

KAJIAN RADIOLOGI ALAM SEKITAR SEMENANJUNG MALAYSIA DAN  
ANGGARAN IMPLIKASI RADIOLOGI MENGGUNAKAN KOD SIMULASI  
MONTE CARLO

MOHAMAD SYAZWAN BIN MOHD SANUSI

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

KAJIAN RADIOLOGI ALAM SEKITAR SEMENANJUNG MALAYSIA DAN  
ANGGARAN IMPLIKASI RADIOLOGI MENGGUNAKAN KOD SIMULASI  
MONTE CARLO

MOHAMAD SYAZWAN BIN MOHD SANUSI

Tesis ini dikemukakan sebagai memenuhi  
syarat penganugerahan ijazah  
Doktor Falsafah

Fakulti Sains  
Universiti Teknologi Malaysia

DISEMBER 2017

Buat isteriku Nurul Najwa dan anakku Kaer Danish,  
Untuk ibuku Zailani, bapaku Mohd Sanusi, ahli keluargaku Syazana, Syafiq, Syahir,  
Fezrie, Idayu, Iman, Inas, Arraf, Ifti, Illi dan Arian  
yang sentiasa mendoakan kejayaan ini dan bagi sokongan serta dorongan dalam  
menyelesaikan kajian dan tesis ini.

## PENGHARGAAN

Dengan Nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji bagi-Nya, serta selawat dan salam kepada junjungan mulia Nabi Muhammad S.A.W. Syukur kehadiran Ilahi dengan limpah kurniaNya, dengan izinNya maka telah selesai penyelidikan dan penulisan tesis ini.

Ribuan ucapan penghargaan dan terima kasih kepada penyelia penyelidikan ini iaitu Prof. Madya Wan Muhammad Saridan, bekas penyelia Prof. Dr. Ahmad Termizi Ramli, dan penyelia bersama Prof. Dr. Muhamad Hisyam Lee, dan Prof. Madya Mohd Nor Said, Dr. Arien Heryanshah, Prof. Dr. Husin Wagiran di atas kerjasama, tunjuk ajar dan dorongan yang diberikan sepanjang tempoh penyelidikan.

Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pihak Lembaga Perlesenan Tenaga Atom, Kementerian Sains, Teknologi, dan Inovasi Malaysia yang menaja penyelidikan melalui kontrak perundingan yang ditadbir oleh Syarikat Uni-Technologies Sdn. Bhd. dan Global Technology and Innovation Management Sdn. Bhd. (GTIM). Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada syarikat GTIM-UTM yang telah menjadi badan pengurusan penyelidikan ini. Seterusnya ucapan terima kasih disampaikan kepada Jabatan Geosains dan Mineral Malaysia, Jabatan Fizik, Fakulti Sains, Lembaga Perlesenan Tenaga Atom dan Agensi Nuklear Malaysia di atas kemudahan yang telah disediakan.

Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada rakan penyelidik dari Fakulti Sains iaitu Dr. Hamman Tukur Gabdo, Dr. Nurruddeen Nasiru Garba, Cik Nor Afifah Basri, En. Hairul, En. Hilmi dan En. Azril. Tidak dilupakan juga pegawai dari Jabatan Mineral dan Geosains Negeri Perak, En. Arshad Mat Arib, En. Abdul Aziz Mohd Noor, Dr. Teng Yu Lin dari Lembaga Perlesenan Tenaga Atom dan En. Joseph Young yang telah banyak membantu semasa tempoh penyelidikan.

## ABSTRAK

Setiap manusia terdedah kepada pelbagai jenis dedahan sinaran mengion dari sumber-sumber semulajadi dan buatan manusia. Penganggaran dos berkesan tahunan yang diterima oleh orang awam akibat dedahan sinaran mengion adalah sesuatu yang diperuntukkan bagi penilaian komprehensif risiko orang awam terhadap kesan-kesan stokastik sinaran, dan bagi memenuhi syarat piawai sistem perlindungan radiologi orang awam yang digariskan oleh suruhanjaya ICRP dan agensi IAEA. Kajian ini telah dilakukan bagi menganggarkan dos berkesan tahunan dan risiko stokastik yang diterima orang awam di Semenanjung Malaysia akibat dedahan sinaran mengion dari sumber keradioaktifan alam sekitar dan antropogenik di Semenanjung Malaysia. Kajian ini telah menggunakan kaedah pengukuran *in-situ* berdasarkan instrumen spektrometer gama, pengesanan sintilasi dan kaedah numerik iaitu simulasi bagi penganggaran kerma dalam udara dan dos organ berdasarkan teknik Monte Carlo MCNP5. Kajian ini mendapati purata dos berkesan tahunan yang diterima oleh orang awam di Semenanjung Malaysia adalah 2.8 mSv (0.01 – 10 mSv). Nilai ini adalah setanding dengan nilai-nilai yang dianggarkan di Amerika Syarikat, 2.9 mSv; United Kingdom, 2.3 mSv; Jerman, 2.1 mSv; dan nilai purata global 2.4 mSv yang dianggarkan oleh jawatankuasa UNSCEAR. Sumber dedahan sinaran yang paling dominan (0.87 mSv) adalah pancaran sinaran  $\gamma$  dari siri radionuklid  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$  dalam kediaman, dan diikuti oleh dedahan sinaran dalaman akibat penyedutan gas  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  dan progeninya (0.86 mSv), dan akibat penelanan siri  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam diet pemakanan (0.59 mSv). Sumbangan dedahan sinaran kosmik pula adalah 0.28 mSv berdasarkan hipsograf beraltitud 0 – 50 m dan peratusan demografi 83% populasi menetap di wilayah persisiran pantai. Sumbangan dedahan sinaran paling rendah (0.18 mSv) adalah sumber sinaran  $\gamma$  daratan dari siri  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam sistem litologi di Semenanjung Malaysia. Dos dedahan sinaran  $\gamma$  daratan yang rendah yang diterima oleh orang awam adalah disebabkan oleh faktor demografi populasi yang majoritinya menetap di wilayah pesisiran pantai iaitu di luar zon igneus plutonik dan vulkanik, selain dos setara organ yang rendah akibat pancaran foton  $\gamma$  dari sumber antropogenik  $^{137}\text{Cs}$  ( $< 0.1 \text{ nSv j}^{-1}$ ). Sumbangan dos setara organ yang rendah dari  $^{137}\text{Cs}$  ini adalah disebabkan oleh impak kecil luruhan nuklear dari ujian senjata nuklear global dan kemalangan nuklear di Chernobyl dan Fukushima dengan keluasan kontaminasi  $^{137}\text{Cs} \sim 312 \text{ Bq m}^{-2}$ . Kajian ini mendapati anggaran risiko kesan stokastik akibat dedahan 2.8 mSv setahun adalah terlalu kecil iaitu kurang daripada 6 kes per 10,000 orang. Nilai purata dos berkesan 2.8 mSv setahun yang diterima oleh orang awam di Semenanjung Malaysia ini diklasifikasikan sebagai dos aras rendah dan normal bagi sumber sinaran mengion. Bagi kes dedahan dos normal, aras rujukan 1–20 mSv setahun dan pengelasan situasi “dedahan sedia ada” dari ICRP adalah terpakai dan relevan bagi tujuan perlindungan radiologi orang awam di Semenanjung Malaysia.

