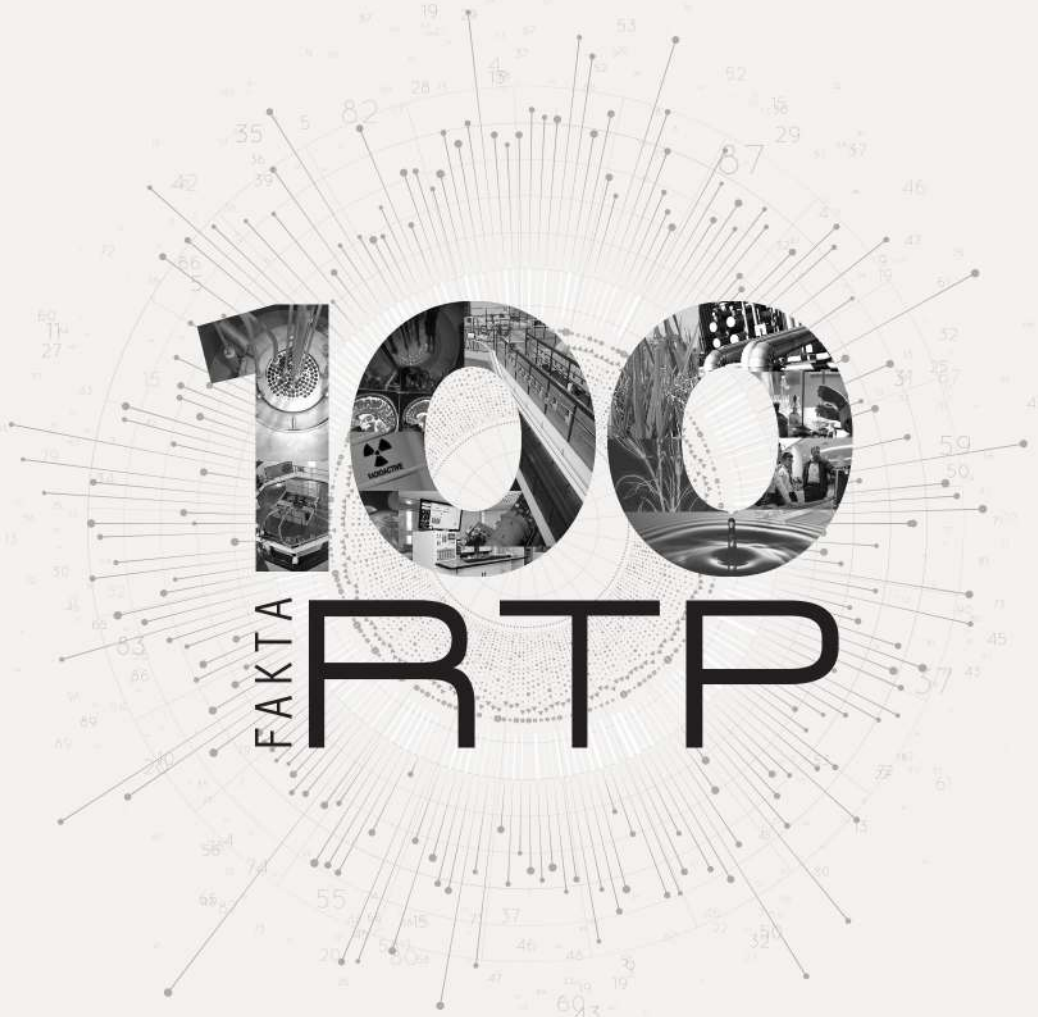
NUKLEAR MALAYSIA

100 FAKTA RTP

40 ANNIVERSARY


100
FAKTA
RTP

Hak Cipta : Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia)

Hak Cipta Terpelihara. Tidak dibenarkan mengeluar ulang mana-mana bahagian artikel,, ilustrasi dan isi kandungan buku ini dalam apa juga bentuk dan dengan cara apa jua sama ada secara elektronik, fotokopi, mekanik, rakaman atau cara lain sebelum mendapat izin bertulis daripada Penerbit.

