, Mohd Zaid Abdullah, Junita Mohamad Saleh, Rafhayudi Jamro, Azraf Azman dan Megat Harun Al-Rashid Megat Ahmad. (2008) Preliminary Study On Zinc-Carbon Battery Performance By Using Neutron Computed Tomography. Seminar R&D 2008, 26/29 Ogos 2008, Agensi Nuklear Malaysia, Selangor. 92.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed dan Muhammad Rawi Mat Zin. (2007) Monochromatic Neutron Tomography System. Neutron For S&T. Kajang: Agensi Nuklear Malaysia. 8-9.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd. Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed, Azali Mohamed, Azraf Azman dan Rafhayudi Jamro. (2006) Advanced Imaging Technique In Material Evaluation Using Neutron Computed Tomography. International Conference on X-Rays and Related Techniques in Research and Industry, 29/30 November 2006, Palm Garden Hotel IOI Resort, Putrajaya.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd. Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed dan Rafhayudi Jamro. (2007) Monochromatic Neutron Tomography System Set-up at Low Flux Research Reactor. Jurnal Teknologi UTM. 48(D), 1-8.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd. Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed, Azraf Azman dan Rafhayudi Jamro. (2007) Monochromatic Neutron Tomography using 1-D PSD Detector at Low Flux Research Reactor. AIP Conference Proceedings. 989, 194-197.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd. Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed, Azali Muhammad, Muhammad Rawi, Azraf Azman dan Rafhayudi Jamro. (2007) Neutron Computed Tomography. Workshop & Conference on Research Reactor Utilization, 27/28 Jun 2007, Agensi Nuklear Malaysia, Selangor.

Nor Abidin Ashari, Junita Mohamad Saleh, Mohd. Zaid Abdullah, Abdul Aziz Mohamed, Azraf Azman dan Rafhayudi Jamro. (2007) Monochromatic Neutron Tomography Using 1-D PSD Detector at Low-flux Research Reactor. International Conference on Neutron & X-Ray Scattering, 23/31 Julai 2007, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia.

KAJIAN TEKNIK PENGIMEJAN MENGGUNAKAN SUMBER NEUTRON TERTERMA

ABSTRAK

Tomografi neutron merupakan salah satu kaedah ujian tanpa musnah yang semakin mendapat perhatian di seluruh dunia kerana kemampuannya untuk mengesan kandungan hidrogen dalam peralatan industri, dan pengimejan sampel yang besar. Pada masa sekarang, tomografi neutron digunakan secara meluas untuk memeriksa bahan-bahan yang gagal diimej menggunakan kaedah-kaedah tomografi yang lain seperti tomografi sinar-x dan tomografi sinar-gamma. Dengan adanya kemudahan reaktor penyelidikan di Malaysia, sistem tomografi neutron yang pertama di negara ini telah dibangunkan, menggunakan sumber neutron monokromat dengan panjang gelombang 0.5 nm daripada kemudahan Neutron Terserak Bersudut Kecil (SANS). Kemampuan sistem dikaji untuk mengetahui masa dedahan, bilangan sampel per unjuran, jumlah unjuran dan algoritma pembinaan semula imej yang terbaik. Imej bina semula yang diperolehi kemudiannya dikaji berdasarkan nisbah isyarat-hingar (SNR) dan resolusi ruang. Daripada eksperimen-eksperimen yang dilakukan, didapati masa dedahan yang terbaik ialah 60 saat, bilangan sampel per unjuran terbaik ialah 200 dan jumlah unjuran terbaik ialah 200 unjuran. Resolusi ruang untuk sistem yang dibangunkan pula adalah 2 mm. Algoritma unjuran balik bertapis (FBP) didapati menghasilkan nilai SNR tertinggi untuk imej yang dibina semula manakala algoritma unjuran balik terkonvolusi (CBP) pula mampu mengesan resolusi ruang imej sehingga 2 mm dengan ralat yang terkecil. Menggunakan parameter-parameter terbaik yang diperolehi, sistem yang dibangunkan telah berjaya diaplikasikan ke atas dua bahan industri, iaitu sel bateri dan palam pencucuh, bagi pengimejan keadaan dalaman objek.

A STUDY ON IMAGING TECHNIQUE USING THERMALIZED NEUTRON SOURCE

ABSTRACT

Neutron tomography has become one of the non-destructive testing techniques that is gaining worldwide recognition because of its capability in detection of hydrogen content in industrial tools, and imaging of bulky samples. Currently, neutron tomography has been widely used to inspect materials that have failed to be imaged using other tomography techniques such as x-ray tomography and gamma-ray tomography. With the availability of a research reactor facility in Malaysia, the first neutron tomography system in this country was built, utilizing a 0.5 nm neutron monochromatic source from Small Angle Neutron Scattering (SANS) facility. The performance of the system was evaluated to encover its best exposure time, number of samples per projection, number of projections and image reconstruction algorithm. The reconstructed images were then analyzed based on the signal-to-noise ratio (SNR) and spatial resolution. The results of the experiments showed that the best exposure time was 60 seconds, the best number of samples per projections was 200 and number of projections was 200. The spatial resolution for the system was 2 mm. The Filtered Back Projection (FBP) algorithm produced the highest SNR value for the reconstructed images while the Convolutd Back Projection (CBP) algorithm was able to detect image spatial resolution of up to 2 mm with the least error. Using the best parameters, the system had been succesfully applied on two industrial materials; a battery cell and spark plug, to image their internal structures.

BAB 1

PENGENALAN

1.0 Pengenalan

Tomografi berasal daripada dua perkataan Latin iaitu *tomo* yang bermaksud keratan rentas dan *graphy* yang bermaksud gambar. Ia adalah salah satu kaedah yang digunakan di dalam pemeriksaan dalaman (keratan rentas dan isipadu) sesuatu medium tanpa memasukkan alat ataupun membelah medium terbabit. Kaedah ini pertama kali dibangunkan oleh seorang jurutera Inggeris, Hounsfield di EMI Ltd, Britain pada tahun 1973 dan digunakan untuk menyelesaikan masalah di dalam bidang perubatan berkaitan dengan pengimejan tisu dalam bahagian otak manusia (Hounsfield, 1973). Ciptaan tersebut telah membolehkan beliau dianugerahkan anugerah Nobel dalam bidang perubatan pada tahun 1979 (Nobel Lectures, 1992).

Disebabkan kebolehan kaedah tomografi dalam menggambarkan keadaan dalaman objek dengan cepat dan mudah, kaedah ini banyak dikembangkan di dalam bidang perubatan dan industri. Jenis-jenis tomografi yang terdapat dalam bidang industri adalah tomografi proses dan tomografi ujian tanpa musnah. Manakala dalam bidang perubatan pula, mesin pengimbas tomografi telahpun digunakan sejak tahun 1970-an bagi mengesan pelbagai penyakit terutamanya berkaitan dengan kanser. Perkembangan pesat yang berlaku di dalam kaedah tomografi turut mencetuskan perkara yang sama dalam bidang pembinaan semula imej tomografi. Perkembangan ini semakin ketara pada sekitar tahun 1980-an di mana banyak algoritma pembinaan semula imej yang baru telah dikembangkan dan dicipta (Defrise dan Gullberg, 2006).

1.1 Tomografi Neutron

Tomografi neutron boleh dianggap sebagai satu kaedah terbaru di dalam teknik pengimejan ujian tanpa musnah. Perkembangan teknologi yang berlaku di dalam kaedah ini adalah sejajar dengan kaedah-kaedah tomografi yang lain terutamanya tomografi sinar-x. Jadual 1.1 menunjukkan perbandingan di antara tomografi neutron dengan kaedah-kaedah tomografi lain yang ada pada masa ini berdasarkan resolusi imej yang mampu diperolehi oleh kaedah-kaedah berkenaan. Selain daripada sumber radiasi yang digunakan, resolusi yang diperolehi oleh kaedah-kaedah tomografi ini turut bergantung kepada teknologi pengesan yang digunakan.