## ABSTRACT

Every human being is exposed to various types of ionising radiation exposures from environment and man-made sources. An estimation of annual effective dose received by public due to ionising radiation exposure is a provision for comprehensive assessment of public risk against radiation stochastic effects, and for fulfillment of standard regulation of radiological protection system outlined by the ICRP commission and IAEA agency. This study had been conducted to estimate the annual effective dose and stochastic risk received by the population in Peninsular Malaysia due to ionising radiation exposure from environmental and anthropogenic radioactivity sources in Peninsular Malaysia. This study used in-situ measurement method based on gamma spectrometry instrument, scintillation detection and numerical method that is simulation for estimations of kerma-in air and organ dose based on MCNP5 Monte Carlo technique. This study found out the average of annual effective dose received by the public in Peninsular Malaysia was 2.8 mSv (0.01 – 10 mSv). This value is comparable with the values estimated in United States of America, 2.9 mSv; United Kingdom, 2.3 mSv; German, 2.1 mSv; and global average value of 2.4 mSv estimated by the UNSCEAR committee. The most dominant radiation exposure source (0.87 mSv) was  $\gamma$  radiation emission from radionuclide series  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  inside the dwelling, and followed by internal radiation exposure due to gas inhalation of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  and their progenies (0.86 mSv), and due to ingestion of series  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in food dietary (0.59 mSv). The contribution of cosmic radiation exposure was 0.28 mSv based on hipsograph of altitude 0 – 50 m and percentage of demography of 83 % of the population settled in coastal region. The lowest contribution of radiation exposure (0.18 mSv) was terrestrial  $\gamma$  radiation source from series of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in lithology system in Peninsular Malaysia. The low dose exposure of terrestrial  $\gamma$  radiation received by the public is due to the demography factor of population which is majorly settled at coastal region that is outside of igneous plutonik and volkanik zone, besides of low organ equivalent dose due to  $\gamma$  photon emission from anthropogenic  $^{137}\text{Cs}$  ( $< 0.1 \text{ nSv h}^{-1}$ ). The contribution of low organ equivalent dose from  $^{137}\text{Cs}$  is due to small impact of nuclear fallout from global nuclear weapon test and nuclear accidents in Chernobyl and Fukushima with  $^{137}\text{Cs}$  contamination area of  $\sim 312 \text{ Bq m}^{-2}$ . This study found out the risk estimation of stochastic effect due to exposure of 2.8 mSv per year was too small that is less than 6 cases out of 10,000 man. The average exposure value of 2.8 mSv per year received by the public in Peninsular Malaysia is classified as low level dose and normal for ionising radiation sources. For normal exposure cases, the reference level of 1 – 20 mSv per year and the classification of situation of “existing exposure” from ICRP is applicable and relevant for the purpose of radiological protection of public in Peninsular Malaysia.

## SENARAI KANDUNGAN

<b>BAB</b>	<b>PERKARA</b>	<b>MUKA SURAT</b>
	<b>PENGAKUAN</b>	ii
	<b>DEDIKASI</b>	iii
	<b>PENGHARGAAN</b>	iv
	<b>ABSTRAK</b>	v
	<b>ABSTRACT</b>	vi
	<b>SENARAI KANDUNGAN</b>	vii
	<b>SENARAI JADUAL</b>	xi
	<b>SENARAI RAJAH</b>	xv
	<b>SENARAI SINGKATAN</b>	xviii
	<b>SENARAI SIMBOL</b>	xx
	<b>SENARAI LAMPIRAN</b>	xxii
<b>1</b>	<b>Pengenalan</b>	<b>1</b>
	1.1 Latar Belakang	1
	1.2 Pernyataan Masalah	5
	1.3 Skop Kajian	9
	1.4 Objektif Kajian	10
	1.5 Kepentingan Kajian	11
	1.6 Susun Atur Bab	12
<b>2</b>	<b>Kajian Kepustakaan</b>	<b>14</b>
	2.1 Pengenalan dan Sejarah Penemuan Sinaran	14
	2.2 Atom, Radionuklid dan Sinaran	15
	2.3 Jenis Sinaran Mengion dan Dedahan Sinaran	18

2.3.1	Sinaran Mengion Secara Langsung	18
2.3.2	Sinaran Mengion Secara Tidak Langsung	20
2.3.3	Dedahan Sinaran Luaran dan Dalaman	22
2.4	Interaksi Sinaran Mengion dengan Jirim	22
2.5	Kuantiti dan Unit Sinaran Mengion	26
2.6	Kesan Kimia dan Biologiikal Sinaran Mengion Pada Manusia	29
2.7	Dedahan Sinaran Mengion Alam Sekitar	34
2.7.1	Sumber Sinaran Kosmik dan Kosmogenik	36
2.7.2	Sumber Daratan dan Radionuklid Primordial	40
2.7.2.1	Sinaran Gama Daratan	41
2.7.2.2	Keradioaktifan dalam Udara, Radon dan Toron	44
2.7.2.3	Keradioaktifan dalam Makanan dan Minuman	47
2.8	Kajian dan Survei Sinaran Mengion dan Keradioaktifan Alam Sekitar di Semenanjung Malaysia	48
2.8.1	Survei Udara dan Eksplorasi Geokimia Berwilayah	48
2.8.2	Kajian Radiologi Alam Sekitar Berwilayah	51
2.9	Kajian Aplikasi dan Penggunaan Kod Pengangkut Foton dan Simulasi Monte Carlo MCNP	55
<b>3</b>	<b>METODOLOGI PENYELIDIKAN</b>	<b>58</b>
3.1	Pengenalan	58
3.2	Kawasan Kajian	59
3.2.1	Demografi dan Strata Sosial	60
3.2.2	Geografi dan Topografi Kawasan Kajian	64
3.2.3	Evolusi Tektonik, Latarbelakang Geologi dan Litologi	67
3.2.4	Pedologi dan Genesis Tanah	74
3.3	Kaedah Pengumpulan Data-Data Kajian	76
3.4	Kaedah Eksperimen Kajian	77
3.4.1	Pemilihan dan Persampelan Titik Survei	77
3.4.2	Survei Sinaran Gama Daratan	78
3.4.3	Penyediaan Sampel dan Analisis Spektrometri Gama	81
3.5	Kaedah Numerik Kajian	84



3.5.1	Simulasi MCNP5 Anggaran Dos-Dos Organ dan Dos Berkesan	84
3.6	Kaedah Penganggaran	97
3.6.1	Penganggaran Dos Sinaran Kosmik	97
3.6.2	Penganggaran Dos Dedahan Dalam Tubuh	98
3.6.2.1	Radon dan Toron	99
3.6.2.2	Siri $^{238}\text{U}$ dan $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ dan $^{137}\text{Cs}$ dalam Makanan dan Minuman	99
3.6.3	Penganggaran Risiko Kejadian dan Mortaliti Kanser	101
3.7	Analisis dan Ujian Pengesahan Statistik Data Kajian	103
3.7.1	Ujian Kenormalan Taburan Gaussian	104
3.7.1.1	Plot <i>Box-Whisker</i>	105
3.7.1.2	Plot Titik dan Histogram	106
3.7.1.3	Plot Q-Q	107
3.7.1.4	Ujian Shapiro-Wilk	107
3.7.1.5	Ujian Kolmogorov-Smirnov	108
3.7.1.6	Ujian Levene	109
3.7.2	Analisis Transformasi Log-Tabii Data	110
3.7.3	Analisis Deskriptif Statistik Data	111
3.7.3.1	Min, Julat dan Ralat Piawai	111
3.7.3.2	Selang Keyakinan Min	112
3.7.3.3	Kepencongan dan Keruncingan	113
3.7.4	Ujian Korelasi Pearson	114
3.7.5	Ujian Hipotesis Statistik	114
3.7.5.1	Ujian Mann-Whitney	115
3.7.5.2	Ujian Analisis Varians (ANOVA)	115
3.7.5.3	Ujian ANOVA Welch	116
3.7.5.4	Ujian <i>Post-Hoc</i> Fisher LSD	117
3.7.5.5	Ujian <i>Post-Hoc</i> Tukey HSD	118
3.7.5.6	Ujian <i>Post-Hoc</i> Games-Howell	118
3.7.6	Analisis dan Plot Kebarangkalian Kumulatif	119
3.7.7	Analisis Interpolasi Gelugur Kuasa Tiga ( <i>Spline</i> )	119
3.8	Pemetaan Data Kajian	120
3.8.1	Pemetaan Isodos Sinaran Gama Daratan	121
3.8.2	Pemetaan Isodos Sinaran Kosmik	122
3.8.3	Pemetaan Iso-kepekatan Siri $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ dan $^{40}\text{K}$	124

<b>4</b>	<b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</b>	<b>125</b>
4.1	Pengenalan	125
4.2	Sinaran Gama Daratan	125
4.2.1	Statistik Deskriptif Kadar Dos Sinar Gama Daratan	126
4.2.2	Pengaruh Evolusi Tektonik dan Geologi	132
4.2.3	Pengaruh Genesis Tanah dan Keradioaktifan $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ dalam Tanah	144
4.2.4	Keradioaktifan Radiocesium $^{137}\text{Cs}$ dalam Tanah	157
4.2.5	Anggaran Dos Organ dan Dos Berkesan akibat keradioaktifan tanah	160
4.2.5	Isodos Sinaran Gama Daratan	170
4.2.6	Dos Demografi dan Dos Berkesan Berpemberat Populasi	172
4.3	Sinaran Gama Dalam Bangunan	174
4.4	Sinaran Kosmik	183
4.4.1	Statistik Deskriptif dan Isodos Sinaran Kosmik	183
4.4.2	Pengaruh Demografi Hipsograf	185
4.5	Dedahan Radon dan Toron	188
4.6	Dedahan Akibat Keradioaktifan Dalam Makanan dan Minuman	195
4.7	Dos Berkesan Keseluruhan dan Anggaran Risiko Kejadian dan Kematian Kanser	200
<b>5</b>	<b>KESIMPULAN DAN CADANGAN</b>	<b>209</b>
5.1	Kesimpulan Hasil Kajian	209
5.2	Cadangan	211
	<b>RUJUKAN</b>	<b>213</b>
	Lampiran A - D	242 – 256