Diterbitkan oleh:

Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia)
Bangi, 43000 Kajang, Selangor Darul Ehsan,
MALAYSIA

Telefon : 03 – 8911 2000
Laman web : http://wwww.nuclearmalaysia.gov.my
Cetakan pertama : 2022

Perpustakaan Negara Malaysia Data Pengkatalogan-dalam-Penerbitan

100 FAKTA RTP.
ISBN 978-967-2706-11-3 (hardback)
1. Reaktor TRIGA PUSPATI--Anniversaries, etc.
2. Reaktor TRIGA PUSPATI--History.
3. Nuclear reactors--Malaysia.
4. Nuclear power plants--Malaysia.
5. Government publications--Malaysia.
621.48309595

PRAKATA

Buku 100 Fakta RTP diterbitkan sempena ulang tahun Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) yang ke-40. Buku ini mengandungi 100 fakta mengenai satu-satunya reaktor penyelidikan di Malaysia yang julung kalinya diterbitkan. Fakta-fakta ini adalah merujuk kepada sejarah, struktur, sistem dan komponen, pengurusan, fasiliti, aplikasi, ceritera kejayaan dan sumbangan komuniti di RTP.

Buku ini sesuai sebagai bahan bacaan umum dan juga boleh dijadikan rujukan akademik. Fakta diterangkan secara santai menggunakan bahasa yang mudah difahami. Harapan penulis semoga buku ini dapat dimanfaatkan dengan sebaiknya.

KANDUNGAN

PRAKATA 1
KANDUNGAN 2
SENARAI RAJAH 6
SENARAI SINGKATAN 8

01

SEJARAH **10**

Fakta 1 : Idea Asal 11
Fakta 2 : Kronologi RTP 12
Fakta 3 : Sejarah Lokasi 14
Fakta 4 : Perjanjian Perbekalan RTP 14
Fakta 5 : Ujian Kegentingan Pertama 15
Fakta 6 : Akta Perlesenan Tenaga Atom (Akta 304) 16
Fakta 7 : Pengurus RTP 17
Fakta 8 : Pengendali Reaktor Kanan Bertauliah 18
Fakta 9 : Pengendali Reaktor Bertauliah 18
Fakta 10 : Proses Pentauliahan Pengendali Reaktor 19

02

STRUKTUR, SISTEM DAN KOMPONEN RTP **20**

Fakta 11 : Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) 21
Fakta 12 : Syarikat General Atomics Inc. (GA) 21
Fakta 13 : Pengkelasan TRIGA 22
Fakta 14 : Maksud TRIGA 23
Fakta 15 : Struktur Bangunan RTP 23
Fakta 16 : Teras RTP 24
Fakta 17 : Bahan Api RTP 25
Fakta 18 : Pengayaan Bahan Api 25
Fakta 19 : Ciri Unik Bahan Api UZrH 25
Fakta 20 : Rod Kawalan 26
Fakta 21 : *Air Follower* 26
Fakta 22 : *Fuel Follower* 26
Fakta 23 : Mekanisma Rod Kawalan 26
Fakta 24 : Elemen Bahan Api Berinstrumen 27
Fakta 25 : Kebuk Pembelahan Neutron 27

Fakta 26	:	Pembelahan Nuklear	27
Fakta 27	:	Tindakbalas Berantai	27
Fakta 28	:	Sinar Cherenkov	28
Fakta 29	:	Haba	28
Fakta 30	:	Mekanisme Pemindahan Haba	29
Fakta 31	:	Sistem Penyejuk	29
Fakta 32	:	Peranan Air Nyahmineral	29
Fakta 33	:	Sistem Penulenan Air	29
Fakta 34	:	Resin	30
Fakta 35	:	Instrumentasi dan Kawalan RTP	30

03

PENGURUSAN 3S **31**

Fakta 36	:	Keselamatan	32
Fakta 37	:	Perlindungan Fizikal	32
Fakta 38	:	Kawalgunaan Nuklear	32
Fakta 39	:	Pengurusan Penuaan	32
Fakta 40	:	Penyenggaraan Berkala	33
Fakta 41	:	Pengurusan Teras RTP	33
Fakta 42	:	*In-Service Inspection* (ISI)	33
Fakta 43	:	Pengurusan Sisa Radioaktif RTP	35
Fakta 44	:	Pelan Penyahtauliahan	35
Fakta 45	:	Pemantauan Parameter Operasi	35
Fakta 46	:	Sistem Pengurusan Bersepadu (IMS)	36
Fakta 47	:	Lesen RTP	36
Fakta 48	:	Misi Pakar IAEA terhadap Penilaian Keselamatan, Sekuriti dan Kawalgunaan di RTP	37