Jadual 1.1: Resolusi imej yang dapat dicapai oleh kaedah-kaedah tomografi yang ada pada masa kini (Masschaele, 2002)

Kaedah	Resolusi
Tomografi berkomputer mikro sinar-x (μ CT)	$< 1\mu\text{m}$
Tomografi di dalam bidang perubatan (<i>CAT Scan</i>)	0.1mm
Tomografi neutron	0.2mm
MRI (<i>Magnetic Resonance Imaging</i>)	0.3mm
PET (<i>Positron Emission Tomography</i>)	$\approx 3\text{mm}$
SPECT (<i>Single Photon Emission Computed Tomography</i>)	$\approx 7\text{mm}$

Berdasarkan Jadual 1.1, kaedah tomografi neutron didapati mempunyai kemampuan untuk menghasilkan resolusi imej yang setanding dengan kebanyakan kaedah tomografi yang lain. Namun, perlu dinyatakan bahawa resolusi ini dicapai menggunakan peralatan yang jauh lebih besar dan kompleks daripada kaedah-kaedah tomografi berasaskan sinar-x. Keadaan ini disebabkan status penyelidikan tomografi neutron yang masih baru terutamanya daripada segi pengaplikasian kaedah ini di dalam bidang komersial di seluruh dunia (Lehmann *et al.*, 2000).

Secara umumnya, kaedah tomografi neutron masih belum dapat menyaingi kepopularan tomografi sinar-x disebabkan kekurangan sumber neutron yang berketumpatan tinggi (Lehmann *et al.*, 2000). Ini disebabkan kos pembinaan reaktor nuklear berketumpatan tinggi memakan belanja yang besar. Walaupun begitu, dalam 10 tahun kebelakangan ini minat terhadap tomografi neutron semakin berkembang terutamanya oleh negara-negara maju seperti negara-negara di Kesatuan Eropah, Jepun dan Amerika Syarikat. Perkembangan yang berlaku terutamanya di dalam bidang pengesanan neutron dan perkomputeran turut meningkatkan potensi kemudahan tomografi neutron pada masa depan (Lehmann *et al.*, 2000).

Antara kelebihan kaedah tomografi neutron adalah kebolehnya mengimej bahan-bahan yang gagal ditembusi oleh kaedah-kaedah tomografi yang lain (Lehmann *et al.*, 2000). Kelebihan ini membantu mempopularkan kaedah tomografi neutron berbanding dengan kaedah-kaedah yang lain, sekaligus menjadi pemangkin kepada perkembangannya dan pelengkap bagi kaedah-kaedah tomografi yang lain. Penggunaannya kini telah meliputi pemeriksaan tanpa musnah ke atas peralatan penerbangan, peralatan automotif, bahan-bahan biologi dan artifak-artifak sejarah (Lehmann *et al.*, 2000).

1.2 Pernyataan Masalah

Pada masa sekarang, perkembangan pengimejan menggunakan tomografi neutron telah menjadi semakin penting di dalam bidang ujian tanpa musnah. Terdapat beberapa faktor penyumbang kepada situasi ini. Antaranya adalah kegagalan penggunaan sinar radiasi lain seperti sinar-x dan sinar- γ di dalam mengimej objek logam yang besar dan mengesan kehadiran atom hidrogen yang menjadi punca kepada

proses pengamatan di dalam bahan logam. Faktor penyumbang lain adalah pembangunan sistem pengesan neutron yang bersesuaian untuk digunakan di dalam bidang tomografi.

Dengan adanya kemudahan neutron di Malaysia, ia sekaligus membolehkan tomografi neutron digunakan sebagai salah satu kaedah untuk melakukan ujian tanpa musnah ke atas bahan-bahan industri. Walaupun begitu, proses untuk membangunkannya memerlukan kajian yang teliti agar ia mampu beroperasi dengan baik. Oleh itu beberapa faktor perlu diambil kira sebelum pembangunan sistem tomografi yang diinginkan dapat direalisasikan. Antaranya ialah penggunaan sumber neutron yang bersesuaian, masa pengumpulan data yang diperlukan, algoritma pembinaan semula imej yang digunakan dan juga kualiti imej yang akan diperolehi.

Pada masa ini kebanyakan sistem tomografi neutron yang sedia ada menggunakan sumber neutron polikromat. Sumber neutron polikromat ini cenderung untuk menghasilkan kesan pengerasan alur di dalam imej tomografi yang terhasil (Dierick, 2005; Fu dan Hu, 2006; Krimmel *et al.*, 2005). Kesan ini akan menyebabkan artifak di dalam imej yang dibina semula. Dengan menggunakan sumber neutron monokromat daripada kemudahan *Small Angle Neutron Scattering* (SANS) di Reaktor Triga Mark II, Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia), Bangi, kesan ini diharap dapat dielakkan.

Masa pengumpulan data untuk menyiapkan sesuatu eksperimen tomografi adalah amat penting. Ia menyumbang secara langsung terhadap kemampuan sistem yang dibangunkan menyiapkan eksperimen yang dikehendaki. Disebabkan sumber neutron yang diperolehi daripada kemudahan SANS secara amnya mempunyai

keamatan fluks yang rendah, satu kajian perlu dilakukan untuk mengetahui masa dedahan yang bersesuaian di mana masa dedahan yang dipilih tidak akan menyebabkan proses pengumpulan data berlanjutan sehingga beberapa hari lamanya dan tidak juga menghasilkan imej yang tidak berkualiti. Selain masa dedahan, jumlah unjuran yang digunakan juga turut menyumbang kepada penambahan masa pengumpulan data. Oleh itu unjuran minimum yang mampu diberikan oleh sistem dengan kualiti imej yang baik turut akan dikaji.

Selain daripada itu, kualiti imej bina semula yang dibina oleh sistem perlu dikaji untuk mengetahui prestasi sistem tomografi yang dibina. Kajian ke atas kualiti imej biasanya dibuat berdasarkan nisbah isyarat-hingar (SNR) dan resolusi ruang terkecil yang mampu dikesan oleh sistem. Keputusan dan kualiti imej yang diperolehi akan dibincangkan untuk melihat sejauh mana keberkesanan sistem ini. Cadangan untuk penambahbaikan akan disyorkan untuk memastikan kemudahan tomografi neutron yang pertama di Malaysia dan Asia Tenggara ini dapat direalisasikan dengan jayanya.

1.3 Objektif Penyelidikan

Penyelidikan ini dilakukan berdasarkan beberapa objektif iaitu:

- Membangunkan sistem tomografi neutron berasaskan sumber neutron monokromat menggunakan pengesan sensitif kedudukan (PSD).
- Mengkaji masa dedahan, bilangan sampel per unjuran dan jumlah unjuran yang bersesuaian untuk sistem. Selain itu resolusi terkecil yang mampu dikesan oleh sistem juga dikaji.
- Membandingkan algoritma-algoritma pembinaan semula imej yang sedia ada berdasarkan nilai SNR dan resolusi yang diperolehi daripada imej bina semula.

- Mengaplikasi sistem tomografi neutron di dalam bidang ujian tanpa musnah.

1.4 Garis Panduan Tesis

Selepas bab pengenalan ini, bab 2 menerangkan aspek-aspek berkaitan dengan tomografi neutron. Bab ini membincangkan teori berkaitan neutron dan penggunaannya di dalam pengimejan tomografi. Selain itu bab ini turut menyentuh mengenai aplikasi tomografi neutron dan status kemudahan tomografi neutron yang ada pada masa ini. Bab 3 seterusnya membincangkan aspek-aspek pembinaan semula imej tomografi. Bab ini menyentuh secara mendalam berkaitan dengan algoritma-algoritma yang digunakan di dalam tomografi bina semula di mana perbezaan, kelebihan dan kelemahan setiap kaedah yang digunakan dibincangkan. Bab 4 pula menerangkan kaedah-kaedah yang digunakan untuk melaksanakan kajian ini dan peralatan yang digunakan untuk merealisasikan hasrat itu. Seterusnya keputusan eksperimen yang disertai dengan perbincangan lanjut berkaitan keputusan yang diperolehi dibincangkan di dalam bab 5. Bab 6 pula memperkatakan tentang kesimpulan projek di samping cadangan yang dikemukakan di dalam penambahbaikan sistem tomografi neutron untuk masa hadapan.