## SENARAI JADUAL

JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Jenis-jenis teknik pengesanan dan pengukuran sinaran, konsep dan contoh-contoh instrumen	26
2.2	Nilai faktor pemberat sinaran mengion <i>WR</i>	29
2.3	Nilai faktor pemberat bagi tisu dan organ manusia <i>WT</i>	29
2.4	Kesan-kesan deterministik sinaran mengion berdasarkan dos penyinaran (Gy) seluruh tubuh	33
2.5	Peringkat-peringkat sindrom sinaran akut	33
2.6	Purata atau julat kepekatan keradioaktifan unsur radionuklid semulajadi dalam tanah dan pelbagai jenis batuan	43
3.1	Maklumat asas demografi Semenanjung Malaysia	61
3.2	Taburan strata sosial populasi Semenanjung Malaysia	63
3.3	Anggaran keluasan latarbelakang geologi di Semenanjung Malaysia berdasarkan usia pembentukan.	72
3.4	Taburan dan ciri-ciri utama batuan igneus berdasarkan blok dan teren tektonik.	73
3.5	Profil kumpulan dan siri-siri tanah di Semenanjung Malaysia	76
3.6	Nilai-nilai pemalar risiko nominal (kes-kes per 10,000 orang populasi bagi dedahan sebanyak 1 Sv per tahun, sepanjang hayat) bagi kejadian dan mortaliti kanser organ-organ utama.	102
4.1	Statistik deskriptif kadar dos sinaran gama daratan negeri-negeri di Semenanjung Malaysia	127

4.2	Perbandingan dos sinaran gama daratan di kawasan HNBR, negara-negara atau lokasi lain di seluruh dunia	131
4.3	Statistik deskriptif kadar dos sinaran gama daratan berdasarkan pengaruh blok dan lengkung tektonik di Semenanjung Malaysia	133
4.4	Hasil analisis ujian kenormalan Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, kepencongan ( <i>skewness</i> ) dan keruncingan ( <i>kurtosis</i> ) data kadar dos berdasarkan blok dan lengkung tektonik.	133
4.5	Hasil ujian Mann-Whitney bagi pengesahan statistik hubungan kadar dos dan pengaruh tektonik	135
4.6	Keputusan ujian ANOVA- <i>F</i> , ujian homogeneiti varians Levene dan ANOVA-Welch bagi pengesahan statistik hubungan kadar dos dan pengaruh tektonik.	136
4.7	Statistik deskriptif kadar dos sinaran gama daratan berdasarkan jenis batuan dan latarbelakang geologi di Semenanjung Malaysia.	137
4.8	Hasil analisis ujian kenormalan Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, kepencongan ( <i>skewness</i> ) dan keruncingan ( <i>kurtosis</i> ) data kadar dos berdasarkan jenis batuan dan latarbelakang geologi	140
4.9	Hasil ujian Mann-Whitney bagi pengesahan statistik hubungan kadar dos jenis batuan dan latarbelakang geologi	142
4.10	Keputusan ujian ANOVA- <i>F</i> , ujian homogeneiti varians Levene dan ANOVA-Welch bagi ujian kesahihan statistik hubungan kadar dos dengan jenis batuan dan latarbelakang geologi	142
4.11	Keputusan ujian <i>post-hoc</i> bagi ujian kesahihan statistik hubungan kadar dos dengan jenis batuan dan latarbelakang geologi.	143
4.12	Statistik deskriptif kepekatan keradioaktifan siri-siri $^{238}\text{U}$ dan $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ dalam jenis kumpulan tanah di Semenanjung Malaysia dan perbandingannya secara global.	145
4.13	Keputusan ujian ANOVA-Welch bagi ujian kesahihan statistik hubungan kepekatan $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ dengan jenis tanah	148
4.14	Keputusan ujian <i>post-hoc</i> bagi ujian kesahihan statistik hubungan hubungan kepekatan $^{238}\text{U}$ dengan jenis huraian tanah	149

4.15	Keputusan ujian <i>post-hoc</i> bagi ujian kesahihan statistik hubungan hubungan kepekatan $^{232}\text{Th}$ dengan jenis huraian tanah	149
4.16	Keputusan ujian <i>post-hoc</i> bagi ujian kesahihan statistik hubungan hubungan kepekatan 40K dengan jenis huraian tanah	150
4.17	Wilayah prospek Th berdasarkan lokasi dan kepekatan min dalam tanah dan batuan.	157
4.18	Kepekatan spesifik radionuklid $^{137}\text{Cs}$ dalam tanah di seluruh Semenanjung Malaysia	158
4.19	Perbandingan min (julat) kepekatan spesifik radionuklid $^{137}\text{Cs}$ dalam tanah berdasarkan kajian lepas dan di negara-negara di wilayah benua Asia.	159
4.20	Nilai DCFs bagi dos terserap atau dos setara bagi organ spesifik $T$	163
4.21	Perbandingan nilai-nilai DCFs dos setara antara kajian ini dan kajian-kajian lepas	164
4.22	Pemalar DCFs bagi dos setara berpemberat organ bagi organ spesifik $T$ dan DCF dos berkesan	165
4.23	Perbandingan pemalar-pemalar DCFs dos berkesan antara kajian ini dan kajian-kajian lepas, bagi siri-siri $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ dan $^{137}\text{Cs}$ dan penggunaan kod-kod pengangkut Monte Carlo yang berlainan	166
4.24	Anggaran kadar dos terserap atau dos setara yang diterima orang awam akibat dedahan sinaran gama daratan dari siri-siri $^{238}\text{U}$ dan $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ dan $^{137}\text{Cs}$ dalam tanah di Semenanjung Malaysia	168
4.25	Anggaran kadar dos setara organ permberat dan dos berkesan yang diterima orang awam akibat dedahan sinaran gama daratan dari siri-siri $^{238}\text{U}$ dan $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ dan $^{137}\text{Cs}$ dalam tanah di Semenanjung Malaysia	167
4.26	Purata kepekatan keradioaktifan siri $^{238}\text{U}$ dan $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ dalam bahan binaan dalam bangunan atau rumah.	175
4.27	Kadar dos dari sinaran gama daratan yang diukur dalam rumah di Semenanjung Malaysia	176
4.28	Nilai DCFs bagi dos terserap atau dos setara bagi organ spesifik $T$ akibat dedahan pancaran sinar gama dalam bilik konkrit	177

4.29	Faktor penukaran DCFs dos terserap dalam udara di dalam bilik akibat pancaran sinaran gama daripada radionuklid dalam bahan binaan (konkrit)	178
4.30	DCFs dos setara berpemberat organ bagi organ spesifik $T$ akibat dedahan pancaran sinar gama dalam bilik dari radionuklid pemancar $\gamma$ dalam bahan binaan	181
4.31	Kadar dos setara berpemberat organ dan dos berkesan dalam rumah dan bangunan akibat dedahan sinaran $\gamma$ dalam bahan binaan rumah dan bangunan	182
4.32	Statistik deskriptif kadar dos berkesan sinaran kosmik berdasarkan altitud di Semenanjung Malaysia	183
4.33	Statistik deskriptif kadar dos berkesan berpemberat populasi akibat sinaran kosmik di Semenanjung Malaysia	186
4.34	Purata kepekatan gas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) dan kepekatan ECC toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) dan anak-anak reputannya berdasarkan jenis-jenis bangunan dan rumah di Semenanjung Malaysia	189
4.35	Min kepekatan gas dan EEC bagi radon $^{222}\text{Rn}$ dan kepekatan EEC toron $^{220}\text{Rn}$ berdasarkan blok-blok tektonik di Semenanjung Malaysia	191
4.36	Dos berkesan tahunan yang diterima oleh orang awam di Semenanjung Malaysia daripada penyedutan gas $^{222}\text{Rn}$ dan $^{220}\text{Rn}$ dan progeni-progeninya dalam udara.	195
4.37	Jumlah kepekatan keradioaktifan siri $^{238}\text{U}$ and $^{232}\text{Th}$ , dan $^{137}\text{Cs}$ dalam sumber makanan utama dan minuman, kadar pengambilan pelbagai jenis makanan dan minuman ( <i>AI, annual intake</i> ) oleh populasi orang dewasa di Semenanjung Malaysia dan dos berkesan tahunan.	197
4.38	Purata dos berkesan tahunan akibat dedahan sinaran mengion dari sumber alam sekitar di Semenanjung Malaysia.	201
4.39	Risiko nominal kejadian dan mortaliti kanser organ-organ utama yang mungkin dihadapi oleh populasi di Semenanjung Malaysia (dos berkesan tahunan 2.8 mSv)	206
4.40	Risiko nominal kejadian dan mortaliti kanser bagi organ-organ utama yang mungkin dihadapi oleh populasi di Semenanjung Malaysia	207