04

FASILITI **38**

Fakta 49	:	Fasiliti Penyinaran Neutron	39
Fakta 50	:	Penyinaran Dalam Teras	39
Fakta 51	:	Jidal Tengah (CT)	39
Fakta 52	:	Tiub Kering (DT)	40
Fakta 53	:	Sistem Pemindah Pneumatik (PTS)	40
Fakta 54	:	Rak Berputar (RR)	41
Fakta 55	:	Sistem Analisa Pengaktifan Neutron Tertunda (DNAA)	42
Fakta 56	:	Lubang Eksperimen Berdiameter 1 cm	42

Fakta 57	:	Plat Tiga Segi dan Enam Segi Boleh Alih	43
Fakta 58	:	Penyinaran Luar Teras	43
Fakta 59	:	Turus Terma (TC)	43
Fakta 60	:	Alur Neutron (*Neutron Beam Port*)	44
Fakta 61	:	Radiografi Neutron (NuR)	45
Fakta 62	:	Penyerak Neutron Bersudut Kecil (*Small Angle Neutron Scattering*, SANS)	45
Fakta 63	:	Fasiliti Penyelidikan Sokongan	46
Fakta 64	:	Makmal Fizik Neutron	46
Fakta 65	:	Makmal Hidraulik-Terma	46
Fakta 66	:	Makmal Simulator	47

05 **APLIKASI** **48**

Fakta 67	:	Sumber Neutron	49
Fakta 68	:	Sampel Penyinaran	49
Fakta 69	:	Penilaian Sampel Penyinaran	50
Fakta 70	:	Kaedah Pengaktifan Neutron	50
Fakta 71	:	Komposisi Kandungan Unsur	51
Fakta 72	:	Pembentukan Radioisotop	51
Fakta 73	:	Radioisotop Perubatan	52
Fakta 74	:	Sukarelawan Pertama	52
Fakta 75	:	Radioisotop Industri	53
Fakta 76	:	Sinar-X vs Neutron	54
Fakta 77	:	Kemudahan Radiografi Neutron	54
Fakta 78	:	Analisis Sampel Biologi	55
Fakta 79	:	Pengimejan Radiografi Neutron	55
Fakta 80	:	Pemeriksaan Sekuriti	55

06 **CERITERA KEJAYAAN** **56**

Fakta 81	:	Persijilan Pengendali Reaktor	57
Fakta 82	:	Kendalian dan Penyenggaraan RTP	57
Fakta 83	:	Pembangunan Pangkalan Data Operasi	57
Fakta 84	:	ANADATA	58
Fakta 85	:	OptOur	58
Fakta 86	:	MyFuel	59
Fakta 87	:	Database Stack Monitoring System (DASMOS)	59
Fakta 88	:	Penyenggaraan Secara Dalaman	60