BAB 2

TOMOGRAFI NEUTRON

2.0 Pengenalan

Neutron pada kebiasaannya boleh ditemui di dalam semua nukleus atom unsur (kecuali hidrogen) dan ia merupakan satu partikel yang tidak bercas. Neutron membentuk binaan asas bagi sesuatu unsur bersama-sama dengan elektron dan proton, di mana berat neutron adalah bersamaan dengan berat proton. Sejarah berkaitan dengan neutron telah bermula seawal tahun 1932, di mana Chadwick telah menemui satu partikel yang tidak bercas di dalam unsur yang kemudian dinamakannya sebagai neutron (Dayou, 1996). Penyelidikan berkaitan neutron yang dilakukan oleh Chadwick adalah berdasarkan usaha saintis-saintis terdahulu seperti Bothe, Becker, Curie dan ramai lagi. Daripada penyelidikan tersebut, beliau telah merumuskan bahawa partikel neutron dan proton merupakan binaan asas bagi sesuatu unsur. Penyelidikan tersebut kemudiannya telah disempurnakan oleh Ramsey di mana beliau telah menjelaskan bahawa zarah neutron adalah amat kecil dan bersifat neutral (Ramsey, 1983).

Penemuan neutron ini merangsang minat di dalam penyelidikan berkaitan penggunaannya, terutamanya di dalam bidang pemeriksaan ujian tanpa musnah. Pemeriksaan ujian tanpa musnah menggunakan neutron bermula apabila Kallman dan Kuhn (1935) melakukan eksperimen radiografi neutron yang pertama di Berlin, Jerman, menggunakan neutron yang dihasilkan daripada kemudahan pemecut zarah (Van Der Hardt dan Rottger, 1981). Walaupun begitu, penyelidikan yang dilakukan oleh Kallman dan Kuhn itu hanya sekadar dapat membuktikan bahawa neutron juga boleh digunakan di dalam bidang ujian tanpa musnah tanpa memperolehi keputusan yang memberangsangkan. Perkembangan selanjutnya berkaitan penggunaan neutron di dalam

bidang ujian tanpa musnah dapat dilihat serentak dengan pembinaan reaktor nuklear penyelidikan yang pertama di dunia iaitu di Harwell, Britain di mana eksperimen radiografi neutron yang dilakukan oleh Thewlis dan Derbyshire (1965) telah berjaya memperolehi kualiti imej radiografi yang lebih baik daripada penyelidikan yang dilakukan oleh Kallman dan Kuhn (1935) (Von Der Hart dan Rottger, 1981). Penyelidikan berkaitan tomografi neutron pula hanya bermula selepas 1980-an serentak dengan penciptaan pengesan neutron yang lebih canggih seperti pengesan kamera peranti cas terganding ataupun *charge coupled device* (CCD), pengesan flat panel dan pengesan PSD. Minat di dalam penyelidikan berkaitan tomografi neutron ini turut sama didorong oleh perkembangan yang telah lama wujud di dalam tomografi sinar-x (Lehmann *et al.*, 2000). Walaupun begitu, penyelidikan berkaitan bidang ini masih kurang dijalankan disebabkan kurangnya sumber neutron berkeamatan tinggi di kebanyakan reaktor-reaktor penyelidikan nuklear yang ada hari ini.

2.1 Sifat-Sifat Am Alur Neutron

Neutron sepertimana juga unsur-unsur lain, turut mempunyai sifat-sifat am yang membezakannya daripada unsur yang lain. Sifat-sifat am bagi neutron ditunjukkan di dalam Jadual 2.1. Pada umumnya neutron merupakan satu partikel yang tidak bercas dan ia terdiri daripada 3 kuark utama yang mana satu kuark terletak di bahagian atas dan yang selebihnya berada di bahagian bawah. Sebagai satu partikel yang bebas, neutron adalah tidak stabil dan akan bergerak bebas ke semua arah termasuklah ke arah proton, elektron dan sebagainya dengan separuh-hayat 648.0 ± 9.6 s ataupun lebih kurang 11 minit (Dierick, 2005).

Jadual 2.1: Sifat-sifat am alur neutron (Dierick, 2005)

Jisim	939.5656 MeV/c ²	Pusingan	1/2
Cas	0 C	Momen Magnet	-1.9130427(5) μN
Jejari	8.10 ⁻¹⁶ m	Komponen Kuark	bba ¹
Hayat min	885.7 \pm 0.8s		

Selain daripada mempunyai sifat penembusan yang sama dengan sinar-x dan sinar- γ , neutron juga boleh diklasifikasikan sebagai gelombang kerana ia turut mematuhi teori de Broglie berkaitan dengan panjang gelombang (www.neutra.web.psi.ch). Ini boleh dilihat daripada Persamaan (2.1) yang mengaitkan jisim neutron, (m), halaju neutron, (v_n), panjang gelombang neutron, (λ), pemalar Planck, (h) dan tenaga kinetik, (E) yang ada pada neutron.

$$E = \frac{mv_n^2}{2} = \frac{h^2}{2m} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

Dengan menganggap jisim neutron, $m = 1.6749 \times 10^{-27}$ kg dan pemalar Planck, $h = 6.626068 \times 10^{-34}$ m²kgs⁻¹, maka Persamaan (2.1) boleh ditulis semula menjadi,

$$E = \frac{81.8}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

Oleh itu adalah menjadi satu kebiasaan untuk mengaitkan tenaga yang dimiliki oleh neutron sebagai panjang gelombangnya. Pengelasan yang lebih lanjut berkaitan neutron boleh dilihat dalam Jadual 2.2. Berdasarkan Jadual 2.2, didapati zarah neutron boleh diwakilkan daripada julat ultra sejuk ke julat neutron pantas iaitu pada julat tenaga di antara 0.5 meV sehingga 0.8 MeV. Setiap kelas neutron akan menunjukkan perbezaan daripada segi interaksi dengan bahan walaupun bahan ujian yang sama digunakan.

¹ bba - bawah bawah atas

Jadual 2.2: Pengkelasan neutron berdasarkan tenaga dan panjang gelombang (Dierick, 2005)

Neutron	Julat tenaga	Panjang gelombang (nm)
Ultra Sejuk	$\leq 0.5\text{meV}$	≥ 1.28
Sejuk	$0.5\text{meV} - 2\text{meV}$	$1.28 - 0.64$
Terma	$2\text{meV} - 100\text{meV}$	$0.64 - 0.09$
Epiterma	$100\text{meV} - 1\text{eV}$	$0.09 - 0.028$
Pertengahan	$1\text{eV} - 0.8\text{MeV}$	$0.028 - 3.0 \times 10^{-5}$
Pantas	$> 0.8\text{MeV}$	$> 3.0 \times 10^{-5}$

Dalam kaedah tomografi mahupun radiografi neutron, maklumat yang diukur ialah nilai pengecilan yang berlaku apabila neutron melalui sesuatu bahan. Nilai pengecilan ini berkait secara langsung dengan keratan rentas ataupun pekali pengecilan linear, μ untuk bahan tersebut di mana keratan rentas adalah maklumat penting yang digunakan untuk mengukur tahap kepekaan bahan berkenaan terhadap alur neutron. Selain bergantung kepada keamatan fluks neutron, keratan rentas untuk neutron adalah berkadar songsang dengan halaju neutron, v_n . Keratan rentas neutron diberikan oleh Persamaan (2.3) (Dierick, 2005);