## SENARAI RAJAH

RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Dominasi mekanisma interaksi foton berdasarkan nombor atom ( $Z$ ) dan tenaga foton (MeV)	24
2.2	Purata dos berkesan tahunan akibat sinaran semulajadi di beberapa negara-negara luar	34
2.3	Purata dos tahunan dedahan sinaran mengion yang diterima manusia seluruh dunia daripada pelbagai sumber sinaran mengion	35
2.4	Komponen, komposisi dan hasil interaksi sinar kosmik	38
2.5	Survei udara dan tinjauan eksplorasi mineral radioaktif, dan taburan aras sinaran gama daratan di Semenanjung Malaysia	50
3.1	Carta alir kaedah dan metodologi yang digunakan dalam kajian.	59
3.2	Peta taburan kepadatan populasi Semenanjung Malaysia	62
3.3	Peta permukaan bumi dan geografi Semenanjung Malaysia	65
3.4	Blok-blok tektonik Asia Tenggara	68
3.5	Jalur batolit dan pluton granit di Semenanjung Malaysia	10
3.6	Peta taburan geologi Semenanjung Malaysia berdasarkan blok dan teren tektonik	71
3.7	Peta taburan tanah di Semenanjung Malaysia berdasarkan jenis batuan induk dan genesis tanah	75
3.8	Graf kecerunan nilai $E$ lawan $E$ , berdasarkan analisis kecekapan pengesanan HPGe menggunakan sampel piawai IAEA S-16	83

3.9	Ilustrasi lakaran awal penyinaran bagi anggaran kadar dos terserap dalam udara bebas atau kerma ( <i>kerma in free-air</i> ) per unit jisim aktiviti foton $\gamma$ (tanah)	86
3.10	Geometri bagi anggaran kadar dos terserap dalam udara atau kerma dalam udara bebas menggunakan Vised 19K	87
3.11	Sel-sel geometri bagi fantom MIRD-5 menggunakan Vised 19K (posisi anterior-posterior).	90
3.12	Geometri sel bagi fantom MIRD-5 menggunakan Vised 19K (posisi lateral)	91
3.13	Geometri penyinaran akibat keradioaktifan dalam tanah bagi anggaran kadar dos terserap dalam organ fantom MIRD-5 menggunakan Vised 19K	92
3.14	Geometri penyinaran akibat keradioaktifan dalam bahan binaan bangunan bagi anggaran kadar dos terserap dalam organ fantom MIRD-5 menggunakan Vised 19K	93
3.15	Carta alir analisis dan ujian statistik	103
3.16	Plot <i>box-whisker</i> data kajian.	105
3.17	Contoh ilustrasi plot titik dan histogram data	106
4.1	Taburan lokasi survei sinaran gama daratan di Semenanjung Malaysia	126
4.2	Plot-plot kuartil ( <i>boxplot-whisker</i> ) kadar dos sinaran gama daratan bagi setiap negeri.	129
4.3	Histogram kadar dos sinaran gama daratan di Semenanjung Malaysia	130
4.4	Plot Q-Q kadar dos berdasarkan blok dan lengkung tektonik	134
4.5	Plot Q-Q kadar dos berdasarkan jenis batuan dan latarbelakang geologi	140
4.6	Plot-plot kuartil ( <i>boxplot-whisker</i> ) kadar dos berdasarkan jenis batuan dan latarbelakang geologi	141
4.7	Peta iso-kepekatan $^{238}\text{U}$ dalam tanah di Semenanjung Malaysia	151
4.8	Peta iso-kepekatan $^{232}\text{Th}$ dalam tanah di Semenanjung Malaysia	152
4.9	Peta iso-kepekatan $^{40}\text{K}$ dalam tanah di Semenanjung	153



	Malaysia	
4.10	Plot-plot kebarangkalian kumulatif data kepekatan $^{238}\text{U}$ dalam tanah	154
4.11	Plot-plot kebarangkalian kumulatif data kepekatan $^{232}\text{Th}$ dalam tanah	155
4.12	Plot-plot kebarangkalian kumulatif data kepekatan $^{40}\text{K}$ dalam tanah	155
4.13	Plot pemalar DCCs bagi organ melawan tenaga foton gama	161
4.14	Plot pemalar DCCs bagi organ melawan tenaga foton gama	161
4.15	Plot pemalar DCCs bagi organ melawan tenaga foton gama	162
4.16	Peta isodos sinaran gama daratan Semenanjung Malaysia	171
4.17	Taburan dos demografi akibat dedahan sinaran gama daratan di Semenanjung Malaysia	173
4.18	Peta isodos sinar kosmik Semenanjung Malaysia	185
4.19	Peratusan purata dos berkesan tahunan di Semenanjung Malaysia	202
4.20	Perbandingan purata dos berkesan tahunan di negara lain	203

**SENARAI SINGKATAN**

AELB	- <i>Atomic Energy Licensing Board</i> Analisis Varians
ANOVA	- <i>Analysis of Variance</i> Analisis Varians
AMU	- <i>Atomic Mass Unit</i> Unit Jisim Atom
BEIR	- <i>Biological Effect of Ionizing Radiation</i> Kesan Biologi Sinaran Mengion
EEC	- <i>Equilibrium Equivalent Concentration</i> Kepekatan Kesetaran Keseimbangan
EPU	- <i>Economic Planning Unit</i> Unit Perancang Ekonomi
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i> Agensi Perlindungan Alam Sekitar
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization</i> Pertubuhan Sedunia Makanan dan Pertanian Bangsa-Bangsa Bersatu
GIS	- <i>Global Information System</i> Sistem Maklumat Global
HNBR	<i>High Natural Background Radiation</i> Sinaran Latarbelakang Semulajadi Tinggi
IAEA	- <i>International Atomic Energy Agency</i> Agensi Tenaga Atom Antarabangsa
ICRP	- <i>International Commission on Radiological Protection</i> Suruhanjaya Antarabangsa untuk Perlindungan Radiologi
LET	- <i>Linear Energy Transfer</i> Pemindahan Tenaga Linear

LSD	- <i>Least Significant Difference</i> Perbezaan Signifikan Terkecil
LPTA	- Lembaga Perlesenan Tenaga Atom
MDC	- <i>Minimum Detectable Activity</i> Had Pengesanan Minimum Keaktifan
MNPC	- <i>Malaysia Nuclear Power Corporation</i> Perbadanan Kuasa Nuklear Malaysia
NCRP	- <i>National Council on Radiation Protection and Measurements</i> Dewan Nasional Pengukuran dan Perlindungan Sinaran
OECD-NEA	- <i>Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency</i> Pertubuhan Kerjasama Ekonomi dan Pembangunan – Agensi Tenaga Nuklear
ppm	- <i>Part per Million</i> Bahagian per juta
SS	- <i>Sum of Square</i> Hasil tambah kuasa dua
SSE	- <i>Sum of Square of Error</i> Hasil tambah kuasa dua ralat
SPSS	- <i>Statistical Package for Social Science</i> Pakej Statistik untuk Sosial Sains
STP	- <i>Standard Temperature and Pressure</i> Suhu dan Tekanan Piawai
TENORM	- <i>Technologically Enhances Naturally Occurring Radioactive Material</i> Bahan radioaktif tabii yang dipertingkatkan melalui teknologi
UNSCEAR	- <i>United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation</i> Jawatankuasa Saintifik Pertubuhan Bangsa Bangsa Bersatu bagi Kesan Sinaran Atom
USDA	- <i>United States Department of Agriculture</i> Jabatan Pertanian Amerika Syarikat
WHO	<i>World Health Organization</i> Pertubuhan Kesihatan Dunia