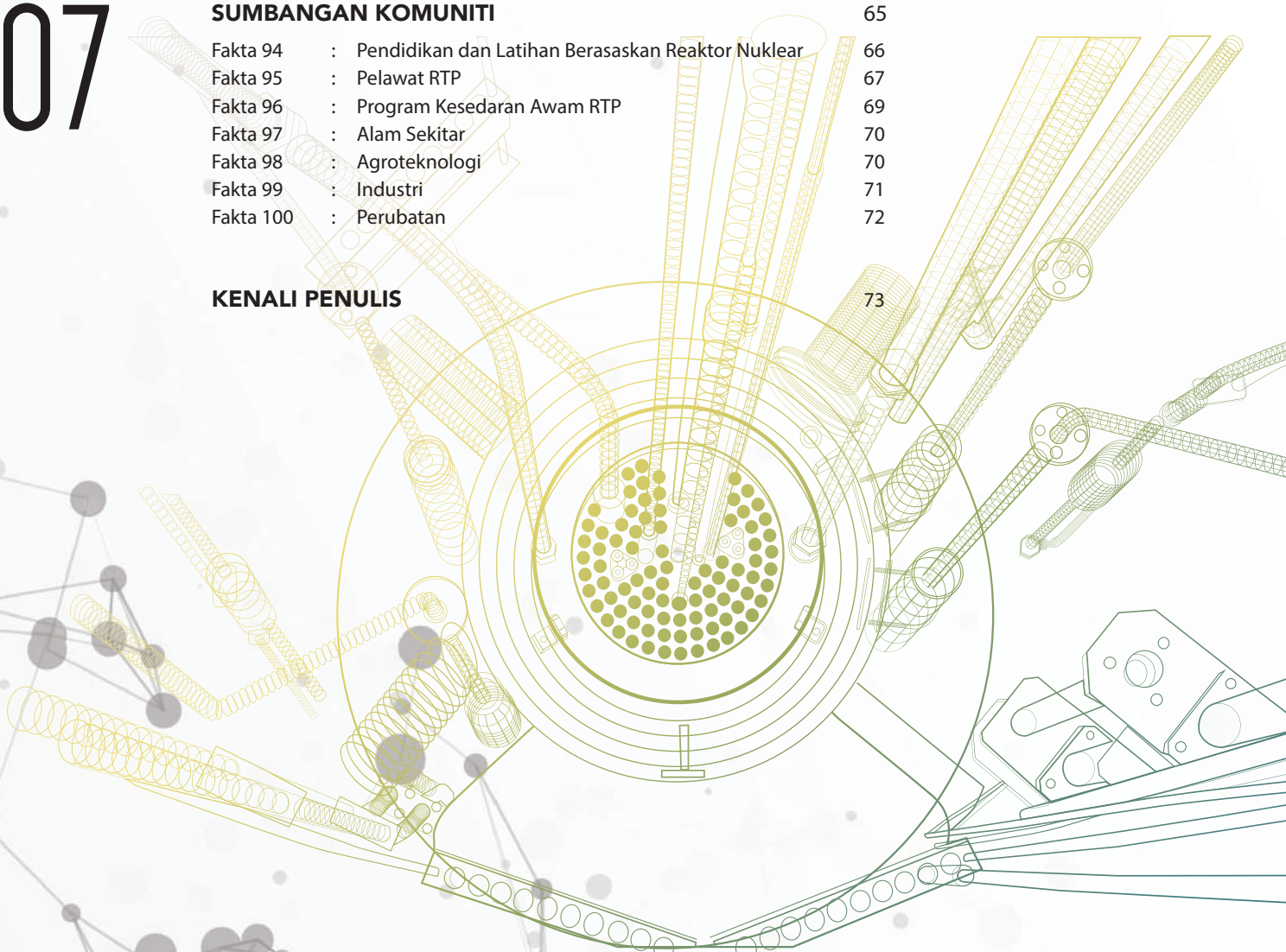
Fakta 89 : ReDICS 61
Fakta 90 : Simulator RTP 62
Fakta 91 : Kolam Bahan Api Nuklear Terpakai 62
Fakta 92 : TRIMON 63
Fakta 93 : COMPASS-M 64

07

SUMBANGAN KOMUNITI 65

Fakta 94 : Pendidikan dan Latihan Berasaskan Reaktor Nuklear 66
Fakta 95 : Pelawat RTP 67
Fakta 96 : Program Kesedaran Awam RTP 69
Fakta 97 : Alam Sekitar 70
Fakta 98 : Agroteknologi 70
Fakta 99 : Industri 71
Fakta 100 : Perubatan 72