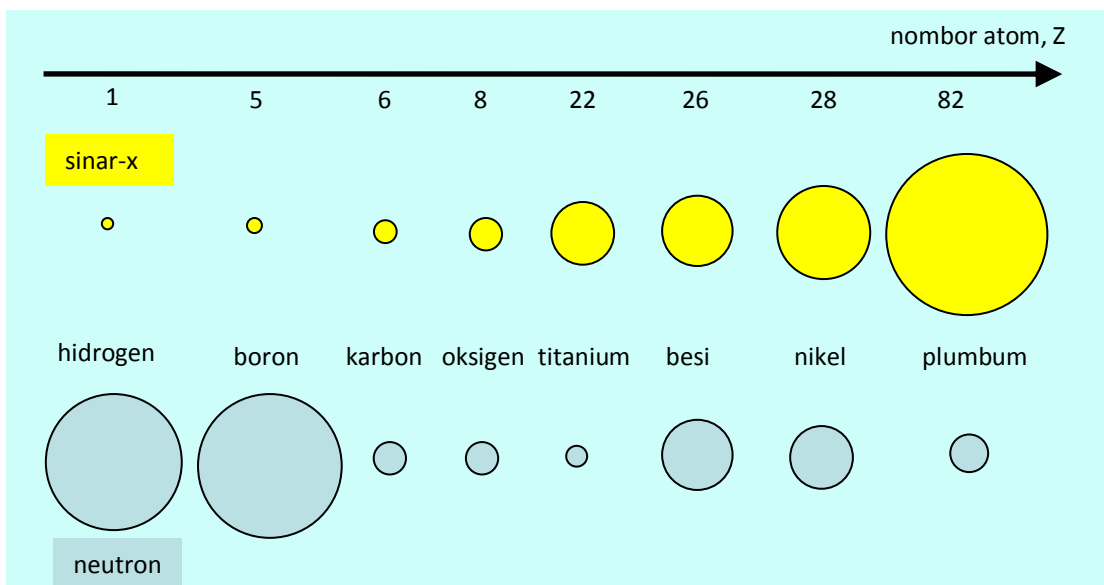
$$\sigma = \sigma_{is} + \sigma_{abs, v_{ref}} \cdot \frac{v_{ref}}{v_n} \quad (2.3)$$

di mana σ_{is} adalah keratan rentas serakan tak kenyal, $\sigma_{abs, v_{ref}}$ pula adalah keratan rentas penyerapan pada tenaga tertentu, v_{ref} adalah tenaga neutron tertentu dan v_n adalah halaju neutron. Berdasarkan Persamaan (2.3), didapati keratan rentas penyerapan bahan akan menurun jika halaju neutron semakin tinggi.

Tindakbalas yang biasa berlaku di antara neutron dengan bahan adalah tindakbalas serapan, serakan dan pembiasan. Untuk tindakbalas serapan, nilai keamatan neutron yang melalui bahan tersebut akan berkurang secara berkadar terus dengan keratan rentas yang dipunyai oleh bahan tersebut. Akan tetapi pengurangan ini tidak akan mengganggu perambatan alur neutron di dalam bahan tersebut. Untuk tindakbalas serakan pula, keamatan dan arah perambatan neutron akan terganggu manakala tindakbalas pembiasan akan hanya mengubah arah perambatan neutron.

Nilai untuk keratan rentas neutron bagi sesuatu unsur tidak bergantung kepada nombor atomnya, Z , sebagaimana yang berlaku terhadap sinar-x dan sinar- γ (Halmshaw dan Hunt, 1975; www.neutra.web.psi.ch). Walaupun terdapat pelbagai jadual yang mencatatkan keratan rentas untuk neutron, akan tetapi ia adalah berbeza dan hanya unik bagi kelas-kelas tenaga yang sama sahaja. Sifat-sifat am neutron yang sukar diramal ini tidaklah menjadikan neutron sebagai satu unsur yang tidak berguna. Malahan saintis telah mendapati dan membuktikan yang kelemahan ini boleh dijadikan kelebihan penggunaannya. Oleh kerana neutron tidak mematuhi jadual berkala unsur sepertimana sinar-x, ia dapat digunakan untuk melakukan ujikaji di mana sinar-x gagal melakukannya. Ini membolehkan neutron mengesan atom-atom kecil yang hadir dalam bahan logam bernombor atom besar yang gagal dikesan oleh sinar-x dan sinar- γ sedangkan atom-atom ini sering ditemui dalam peralatan industri (Bayon *et al.*, 1983). Selain itu, penggunaan neutron terhadap unsur-unsur ringan seperti hidrogen dan boron didapati menunjukkan tindakbalas yang besar sepertimana yang berlaku terhadap unsur-unsur berat seperti kadmium dan gadolinium. Dalam pada masa yang sama, logam ringan seperti aluminium dan logam berat seperti plumbum menunjukkan tindakbalas yang kecil dan hampir dapat diimej sepenuhnya dengan menggunakan neutron.

Rajah 2.1 menunjukkan perbandingan bagi sesetengah unsur untuk neutron dan sinar-x berdasarkan nombor atom yang dimiliki. Dapat dilihat daripada Rajah 2.1 bahawa interaksi bagi neutron dengan atom-atom yang lain tidak dipengaruhi oleh nombor atom, Z. Neutron juga menunjukkan interaksi yang besar terhadap atom-atom kecil seperti hidrogen dan boron berbanding dengan sinar-x.