## SENARAI SIMBOL

$A$	-	Nombor jisim
$A_t$	-	Keaktifan radionuklid pada masa $t$
$C_{Ei}$	-	Kepekatan keradioaktifan radinuklid $i$ daripada tenaga $E$
$C_{Rn220}$	-	Kepekatan gas toron
$C_{Rn222}$	-	Kepekatan gas radon
$df$	-	Darjah kebebasan
$D$	-	Dos
$D_i$	-	Statistik Kolgomorov-Smirnov
$E$	-	Tenaga
$F$	-	Ujian F
$F_k$	-	Faktor masa bekerja
$G$	-	Latar belakang geologi
$H$	-	Dos setara
$H_a$	-	Hipotesis alternatif
$H_o$	-	Hipotesis nul
$H_T$	-	Dos setara tisu atau organ
$M$	-	Jisim sampel
$n$	-	Jumlah data
$N_\beta$	-	Bilangan bersih beta
$N_A$	-	Nombor Avogadro
$N_o$	-	Jumlah radionuklid asal
$N_t$	-	Jumlah radionuklid yang mereput pada masa $t$
$p$	-	Aras signifikan
$P_\gamma$	-	Jumlah sinar gama per transformasi nukleus radionuklid
$Q$	-	Tenaga yang dibebaskan akibat proses reputan
$R$	-	Statistik korelasi Pearsons

$T$	-	Organ atau tisu
$t$	-	Masa
$t_{1/2}$	-	Tempoh setengah hayat
$V$	-	Matriks varians-kovarians
$w$	-	Statistik Shapiro-Wilk
$W_R$	-	Faktor pemberat sinaran
$W_T$	-	Faktor pemberat tisu
$X$	-	Nukleus induk yang mengalami reputan
$Y$	-	Nukleus anak hasil reputan
$Z$	-	Nombor atom
$^{232}\text{Th}$	-	Torium - 232
$^{238}\text{U}$	-	Uranium - 238
$^{40}\text{K}$	-	Kalium - 40
$^{137}\text{Cs}$	-	Cesium - 137
$\alpha$	-	Zarah alfa
$\alpha$	-	Aras signifikan
$\alpha_3$	-	Pekali kepencongan
$\alpha_4$	-	Pekali keruncingan
$\beta$	-	Zarah beta
$\epsilon$	-	Kecekapan tenaga spektrometer gama
$\lambda$	-	Pemalar reputan
$\sigma$	-	Sisihan piawai
$\gamma$	-	Sinar gamma
$\mu$	-	Min

**SENARAI LAMPIRAN**

<b>LAMPIRAN</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
A	Senarai Penerbitan Penulis	242
B	Reputan Siri $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , dan $^{232}\text{Th}$	244
C	Kod simulasi Monte Carlo MCNP5 bagi anggaran dos terserap organ	247
D	Contoh hasil keputusan (output) simulasi MCNP5 bagi kes anggaran kerma dalam udara	253

## **BAB 1**

### **PENGENALAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Setiap manusia terdedah kepada pelbagai jenis sumber sinaran mengion dari sinaran semulajadi (IAEA, 1989) dan buatan manusia (Grasty dan LaMarre, 2004). Dedahan sinaran mengion semulajadi yang diterima manusia (UNSCEAR, 2000; Achola *et al.*, 2012) dan merupakan sinaran yang berterusan (Jabbar *et al.*, 2008) serta tidak dapat dielakkan (Kannan *et al.*, 2002). Dos tahunan yang diterima manusia akibat dedahan sinaran mengion semulajadi secara puratanya bernilai 2.4 mSv (UNSCEAR, 2000). Dedahan dos sinaran yang diterima manusia boleh berlaku melalui dua keadaan iaitu melalui dedahan dalaman (64 %) dan dedahan luaran (36 %) (UNSCEAR, 2000; ICRP 103, 2007). Sumbangan dedahan dos sinaran mengion semulajadi yang diterima manusia didominasi oleh dua sumber utama iaitu dari sinar kosmik dari angkasaraya dan sinaran mengion dari pemancar sinaran atau radionuklid primordial (WHO, 1961) dari tanah, bahan binaan, rumah, batuan, air, tumbuh-tumbuhan, fauna dan udara (UNSCEAR, 2000; Khoshbinfar dan Moghaddam, 2010; ICRU, 2011).

Survei sinaran mengion semulajadi telah banyak dilakukan di banyak negara di seluruh dunia bagi tujuan mendapatkan data dasar status keradioaktifan dan sinaran mengion di alam sekitar, seperti di Cyprus (Tzortzis, 2003), Austria (Wallova *et al.*, 2012), Nigeria (Jibiri, 2007), Brunei (Lai *et al.*, 1999), Oman (Goddard, 2002), Hong Kong (Tso dan Li, 1992), Switzerland (Buchli dan Burkart, 1989), Costa Rica (Mora *et al.*, 2007), Syria (Aissa dan Jubeli, 1997), Sweden (Kock dan Samuelsson,

2011), Rusia (Ramzaev *et al.*, 2006), Mesir (Ibrahim *et al.*, 1993), Lebanon (Samad *et al.*, 2013), Pakistan (Tufail *et al.*, 2006), Brazil (Yoshimura *et al.*, 2004), dan Spain (Quindos *et al.*, 1993). Terdapat beberapa lokasi yang telah dikenal pasti mempunyai bacaan kadar dos sinaran semulajadi yang tinggi ialah di Ramsar, Iran – 105, 000 nGy j<sup>-1</sup>; di Pantai Guarapari, Brazil – 90, 000 nGy j<sup>-1</sup> di wilayah geologi batuan vulkanik di Barat Daya Perancis – 10, 000 nGy j<sup>-1</sup>; di lokasi pemineralan bijih timah dan mineral nadir bumi di Sichuan, China – 9,140 nGy j<sup>-1</sup>; di wilayah batuan vulkanik (Era Oligocene-Miocene) di wilayah tengah Big Baku dan Bandar Sumgayit di Azerbaijan – 8770 nGy j<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 2000; 2008); kawasan deposit mineral berat (monazit) di Erasama dan Chhatrapur di persisiran pantai Orissa, India – 5000 nGy j<sup>-1</sup> (Mohanty, *et al.*, 2004); di kawasan pendedapan monazite Chavra di pesisir pantai Kerala, India – 3767 nGy j<sup>-1</sup> (Ramasamy *et al.*, 2013), dan di San Vincente, Philippines – 1558 nGy j<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 2000; 2008).

Dos akibat dedahan sinaran mengion dari alam sekitar atau dos aras rendah (dedahan di bawah 100 mSv atau 100 mGy daripada sinaran pemindahan tenaga linear, LET yang diterima melalui penyinaran secara sekaligus atau terkumpul secara tahunan) (ICRP 103, 2007) berpotensi untuk memberikan impak kepada kesihatan radiologi manusia (UNSCEAR, 2000). Jumlah dos sinaran yang rendah di bawah 100 mSv yang diterima oleh setiap individu, masih dianggap mempunyai kebarangkalian risiko untuk menyebabkan mudarat dan kesan stokastik sinaran seperti penyakit-penyakit kanser dan keturunan akibat tindak balas kimia dan mutasi sel-sel somatik dan sel-sel reproduktif dalam tubuh manusia (BEIR IV, 2006; ICRP 103, 2007). Dalam sistem praktikal perlindungan sinaran, model sambutan-dos (*dose-response model*) yang digunapakai oleh Suruhanjaya Antarabangsa Perlindungan Sinaran (ICRP) dan Jawatankuasa Saintifik Pertubuhan Bangsa-Bangsa Bersatu bagi Kesan Sinaran Atom (UNSCEAR) adalah model “*linear-non-threshold (LNT)*”. Berdasarkan model ini, pada aras dos di bawah 100 mSv, setiap peningkatan magnitud dos secara langsung akan menghasilkan satu peningkatan kebarangkalian risiko kejadian penyakit kanser atau keturunan disebabkan oleh sinaran mengion (BEIR IV, 2006; ICRP 103, 2007).