KENALI PENULIS 73



SENARAI RAJAH

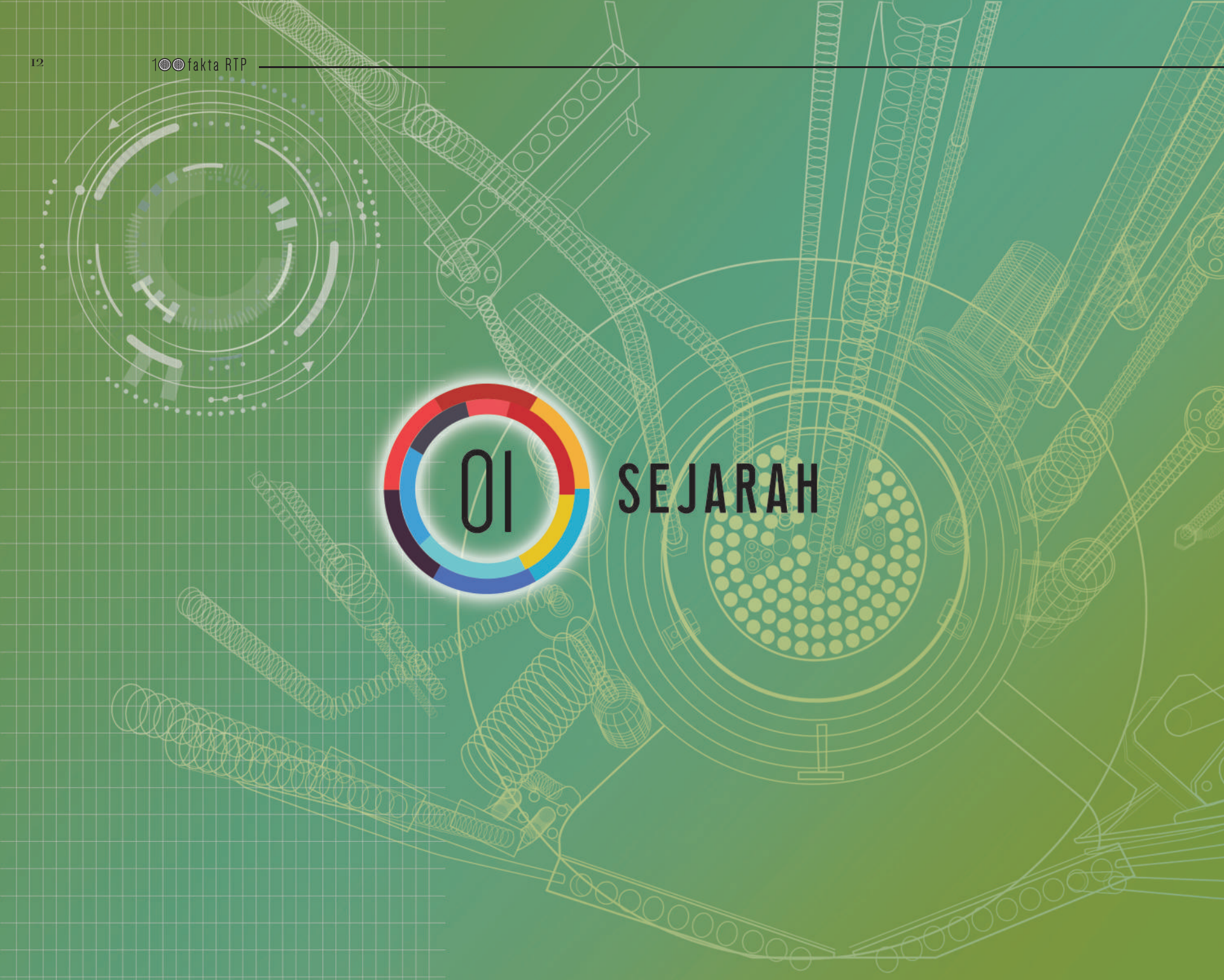
Allahyarham Tun Dr. Ismail Dato' Abdul Rahman 11
Footprint reaktor 14
Muka hadapan perjanjian tiga hala 14
Ujian sebelum pentauliahan 16
Rekod kegentingan pertama di dalam buku log kendalian RTP 16
Taburan reaktor nuklear penyelidikan TRIGA di dunia 21
Pandangan sisi perisai biologi 23
Teras RTP 24
Bahan api RTP 25
Model bahan api RTP 25
Gambaran mekanisma rod kawalan 26
Motor pandu rod kawalan di atas pelantar reaktor 26
Elemen bahan api berinstrumen 27
Pembelahan nuklear 27
Cahaya kebiruan menunjukkan sinar Cherenkov dari teras RTP 28
Mekanisma pemindahan haba 29
Amberlite IRN150 30
Skematik penukaran ion oleh resin 30
Penyenggaraan RTP 33
Pemeriksaan terma paip menara penyejuk menggunakan infrared tomography 33
Pemeriksaan permukaan perisai konkrit menggunakan UPV 33
Tong kuning sisa radioaktif 34
Ilustrasi pengurusan sisa radioaktif 34
Ilustrasi data berperingkat di dalam IMS-RTP 36
Log masuk Sistem eSPP 36
Contoh Lesen RTP 36
IPPAS, April 2016 37
INSARR, April 2014 37
Pemeriksaan kawalgunaan oleh IAEA, November 2018 37
Jidal Tengah 39
Lubang DT di pelantar reaktor 40
Kebuk wasap; Stesen sistem pemindah pneumatik di dalam kebuk wasap 40
Bekas sampel dan tiub penyinaran TRIGA 40
Rak Berputar 41
Bekas sampel dan tiub penyinaran 41
Batang kail khas yang digunakan untuk memasukkan dan mengeluarkan sampel RR 41
Susun atur fasiliti penyinaran dalam teras teras RTP 42
Himpunan bongkah grafit; Pintu konkrit turus terma 43
Keratan rentas reaktor TRIGA PUSPATI menunjukkan kedudukan lubang alur 44
Lubang alur neutron 44
Fasiliti NuR, Sistem manipulator and sistem kamera neutron di NuR 45
Sistem SANS 45
Makmal Fizik Neutron 46
Makmal hidraulik terma: Susunan pepasangan peralatan eksperimen; heater panel board; papan kawalan pemanas air; tangki air litar primer 46
Simulator kawalan proses loji kuasa nuklear berasaskan komputer 47
Simulator reaktor penyelidikan jenis TRIGA 47
Kit perubatan (pengeluaran radisotop) 49
Sampel madu 49
Ilmenite 49