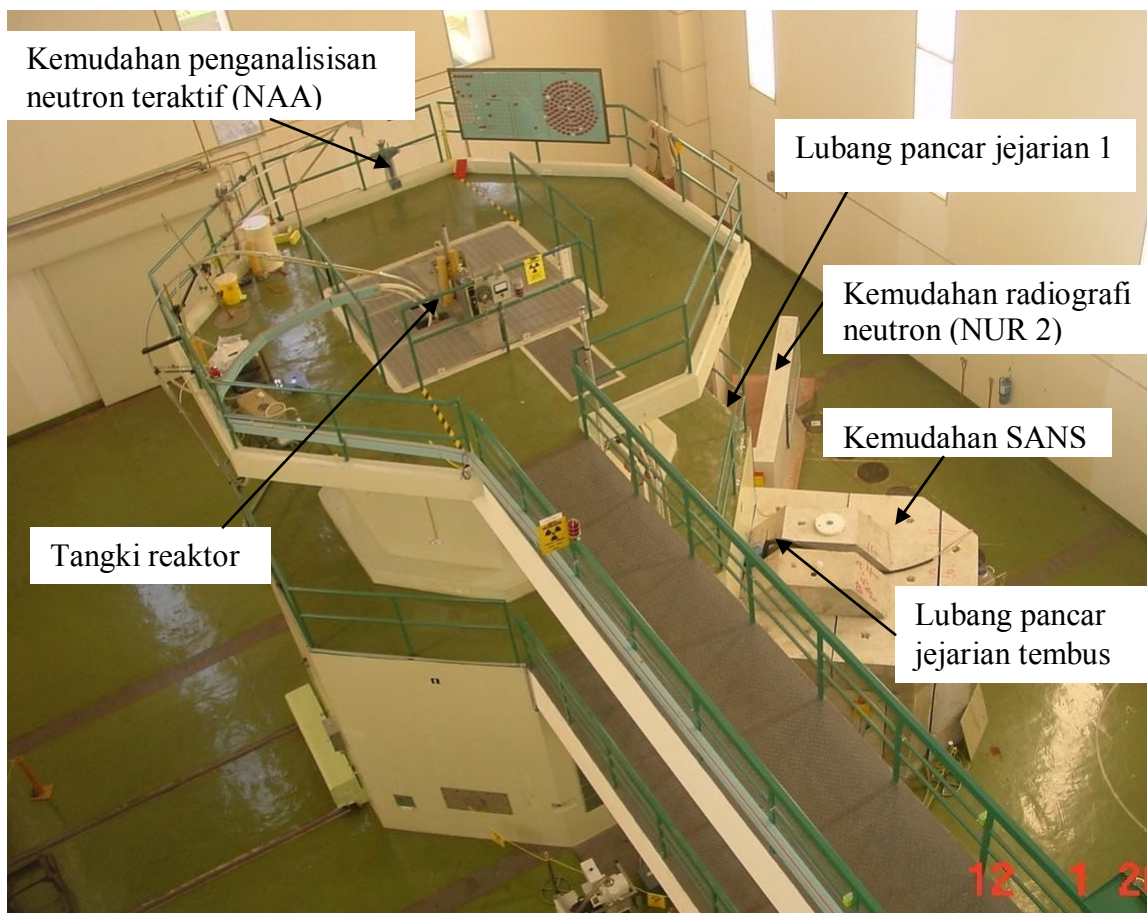


Rajah 2.1: Perbandingan berkaitan interaksi untuk bahan-bahan tertentu antara neutron dan sinar-x. Bulatan yang lebih besar bermaksud interaksi yang lebih besar berlaku (www.neutra.web.psi.ch)

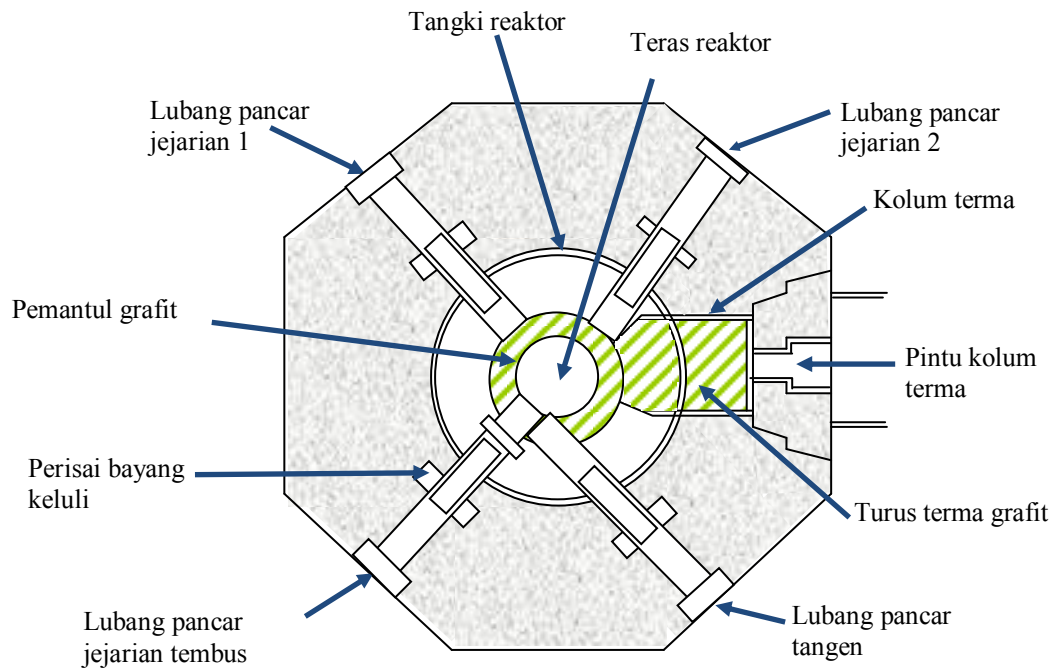
2.2 Reaktor Triga Mark II

Reaktor Penyelidikan Nuklear Triga Mark II di Malaysia telah mula dibina di Bangi, Selangor pada tahun 1972 dan siap pada tahun 1976. Reaktor Triga Mark II dibina untuk memberikan pendedahan kepada penyelidik-penyelidik Malaysia di dalam bidang nuklear terutamanya bidang penyelidikan, latihan dan pengeluaran isotop. Reaktor Triga Mark II dengan keamatan fluks $5 \times 10^{12} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ di dalam teras reaktor mula beroperasi pada tahun 1982.

Rajah 2.2 menunjukkan pandangan atas dewan Reaktor Triga Mark II. Antara kemudahan-kemudahan yang ada di Reaktor Triga Mark II adalah kemudahan SANS, kemudahan radiografi neutron (NUR 2) dan kemudahan penganalisan neutron teraktif ataupun *neutron activation analysis* (NAA). Kesemua kemudahan ini ditempatkan pada lubang pancar yang berasingan. Susun atur bagi semua lubang pancar boleh dilihat pada keratan rentas Reaktor Triga Mark II dalam Rajah 2.3. Kemudahan SANS diletakkan di lubang pancar jejarian tembus, kemudahan NUR 2 pada lubang pancar jejarian 1 dan kemudahan NAA menggunakan sumber neutron daripada teras reaktor yang terletak di dalam tangki reaktor.



Rajah 2.2: Pandangan atas dewan Reaktor Triga Mark II di Agensi Nuklear Malaysia



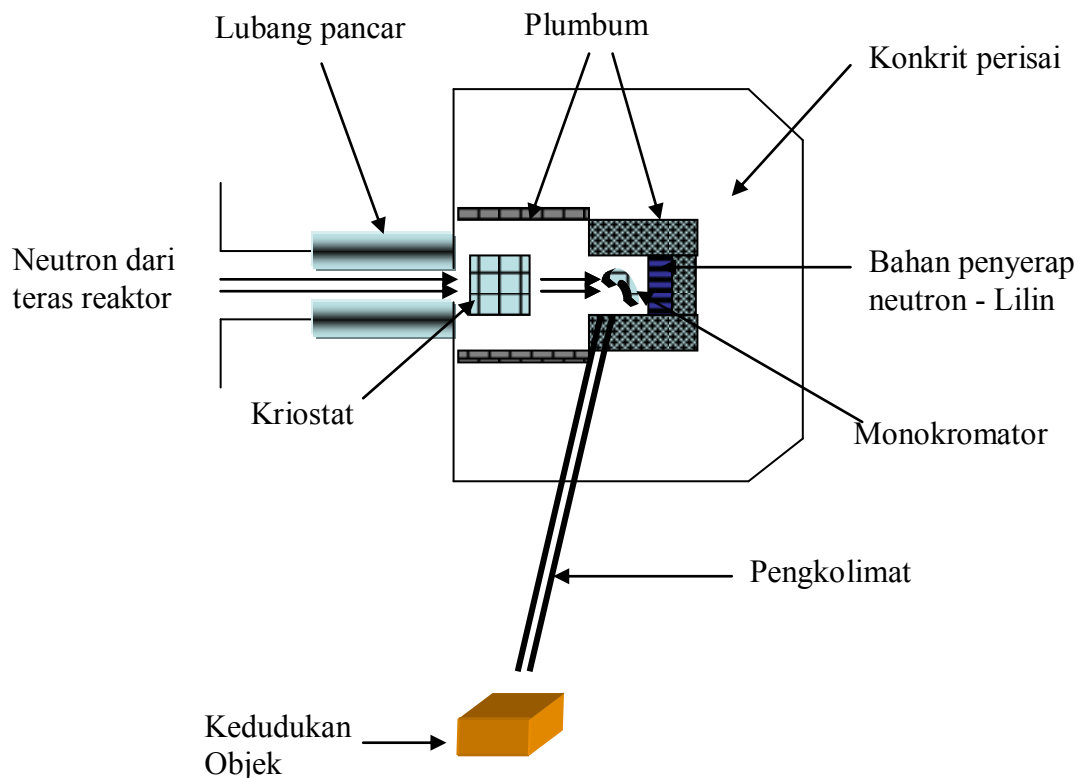
Rajah 2.3: Keratan rentas Reaktor Triga Mark II di Nuklear Malaysia

2.3 Kemudahan Neutron Terserak Bersudut Kecil (SANS)

Kemudahan SANS yang digunakan sebagai sumber utama radiasi sistem tomografi neutron yang dibangunkan ditempatkan di lubang pancar jejarian tembus pada Reaktor Triga Mark II di mana lubang pancar tersebut mampu menghasilkan keamatan fluks neutron yang tinggi. Ini adalah kerana neutron pada lubang pancar tersebut tidak ditapis oleh pemantul grafit apabila ia bergerak keluar daripada teras reaktor. Ini boleh dilihat daripada Rajah 2.3. Neutron yang diperolehi daripada lubang pancar ini terdiri daripada neutron pantas, neutron terma serta neutron epiterma. Pada masa sekarang, kemudahan SANS digunakan bagi tujuan pencirian bahan terutamanya di dalam bidang metalurgi dan polimer.