Selain itu, kajian penilaian impak radiologi alam sekitar, survei sinaran gama daratan dan keradioaktifan di alam sekitar merupakan kajian dasar yang penting (Fritz *et al.*, 2015; Engelbrecht, 2012; Kucukomeroglu *et al.*, 2012) untuk mengemukakan data saintifik aras keradioaktifan dan sinaran semulajadi bagi sesuatu lokasi atau wilayah (Ramli *et al.*, 1997; 2003; UNSCEAR 2000; 2008). Penilaian aras keradioaktifan dan sinaran semulajadi penting (Mandić dan Dragović, 2010) bagi penilaian menyeluruh implikasi radiologi kepada orang awam dan alam sekitar (Reddy *et al.*, 2003) sekiranya berlaku kemalangan nuklear (Quindos *et al.*, 1991), luruhan nuklear global (Pálsson *et al.*, 2013; Hamzah *et al.*, 2012; Ahmad *et al.*, 2010) dan pencemaran atau pelepasan sumber-sumber radioaktif daripada industri perlombongan nadir bumi, TENORM dan lain-lain (Merdanoğlu dan Altınsoy, 2006; Ateba *et al.*, 2010).

Dalam persediaan negara memasuki era nuklear seperti yang diramalkan oleh Perbadanan Kuasa Nuklear Malaysia pada tahun 2031 (MNPC) (Utusan 2017), iaitu 10 tahun melangkaui tahun jangkaan (2021) yang dibuat oleh pihak OECD-NEA (2014) pada masa lalu, data dasar mengenai aras keradioaktifan dan sinaran mengion adalah sesuatu yang diperlukan bagi (Quindos *et al.*, 1991; Saito *et al.*, 2012; Fritz *et al.*, 2015) bagi memenuhi syarat penilaian impak radiologi berdasarkan model sebaran radionuklid dan luruhan nuklear seperti yang telah digariskan oleh ICRP (*International Commission for Radiological Protection*) (ICRP 43, 1985), IAEA (*International Atomic Energy Agency*) dan LPTA (Lembaga Perlesenan Tenaga Atom Malaysia) (IAEA, 2003; AELB, 2011). Dalam keadaan operasi normal, data asas alam sekitar penting untuk kawalan berkanun perlepasan atau sebaran radionuklid dari operasi penjanaan tenaga nuklear (Fritz *et al.*, 2015). Manakala dalam kes berlakunya perlepasan atau kebocoran radionuklid, data pemantauan akan mengemukakan jawapan kepada persoalan sama ada keabnormalan aras keradioaktifan atau sinaran berlaku (Engelbrecht, 2012).

Selain itu, pendokumentasian data dasar aras sinaran dan keradioaktifan alam sekitar sebelum pembinaan atau sebelum operasi janakuasa nuklear adalah dititikberatkan dan merupakan salah satu kriteria yang telah disenaraikan oleh IAEA dalam panduan pemilihan lokasi reaktor janakuasa nuklear (IAEA, 1963) dan merupakan saranan utama dalam pemantauan rutin bagi perlindungan sinaran orang

awam oleh ICRP (ICRP 43, 1985). Dalam simposium IAEA yang telah diadakan di Bombay pada Mac 1963, suatu jaringan pemantauan sinaran latarbelakang perlu dilakukan sebelum dan semasa operasi reaktor janakuasa nuklear (IAEA, 1963).

Pemantauan ini akan membolehkan pemetaan sinaran latarbelakang dilakukan dengan mengambil kira sumber-sumber sinaran daripada radionuklid semulajadi dan antropogenik  $^{137}\text{Cs}$  (Fritz *et al.*, 2015). Pemetaan aras sinaran dan keradioaktifan ini juga penting dalam urusan siaraya kerajaan bagi menyakinkan orang ramai sekiranya isu-isu mengenai jaminan keselamatan orang awam dan sistem ekologi terhadap bahaya penggunaan bahan nuklear khususnya dari reaktor janakuasa nuklear dibangkitkan (Menoux *et al.*, 1963; Ramli, 2007).

Selain daripada mengemukakan data survei aras keradioaktifan dan sinaran mengion alam sekitar, kajian sebegini juga secara tidak langsung dapat mengemukakan data preliminari sumber bahan bakar nuklear yang berpotensi di Semenanjung Malaysia. Secara umumnya, penjanaan semasa tenaga elektrik di Semenanjung Malaysia bergantung pada sumber gas asli dan arang batu, iaitu sebanyak 87.4% (Malaysia Energy Commission, 2014), diikuti oleh sumber hidro sebanyak 8.7%, selebihnya iaitu 4% adalah daripada sumber bahan bakar minyak, biomas, solar dan lain-lain (Malaysia Energy Commission, 2014).

Berdasarkan kadar penggunaan semasa dan kadar pengeluaran kasar gas asli, bekalan gas asli negara dijangka dapat bertahan untuk 24 tahun sahaja lagi sekiranya lapangan gas asli yang baru tidak ditemui (Abdul Rahim *et al.*, 2012). Manakala, kadar semasa penggunaan tahunan arang batu sebanyak 23, 899, 128 ton metrik per tahun dan rizab bekalan pengeluaran tempatan arang batu adalah 2, 893, 962 ton metrik (pada tahun 2014) telah memaksa kerajaan mengimport sebahagian besar bekalan arang batu daripada negara luar seperti Indonesia, Australia, Afrika Selatan dan China (Malaysia Energy Commission, 2014). Masalah utama penggunaan sumber import primer ini adalah jaminan bekalan yang mampan, yang mana harga sumber arang batu bergantung sepenuhnya pada pengeksport sumber bahan bakar ini dan faktor kekurangan bekalan akibat permintaan global yang semakin tinggi setiap tahun (Basri *et al.*, 2015).

Dengan kadar tahunan penggunaan elektrik yang semakin meningkat, faktor perubahan iklim, keperluan kepada jaminan bekalan tenaga jangka masa panjang, keperluan mempelbagaikan tenaga campuran, dan bekalan bahan bakar fosil yang semakin berkurangan, dalam Rancangan Malaysia ke-10, kerajaan telah menyatakan kesediaan negara untuk menggunakan tenaga nuklear sebagai sumber alternatif bagi penjanaan tenaga di Malaysia (EPU, 2014) dengan unit pertama reaktor janakuasa nuklear yang dicadangkan di Semenanjung Malaysia adalah berkapasiti 2 GWe (OECD-NEA, 2014).

Dengan usaha dan kajian-kajian yang sedang giat dijalankan bagi persediaan negara memasuki era tenaga nuklear pada tahun 2031, isu bekalan bahan bakar nuklear juga telah dibangkitkan bagi memastikan jaminan bekalan jangka panjang sumber bahan bakar nuklear untuk reaktor jenis Kitaran Sepenuhnya Nuklid Pembelahan U atau Th (*Fully Cycle Reactor of fissile nuclides*). Bagi tujuan eksplorasi sumber U dan Th, data awalan kajian ini boleh memberikan maklumat yang signifikan terutamanya untuk tujuan penilaian ketersediaan sumber bahan api nuklear U dan Th sebagai sumber tenaga jangka panjang kepada negara (Sanusi *et al.*, 2016).

## 1.2 Pernyataan Masalah

Untuk mematuhi syarat utama piawai keselamatan yang ditetapkan oleh Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA), dalam persediaan memperkenalkan reaktor janakuasa nuklear (NPP) negara yang pertama, maklumat asas atau data dasar keradioaktifan di alam sekitar sesuatu kawasan adalah perlu bagi membolehkan penilaian impak radiologi (Fritz *et al.*, 2015) terhadap orang awam dan alam sekitar akibat pencemaran masa hadapan dari perlepasan atau kebocoran radionuklid antropogenik daripada operasi NPP atau kemalangan nuklear (Köteles, 1980; IAEA, 2016). Maklumat asas dan data dasar ini perlulah dapat dirujuk dalam program rutin pemantauan alam sekitar pada fasa sebelum operasi dilakukan bagi menyediakan data dasar aras keradioaktifan dan sinaran di alam sekitar yang diperlukan bagi tujuan pemantauan selepas fasa nyahtauliah (*decommissioning*) dan pasca operasi

(*post-operation*) dan untuk persediaan kecemasan dan pemantauan kecemasan semasa kemalangan nuklear (ICRP 43, 1985).

Dengan kemungkinan pembinaan reaktor janakuasa nuklear pertama di Malaysia dalam tahun 2031 (Utusan, 2017) dan kemungkinan beberapa lagi selepas itu, maka kajian menyeluruh yang melibatkan penyediaan data dasar keradioaktifan, sinaran mengion (Engelbrecht, 2012), anggaran dos berkesan tahunan terhadap populasi dan penilaian impak kesihatan radiologi kepada orang awam di Semenanjung Malaysia perlulah dilaksanakan. Ini diperlukan untuk memenuhi keperluan standard keselamatan IAEA dan LPTA Malaysia untuk loji kuasa nuklear (ICRP 43, 1985; IAEA, 2003; AELB, 2011). Ini adalah bertujuan untuk memastikan perlindungan yang mencukupi terhadap populasi dan alam sekitar daripada kesan sinaran mengion yang mungkin dihasilkan dari loji kuasa nuklear (Engelbrecht, 2012).