Rajah 2.4 menunjukkan susun atur kemudahan SANS. Ia dilingkungi oleh perisai biologi yang diperbuat daripada campuran simen dan plumbum sebagai konkrit

perisaian utama (Ramli dan Deraman, 1986). Sebahagian besar daripada peralatan utama kemudahan ini seperti kriostat dan monokromator terletak di dalam konkrit perisai di mana sebahagian lagi terutamanya pengkolimat dan pengesan diletakkan di luar konkrit perisai.



Rajah 2.4: Susun atur sistem pengkolimat kemudahan SANS

Dengan merujuk kepada Rajah 2.4, apabila alur neutron keluar daripada teras reaktor melalui lubang pancar, ia akan ditapis oleh penapis Berilium yang berada di dalam kriostat sebelum dipantulkan menggunakan pemantul monokromator (Ramli dan Deraman, 1986). Seterusnya alur neutron yang terhasil iaitu di dalam julat panjang gelombang 0.5 nm akan bergerak ke kedudukan objek. Untuk sampai ke tempat objek diletakkan, alur neutron akan melalui lubang pengkolimat berdiameter 100 mm yang telah divakum bagi memandu neutron supaya bergerak di dalam keadaan lurus dan mengelakkan neutron daripada bertindakbalas dengan partikel-partikel lain yang berada

di dalam pengkolimat. Partikel-partikel ini berkemungkinan akan mengurangkan keamatan neutron yang diperolehi di hujung pengkolimat. Jadual 2.3 memaparkan beberapa parameter penting berkaitan dengan kemudahan SANS.

Jadual 2.3: Parameter-parameter untuk kemudahan SANS

Parameter	Nilai
Keamatan fluks neutron	$2.1 \times 10^4 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Panjang Gelombang	0.5 nm
Resolusi Panjang Gelombang	5.2%
Nisbah Pengkolimat	70
Diameter pengkolimat	100 mm

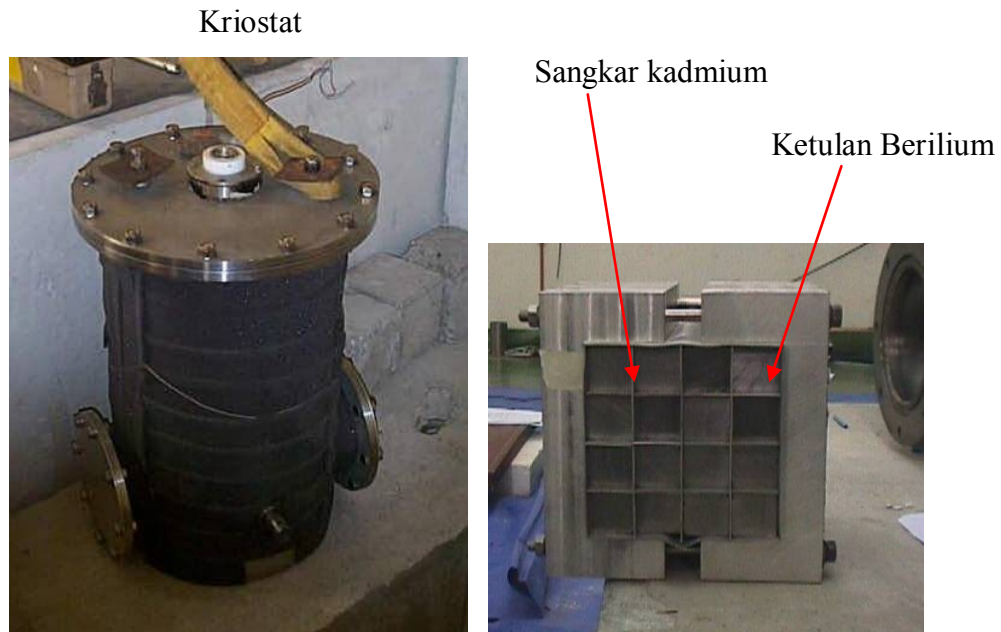
Kemudahan ini mampu membekalkan fluks neutron pada keamatan $2.1 \times 10^4 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ dengan menggunakan pengkolimat berdiameter 100 mm dan panjang 4 m (Ramli dan Fatah, 1994). Sumber neutron yang dihasilkan oleh kemudahan SANS adalah sumber neutron monokromat. Beberapa eksperimen yang dilaksanakan oleh pusat-pusat penyelidikan di Eropah mendapati sumber neutron monokromat mampu memberikan imej tomografi yang berkualiti bersamaan dengan kualiti yang diperolehi daripada sumber-sumber lain seperti neutron terma dan neutron sejuk (Treimer *et al.*, 2005a; Treimer *et al.*, 2005b dan Dierick, 2005). Seterusnya maklumat tambahan berkaitan alatan-alatan yang digunakan di kemudahan SANS ditunjukkan di dalam Jadual 2.4.

Jadual 2.4: Alatan-alatan yang digunakan di dalam kemudahan SANS

Sistem monokromator	Berilium yang disejukkan oleh cecair nitrogen dengan pemantul monokromator [002] HOPG pada sudut 96.38° , 2θ . Dengan panjang gelombang 0.5 nm.
Pengkolimat	Pengkolimat boleh ubah dilengkapi perisai dengan L = 1, 2 dan 4 meter. Bukaannya pengkolimat boleh ubah dengan D = 12, 25, dan 50 mm. Binaan bukaannya daripada aluminium dan silikon.
Pengesan neutron	128 x 128 He-3 PSD
Tiub pengkolimat kedua	Tiub boleh ubah divakum dengan L = 1, 2 dan 4 meter dengan D = 1000 mm
Perisian pengumpulan data	Z180 dan memori histogram serta analisis data dan kawalan instrumen. Pengantaramukaannya Quick Basic.