Berikutan kepada penemuan risiko kesihatan pada dos aras yang rendah, terutamanya kesan stokastik (kesan sinaran tertangguh) iaitu kejadian kanser, dedahan kepada sinaran mengion pada dos aras rendah iaitu sinaran dari alam sekitar telah menarik perhatian pada peringkat global (ICRP 103, 2007). Dalam perancangan dan pengurusan kesihatan awam, ia diperlukan untuk menilai status dedahan sinaran yang diterima oleh orang awam, untuk membolehkan dan memudahkan pelaksanaan langkah perlindungan radiologi terhadap kesan stokastik. Selain itu, untuk mematuhi sistem perlindungan radiologi manusia yang terkini (ICRP 103 2007), adalah wajar untuk mengkaji semula sumber dedahan sinaran mengion semulajadi kepada orang awam seperti, situasi dedahan sedia ada (*existing exposure situation*) dan untuk mewujudkan langkah-langkah perlindungan yang sesuai seperti mengadakan kekangan atau menetapkan aras rujukan (*constraint or reference level*) (IAEA, 2014).

Beberapa survei sinaran mengion di alam sekitar dan kajian radiologi di alam sekitar yang telah dilakukan di Semenanjung Malaysia, kebanyakannya adalah bersifat kajian kewilayahan (*regional study*) dan setempat (Ramli dan Jasman, 1995; Ramli *et al.*, 1997; 2001; 2003; 2005a; 2005b; Saleh 2013; Abdul Rahman *et al.*, 2014; Al-Mayahi *et al.*, 2012a; 2012b; 2013; Abdul Rahman *et al.*, 2004; Alias *et al.*, 2004; Omar *et al.*, 20; Theng dan Mohamed, 2005; Wo dan Mohamad, 2007; Omar

dan Laili, 2008 Ismail *et al.*, 2005; Mohamed *et al.*, 2006; Yew *et al.*, 2006; Omar *et al.*, 2007; Alias *et al.*, 2008; Saat *et al.*, 2010; Sabuti *et al.*, 2010; Hamzah *et al.*, 2011; Hamzah *et al.*, 2012; Afiqah *et al.*, 2012). Kajian ini menilai taburan dos berkesan tahunan yang diterima oleh orang awam akibat dedahan kepada sinaran mengion luaran dan dalaman di seluruh Semenanjung Malaysia, sekali gus mewujudkan data asas dan status semasa dedahan sinaran mengion dari alam sekitar kepada penduduk. Berdasarkan kepada maklumat kuantitatif ini, dos berkesan tahunan dan risiko kebarangkalian kejadian dan kematian akibat kanser akan dianggarkan. Kajian ini juga turut memanfaatkan data kajian yang terdahulu.

Anggaran dos-dos dedahan sinaran mengion alam sekitar terhadap orang awam adalah sesuatu yang penting dalam amalan perlindungan radiologi. Ianya juga bermanfaat untuk penilaian impak radiologi pada masa hadapan sekiranya berlaku pelepasan sumber-sumber radionuklid antropogenik pada sistem biosfera, akibat daripada malapetaka letupan dan luruhan nuklear global. Anggaran-anggaran dos akibat pemancar sinaran gama daratan daripada sumber antropogenik dan primordial yang mana tertabur secara homogen dalam tanah adalah merupakan satu teknik dosimetri sinaran yang sangat konvensional dalam perlindungan radiologi alam sekitar (ICRP 74, 1996).

Bagi tujuan menganggarkan risiko kanser bagi organ atau tisu yang spesifik dalam tubuh manusia, purata dos-dos setara berpemberat tisu atau organ perlulah dikira dan dianggarkan dahulu. Teknik yang paling terkini yang akan digunakan dalam kajian ini adalah berdasarkan teknik numerikal Monte Carlo bagi penganggaran faktor-faktor penukaran dos (*dose conversion factors*, DCFs) akibat dedahan sinaran luaran dari sumber-sumber keradioaktifan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam tanah. Penggunaannya adalah meluas dan telah banyak dilaporkan dalam kajian-kajian lama dan terkini.

Namun terdapat dua isu utama yang telah dikenalpasti wujud daripada kajian-kajian lama ini; 1) iaitu kebanyakan nilai-nilai DCFs yang dicadangkan atau dilaporkan adalah diungkap atau diberikan dalam unit jumlah dos terserap dalam udara (nGy per Bq kg) atau unit penjumlahan dos organ-organ i.e., dos berkesan (nSv per Bq kg), iaitu unit yang disarankan oleh Jawatankuasa International

Commission on Radiological Protection (ICRP). Oleh itu, ianya adalah tidak praktikal bagi penganggaran dos terserap atau setara bagi setiap tisu atau organ spesifik. Sebagai alternatif kepada DCFs, terdapat banyak pemalar-pemalar penukaran dos (*dose conversion coefficients*, DCCs) bagi setiap jenis tisu dan organ telah dicadangkan bagi membantu penganggaran dos organ-organ atau tisu bagi pelbagai arah dan geometri penyinaran tertentu (ICRP 74, 1996).

2) Walau bagaimanapun, nilai atau data DCCs ( $\text{Sv Gy}^{-1}$ ;  $\text{Gy Gy}^{-1}$ ;  $\text{pSv per } \gamma \text{ cm}^2$ ) adalah diberikan dalam bentuk interpretasi yang tidak sesuai dan sukar untuk digunakan. Secara konvensional, siri data DCCs adalah diberikan dalam pelbagai kaedah i.e., secara lakaran grafik dengan fungsi tenaga foton (Petoussi *et al.*, 1991; Choonsik *et al.*, 2007; Ferrari dan Gualdrini 2007; Petoussi *et al.*, 2012; 2014). Selain itu, kebanyakan nilai-nilai DCCs diberikan dalam unit  $\text{pSv per fluks foton } (\gamma \text{ cm}^{-2})$ , yang mana penggunaannya lazim bagi tujuan perubatan nuklear dan tidak praktikal untuk digunakan dalam pengukuran rutin keradioaktifan alam sekitar (Petoussi *et al.*, 1991; Jones, 1997; Zankl *et al.*, 1997; 2002; Choonsik *et al.*, 2007; Schlattl *et al.*, 2007; Akkurt dan Eckerman, 2007; Ferrari dan Gualdrini, 2007; Li *et al.*, 2009; ICRP 116, 2010).

Selain itu, data DCCs berfungsi dengan tenaga yang diberikan dalam jadual atau graf kebiasaannya diberikan dalam setiap turutan menaik 10 keV, yang mana tidak relevan dan praktikal bagi sumber tenaga gama yang spesifik dari radionuklid-radionuklid alam sekitar dan antropogenik (Xu *et al.*, 2001). Data-data berjadual dan graf sebegini memerlukan kaedah pengiraan interpolasi statistik untuk mendapatkan nilai-nilai tenaga gama pemancar radionuklid yang dikehendaki. Disebabkan oleh data-data DCCs melibatkan julat tenaga sinaran yang besar dan beberapa jenis sudut dan arah penyinaran yang berbeza i.e., anterior, posterior dan lateral, secara konvensional data DCCs diberikan dalam graf logaritma (Petoussi *et al.*, 1991; Yamaguchi, 1994; Jones, 1997; Zankl *et al.*, 1997; 2002; Ferrari dan Gualdrini 2007; Akkurt dan Eckerman 2007; ICRP 116, 2010; Petoussi *et al.* 2012; 2014). Disamping itu, kebanyakan nilai DCCs yang dicadangkan adalah untuk aplikasi dedahan penyinaran akibat kontaminasi keradioaktifan dalam udara dan tanah e.g., sumber sinaran berbentuk cakera dan satah, dan kebiasaannya diberikan dalam nilai-nilai unit  $\text{pSv per Bq m}^{-2}$  (Jacob *et al.*, 1986; Eckerman dan Ryman 1993; Choonsik *et al.*

2007; Schlattl *et al.*, 2007; Akkurt dan Eckerman, 2007; Ferrari dan Gualdrini, 2007; ICRP 116, 2010; Petoussi *et al.*, 2012; 2014).