2.3.1 Kriostat

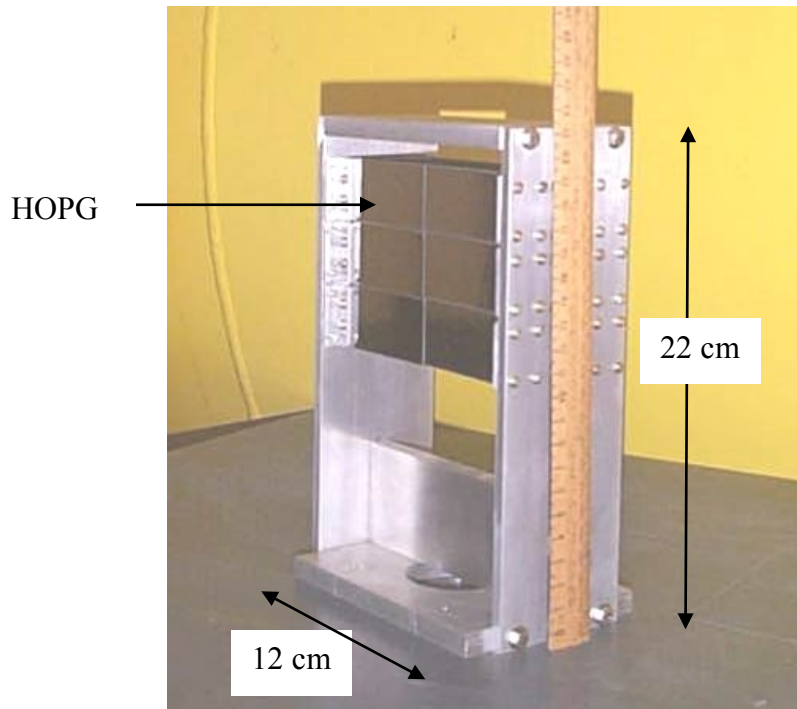
Kriostat yang turut mengandungi penapis berilium berfungsi untuk menapis alur neutron yang mempunyai julat panjang gelombang kurang daripada 0.4 nm (Ramli dan Deraman, 1986). Kriostat terdiri daripada ketulan-ketulan logam berilium yang telah dipotong mengikut saiz tertentu, tangki cecair nitrogen dan tangki vakum yang ditempatkan di luar pengkolimat utama lubang pancar. Logam berilium yang digunakan pula disejukkan pada suhu -176°C menggunakan cecair nitrogen dan berfungsi untuk memastikan kesemua neutron melalui kriostat ditukarkan kepada neutron terterma. Alur neutron yang melalui kriostat ini akan dikolimatkan menggunakan sangkar-sangkar kadmium untuk mendapatkan alur neutron yang selari. Alur neutron yang selari ini adalah penting untuk memastikan neutron dapat dipantulkan pada sudut yang tepat oleh monokromator. Rajah 2.5 menunjukkan kriostat dan binaan asas untuk penapis berilium.



Rajah 2.5: Kriostat dan penapis berilium

2.3.2 Monokromator

Monokromator berfungsi untuk memantul alur neutron yang diperolehi daripada penapis berilium dan ia akan hanya memantulkan alur neutron yang mempunyai panjang gelombang 0.5 nm. Monokromator yang digunakan dibina daripada tiga lapisan *highly oriented pyrolytic graphite* (HOPG) dan mempunyai sudut serakan sekitar 0.80° . Monokromator yang digunakan mampu memantulkan kira-kira 80 % daripada keamatan neutron yang diterimanya (Ramli dan Fatah, 1994). Ia diletakkan di atas goniometer bagi membolehkannya dipusingkan dan digerakkan ke mana-mana arah yang dikehendaki. Ini adalah untuk memastikan sumber neutron pada ketumpatan fluks yang optimum diperolehi. Rajah 2.6 menunjukkan monokromator yang digunakan di dalam kemudahan SANS.



Rajah 2.6: Monokromator yang digunakan pada kemudahan SANS

2.3.3 Lubang Pengkolimat

Lubang pengkolimat berfungsi untuk menyalurkan alur neutron ke tempat objek diletakkan. Ia bermula selepas monokromator dan berakhir sebelum tempat objek diletakkan. Pengkolimat divakumkan bagi membolehkan alur neutron bergerak bebas di dalam pengkolimat tersebut. Bukaan bulat berdiameter 50 mm diletakkan di awal lubang pengkolimat bertujuan untuk mendapatkan alur neutron yang selari. Lubang pengkolimat dibina daripada empat bahagian terpisah dengan jarak maksimum 4 m. Setiap bahagian pengkolimat boleh dipisahkan untuk mendapatkan keamatan neutron yang berlainan. Keamatan fluks untuk panjang pengkolimat yang berbeza boleh dilihat di dalam Jadual 2.5.

Jadual 2.5: Keamatan fluks untuk kemudahan SANS (Ramli dan Fatah, 1994)

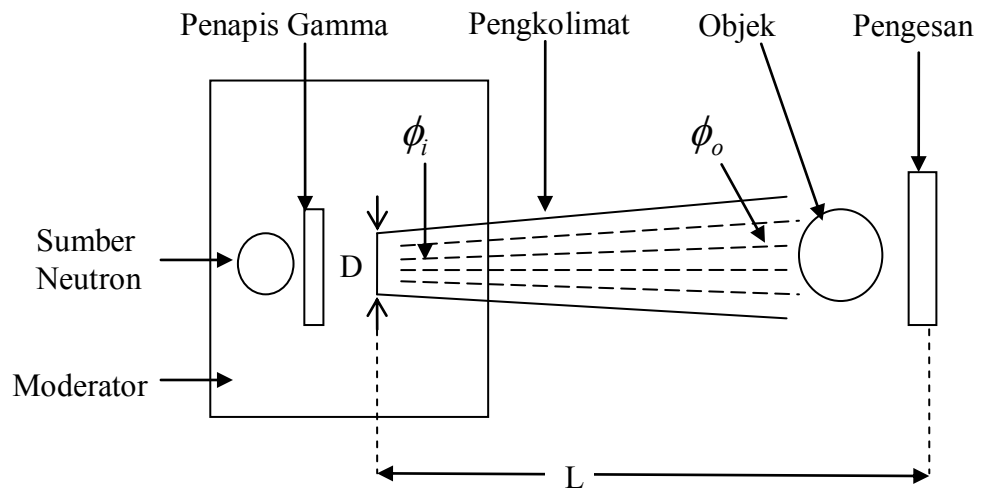
Panjang Pengkolimat, L (m)	Diameter bukaan, D (mm)	Keamatan Fluks ($\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	50	3.3×10^5
	25	2.1×10^4
	15	1.1×10^3
2	50	8.3×10^4
	25	5.2×10^3
	15	2.8×10^2
4	50	2.1×10^4
	25	1.3×10^4
	12	6.9×10^1

2.4 Nisbah Pengkolimatan (L/D)

Nisbah pengkolimatan, L/D adalah merupakan parameter terpenting di dalam pengimejan neutron di samping keamatan fluks neutron (Dos Reis, 1989). L merupakan jarak antara bukaan dengan pengesan dan D adalah diameter bukaan depan pengkolimat (Tsipenyuk, 1997). Ini ditunjukkan di dalam Rajah 2.7. Daripada nilai L/D pengkolimat, kekaburan disebabkan oleh ketidaktajaman alur, pencapahan alur dan hubungan antara keamatan fluks pada bukaan dengan keamatan fluks pada tempat objek melalui hubungan *inverse-square* (anggaran) dapat diketahui (Raine III *et al.*, 1999; Supramaniam, 2007). Perkaitan antara keamatan fluks neutron dengan nisbah pengkolimat diberikan oleh (Von Der Hardt dan Rottger, 1981)

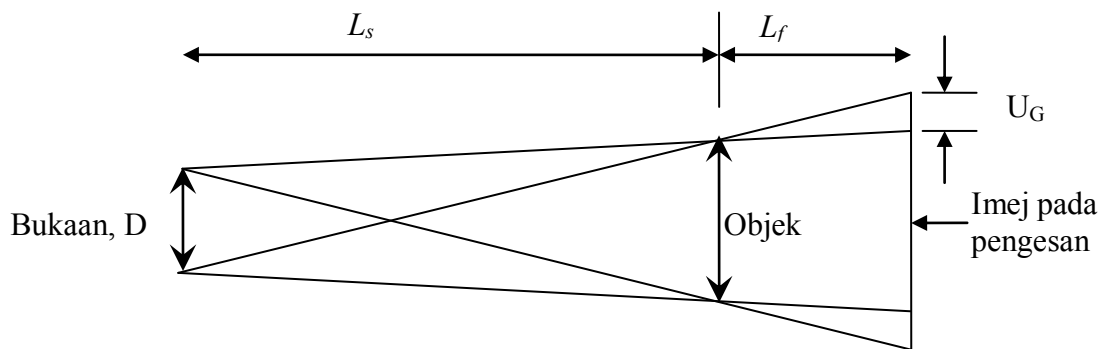
$$\frac{\phi_i}{\phi_o} = 16 \left(\frac{L}{D} \right) \quad (2.4)$$

di mana D adalah bukaan pengkolimat, L adalah jarak antara D dengan pengesan, ϕ_o pula ialah jumlah keamatan fluks pada hujung pengkolimat dan ϕ_i ialah jumlah keamatan fluks pada bukaan pengkolimat. Daripada Persamaan (2.4) dapat diperhatikan yang keamatan fluks pada pengesan, ϕ_o akan semakin bertambah jika nilai L/D rendah digunakan (rujuk Rajah 2.7).



Rajah 2.7: Susunan skema bagi fasiliti pengimejan neutron

Selain daripada itu, L/D juga menyumbang ke atas resolusi ruang melalui kekaburan yang dinilai daripada ketidaktajaman alur, U_G . Kaitan antara ketidaktajaman alur dengan L/D boleh dilihat daripada Rajah 2.8.



Rajah 2.8: Ketidaktajaman alur

Ketidaktajaman alur, U_G diberikan oleh Persamaan (2.5) (Von Der Hardt dan Rottger, 1981).

$$U_G = \left(\frac{L_s}{L_f} \right) D = \left(\frac{L}{D} \right)^{-1} L_f \quad (2.5)$$

Pada kebiasaannya nilai $L_f \ll L_s$ dan ini menyebabkan nilai U_G bergantung sepenuhnya kepada nilai songsangan L/D , di mana nilai L/D yang besar akan mengurangkan nilai U_G sekaligus memberikan imej yang lebih baik (Dayou, 1996). Untuk mengurangkan ketidaktajaman alur, saiz bukaan D dan jarak L_f mestilah kecil manakala jarak L_s mestilah besar (Von Der Hardt dan Rottger, 1981). Akan tetapi nisbah L/D yang besar akan menyebabkan keamatan fluks yang rendah diperolehi pada kedudukan pengesan. Oleh itu adalah perlu nilai L/D yang bersesuaian digunakan untuk mengelakkan konflik antara ketidaktajaman alur dan keamatan fluks.

2.5 Sumber Neutron Monokromat

Sumber neutron monokromat adalah sumber neutron yang berada pada julat tenaga yang tertentu. Sumber inilah yang diperolehi daripada kemudahan SANS. Di kemudahan SANS, sumber neutron yang digunakan mempunyai panjang gelombang 0.5 nm dengan nisbah $L/D = 70$. Berdasarkan Jadual 2.2, ia diklasifikasikan sebagai neutron terma, akan tetapi oleh kerana nilai tersebut berada dalam nilai peralihan antara sumber neutron terma dan sumber neutron sejuk ia lebih dikenali sebagai neutron terma-sejuk (Rawi *et al.*, 2006).

Oleh itu, bolehlah dianggap bahawa penggunaan sumber ini akan menghasilkan keputusan yang hampir sama dengan penggunaan neutron sejuk, di mana kelas neutron sejuk didapati mempunyai keratan rentas yang tinggi untuk sesetengah unsur. Di samping itu, penggunaan neutron pada panjang gelombang 0.5 nm membolehkan kesan

serakan diminimumkan disebabkan nilai panjang gelombang yang melebihi nilai pemotongan Bragg bagi kebanyakan bahan logam iaitu 0.4 nm dan sekaligus sumber neutron yang digunakan dapat menembusi bahan ujian tanpa mengalami sebarang kesan serakan yang nyata (Baechler *et al.*, 2002; Kardjilov *et al.*, 2004). Keadaan ini turut menyaksikan sumber neutron monokromat mampu menembusi kebanyakan bahan logam seperti Al, Fe, Cu, Ni dan Pb dengan mudah. Penggunaan sumber monokromat ini juga menepati apa yang dikehendaki oleh hukum penyerapan Lambert, di mana hukum tersebut menyatakan bahawa sinar yang digunakan di dalam pembinaan semula imej hendaklah bersifat monokromat bagi mendapatkan nisbah pengecilan yang tepat (ASTM, 2005).

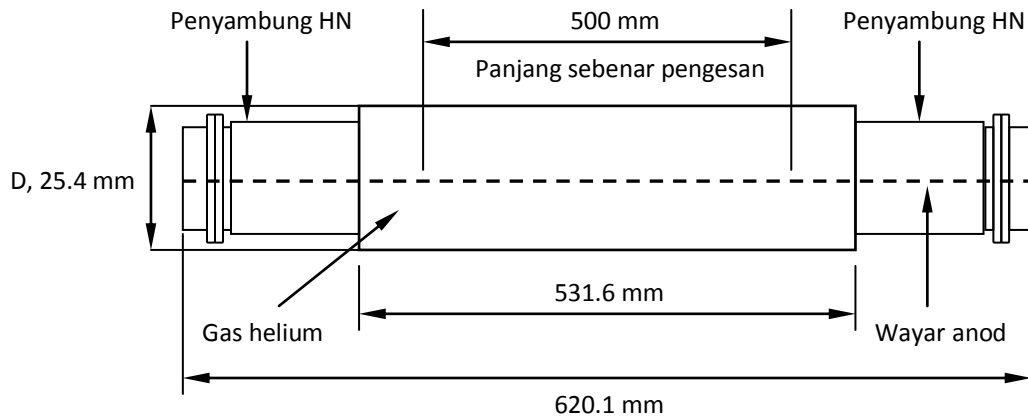
2.6 Pengesan Neutron

Pada masa ini terdapat tiga jenis pengesan neutron yang banyak digunakan di dalam kaedah tomografi neutron. Antaranya ialah pengesan berasaskan kebuk gas seperti pengesan PSD, pengesan berasaskan sintilator seperti pengesan kamera CCD dan pengesan flat panel yang berasaskan semikonduktor.

2.6.1 Pengesan Sensitif Kedudukan (PSD)

Pengesan PSD adalah pengesan yang mampu mengesan dengan tepat kedudukan tindakbalas nuklear yang berlaku di dalam pengesan. Selain itu, ia juga mengukur amplitud isyarat yang terhasil di kedudukan tersebut. Pengesan PSD dibina berasaskan kebuk tekanan gas dan kebiasaannya diisi dengan gas yang mempunyai keratan rentas penyerapan neutron yang tinggi di mana gas ini akan bertindakbalas dengan partikel-partikel neutron yang melalui permukaan pengesan untuk menghasilkan isyarat yang dikehendaki. Daripada tindakbalas tersebut, elektron-elektron yang dihasilkan akan

terbebas dan bergerak ke arah anod dan sekaligus memberikan isyarat elektrik yang diperlukan. Rajah 2.9 menunjukkan pengesan PSD 1-dimensi yang digunakan di dalam eksperimen.



Rajah 2.9: Gambaran am bagi pengesan PSD yang digunakan

Gas yang digunakan di dalam pengesan PSD adalah gas Helium ataupun He^{3+} . Ini disebabkan gas Helium mempunyai kadar interaksi tinggi dengan neutron terutamanya neutron monokromat. Selain itu, gas Helium didapati tidak berbahaya kepada manusia sekaligus menjadikannya bersesuaian untuk digunakan sebagai medium utama dalam pengesan PSD. Bagi mendapatkan keputusan yang terbaik, kajian mendapati gas Helium perlu dicampurkan dengan unsur lain (Oed, 2004). Antara campuran yang bersesuaian ialah gas He^{3+} dengan gas argon (Oed, 2004) ataupun gas propana, C_3H_8 dan gas karbon florida CF_4 (Smith, 2002) di mana campuran ini mampu menghasilkan resolusi pengesanan yang lebih baik. Campuran gas Helium dengan gas-gas yang lain akan menyebabkan jarak di antara proton dan triton menjadi semakin kecil, sekaligus akan meningkatkan resolusi pengesanan (Smith, 2002).

Selain itu, pemilihan tekanan gas juga adalah faktor lain yang mempengaruhi resolusi pengesanan. Peningkatan tekanan gas di dalam kebuk akan menyebabkan