Oleh itu, kajian ini akan menganggarkan nilai DCFs bagi organ dengan menggunakan teknik dosimetri kod simulasi Monte Carlo yang paling terkini, MCNP5. Selain itu, teknik ini secara tidak langsung akan mengemukakan satu kaedah yang paling asas dan mudah untuk tujuan pemantauan radiologi alam sekitar iaitu menganggarkan dos setara bagi organ dan tisu akibat penyinaran medan sinaran gama daripada sumber-sumber utama iaitu  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam tanah dan bahan binaan rumah.

Daripada survei-survei aras keradioaktifan dan sinaran mengion yang dijalankan, kajian ini juga secara tidak langsung akan memberikan maklumat berguna iaitu data preliminari ketersediaan sumber bahan api nuklear (i.e., torium) yang berpotensi di Semenanjung Malaysia.

### **1.3 Skop Kajian**

Kajian ini merangkumi seluruh Semenanjung Malaysia. Bagi tujuan pengumpulan data kajian, kajian ini melibatkan dua kaedah penting iaitu; kaedah eksperimen dan numerik. Kaedah eksperimen melibatkan survei-survei sinaran gama daratan, persampelan, dan analisis keradioaktifan semulajadi dan antropogenik. Data yang diperolehi dianalisis melalui beberapa ujian kesahihan dan hipotesis statistik. Manakala kaedah numerik digunakan untuk tujuan interpretasi data yang diperolehi daripada kaedah eksperimen. Kaedah numerik yang digunakan dalam kajian ini melibatkan simulasi Monte Carlo bagi tujuan dosimetri dan anggaran implikasi radiologi terhadap orang awam seperti anggaran kadar dos berkesan dan dos setara organ. Kajian ini juga turut mengolah data daripada kajian terdahulu seperti survei sinaran mengion alam sekitar kewilayahan dan kajian radiologi kewilayahan di Semenanjung Malaysia. Data asas lain juga turut digunakan seperti data perangkaan negara, data purata pengambilan makanan tahunan penduduk dari Kementerian

Kesihatan Malaysia, data geografi, data mineral, tinjauan tanah dan geologi dan data dari kajian yang melibatkan survei jelajah mineral (Zakaria *et al.*, 1993; 1994; Mohd Hassan *et al.*, 1995).

#### 1.4 Objektif Kajian

Kajian ini bertujuan untuk membina data dasar aras keradioaktifan di alam sekitar dan menganggarkan dos dedahan sinaran terhadap orang awam akibat sinaran mengion dari alam sekitar di Semenanjung Malaysia. Berikut adalah perincian objektif kajian:-

- 1) Menganggarkan dos berkesan tahunan yang diterima oleh orang awam di Semenanjung Malaysia akibat dedahan dari sinaran mengion di alam sekitar dari sumber sinaran kosmik (komponen sinaran mengion secara langsung dan neutron), sumber keradioaktifan primordial dalam tanah dan bahan binaan rumah dan antropogenik (siri  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$ ) yang mana terhasil daripada kemalangan nuklear di Fukushima, Jepun dan luruhan nuklear daripada ujian senjata nuklear di seluruh dunia, dedahan dalaman akibat penyedutan gas radon dan toron ( $^{222}\text{Rn}$  dan  $^{220}\text{Rn}$ ), dan akibat penelanan sumber keradioaktifan siri  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam makanan dan minuman.
- 2) Membangunkan teknik numerik yang ringkas dan mudah bagi anggaran dos organ dan dos berkesan akibat pancaran foton gama dari radionuklid primordial dan antropogenik dalam tanah (siri  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $\text{K}$  dan  $^{137}\text{Cs}$ ) dan dalam bahan binaan rumah menggunakan teknik numerik simulasi Monte Carlo MCNP5.
- 3) Mengemukakan hasil ujian kesahihan statistik antara hubungan pengaruh evolusi tektonik, latarbelakang geologi dan genesis tanah terhadap kadar dos sinaran gama daratan dan kandungan keradioaktifan dalam tanah.
- 4) Membina peta keruangan isodos bagi sinaran mengion dan peta iso-kepekatan keradioaktifan (siri  $^{238}\text{U}$  dan  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$ ) dalam tanah bagi mengemukakan



data preliminari eksplorasi torium untuk penilaian ketersediaan sumber bahan api nuklear ini di Malaysia pada masa hadapan.

### 1.5 Kepentingan Penyelidikan

Kepentingan dan sumbangan kajian disenaraikan seperti berikut:-

- 1) Kajian ini penting dan perlu dilakukan bagi mendapatkan data dasar atau maklumat asas aras keradioaktifan dan sinaran mengion dari sumber semulajadi. Data dasar kajian ini bermanfaat sebagai rujukan kepada pihak berkuasa di Semenanjung Malaysia khususnya pihak Lembaga Perlesenan Tenaga Atom Malaysia (LPTA) dan Agensi Nuklear Malaysia bagi rujukan penilaian keselamatan kesihatan radiologi orang awam pada era pembangunan program nuklear Malaysia pada masa hadapan.
- 2) Kajian ini penting dilakukan tujuan penganggaran dos berkesan tahunan yang diterima oleh populasi di Semenanjung Malaysia termasuk aras risiko kesihatan radiologi manusia akibat dedahan sinaran daripada sumber radionuklid semulajadi (primordial) dan antropogenik. Kajian juga secara tidak langsung mengemukakan satu teknik penambahbaikan dalam metodologi penganggaran dos organ menggunakan simulasi kod pengangkut foton Monte Carlo.
- 3) Kajian ini penting dilakukan bagi menyiasat aras pencemaran keradioaktifan dari sumber antropogenik  $^{137}\text{Cs}$  dan pemancar sinar gama berjangka hayat panjang ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ) di Semenanjung Malaysia akibat aktiviti dan penggunaan tenaga nuklear di seluruh dunia seperti ujian senjata nuklear dan kemalangan loji reaktor tenaga nuklear.
- 4) Data dan hasil kajian penting untuk rujukan keselamatan, penguatkuasaan kawalan sisa dan pencemaran radioaktif dari industri TENORM (*technologically enhanced naturally occurring radioactive materials*) dan untuk tujuan

penggubalan dasar dan polisi yang melibatkan keselamatan pekerjaan dan orang awan akibat daripada amalan-amalan yang melibatkan penggunaan bahan radioaktif atau tenaga nuklear.

- 5) Kajian ini penting dilakukan bagi mendapatkan data preliminari ketersediaan sumber bahan bakar nuklear iaitu torium yang mana penting bagi rujukan pihak berkuasa yang terlibat dalam eksplorasi mineral di Semenanjung Malaysia seperti Jabatan Mineral dan Geosains dan Agensi Nuklear Malaysia.

## **1.6 Susun Atur Bab**

Tesis ini dibahagikan kepada 5 bab utama. Bab 1 merupakan pengenalan yang mengulas maklumat dan latarbelakang kajian yang dijalankan. Ia menghuraikan pernyataan masalah, skop dan rangkuman kajian, objektif kajian dan kepentingan kajian. Bab ini memberikan maklumat awalan dan gambaran umum tentang kajian.

Bab 2 pula adalah kajian kepustakaan pula menghuraikan teori dan asas fizik sinaran, biofizik sinaran, termasuk huraian mengenai sinaran mengion di alam sekitar, laporan kajian terdahulu yang telah dilakukan di Malaysia, termasuk laporan dari kajian luar negara dan badan antarabangsa.

Bab 3 iaitu metodologi kajian menghuraikan tentang maklumat kawasan kajian seperti maklumat latarbelakang dan pengenalan kepada lokasi kajian. Maklumat yang dikemukakan mengenai kawasan kajian melibatkan maklumat demografi dan strata sosial, geografi dan topografi kawasan kajian, pengenalan kepada evolusi tektonik, maklumat teren tektonik, latarbelakang geologi, litologi kawasan kajian dan pengenalan kepada genesis tanah dan sistem pengelasan tanah yang terdapat di Semenanjung Malaysia. Bab ini juga turut menghuraikan kaedah, teknik, analisis data dan instrumen utama yang digunakan dalam kajian ini

Bab 4 mengemukakan keputusan dan perbincangan adalah bab yang mengemukakan keseluruhan dapatan hasil dari kajian ini dan analisis yang telah dilakukan. Bab ini menghuraikan dan membincangkan data dan keputusan analisis yang dibuat dan membandingkannya data dengan kajian terdahulu bagi menguji kebolehpercayaan dan kesahihan data yang diperolehi. Bab 5 mengemukakan kesimpulan hasil kajian dan mengemukakan cadangan untuk kajian pada masa hadapan.