(a) Penapis udara; (b) Air mineral; (c) Manik; dan (d) Tumbuhan 49
Sampel manik dimasukkan ke dalam vial; Sistem Automasi HPGe yang digunakan untuk menganalisis sampel pengaktifan neutron 50
Pinggan mangkuk porselin 51
Proses penghasilan sampel radioisotop perubatan di RTP 51
Sampel dikeluarkan dari teras reactor 51
Imej penjejak radioisotop 52
Produk radioisotop Nuklear Malaysia sedia dibekalkan ke hospital 52
Sukarelawan pertama ujian klinikal radioisotop perubatan Tc-99m 52
Tc-99m digunakan di dalam kajian arah air bawah tanah melalui teknik telaga tunggal (*single-well technique*) 53
Radioisotop Br-82 digunakan untuk menentukan tempoh agihan masa loji pembakaran di Hospital Kuantan 53
Penyediaan pasir Ir-192 di kapal korek untuk kajian pengangkutan sedimen di Pelabuhan Bintulu, Sarawak 53
Penggunaan radioisotop Au-198 dan H-3 di Empangan Pedu, Kedah bagi mengkaji tirisan air awalan di permukaan empangan 53
Imej radiografi neutron daripada RTP terhadap warisan budaya dengan kerjasama Jabatan Muzium dan Antikuiti, Kementerian Pelancongan, Kebudayaan dan Kesenian, Malaysia 54
(a) Gambar artifak asal, (b) imej dari sinar-X, (c) imej dari sinar neutron 54
Perbezaan kontras (a) Gambar bunga raya (b) Imej sinar-X, (c) Imej neutron 55
Imej telefon bimbit 55
Paling kanan bateri lama yang telah di gunakan (a) Gambar asal dan (b) imej neutron 55
Imej cecair di dalam botol plastik yang di halang kepingan plumbum 55
Peperiksaan bertulis Pengendali Reaktor di LPTA 57
Contoh slip Pengiktirafan Pengendali Reaktor yang dikeluarkan oleh pihak LPTA 57
Jam Kendalian RTP tahun 1982-2021 57
Buku log kendalian pertama RTP 58
Antara muka grafik pengguna Sistem ANADATA yang masih menggunakan persekitaran arahan (command environment) adalah tidak mesra pengguna 58
Antara muka grafik pengguna OptOur 58
Antara muka grafik pengguna MyFuel 59
Antara muka grafik pengguna DASMOS 59
Pemeriksaan SSC semasa penyenggaraan RTP 60
Konsol kawalan digital 61
Konsol kawalan analog; Simulator RTP 62
Kolam Bahan Api Nuklear Terpakai 62
Muka depan kod TRIMON 63
Antara muka grafik analisis kod TRIMON 63
Ilustrasi aliran kerja COMPASS-M 64
Aktiviti latihan dan pendidikan berasaskan reaktor nuklear 66
Pelawat RTP 2010–2019 67
Lawatan dari pelbagai institusi pendidikan 67
Lawatan dari pelbagai kementerisan, agensi dan orang awam 68
Pelbagai aktiviti kesedaran awam RTP 69
Pensampelan sedimen marin 70
Padi bukit; Sarang burung walit; Madu 70
Mengesan kebocoran menggunakan radioisotop 71
Laluan radiofarmaseutikal 72

SENARAI SINGKATAN

ANADATA	Analisis Data
B4C	Boron Carbide
BOC-EOC	*Begin-of-cycle-to-End-of-Cycle*
BP	Alur Neutron (*Beamport*)
CCD	*Coupled-Charged Device*
COMPASS-M	COMpetence for Probabilistic ASsessment of Safety in Malaysia
CT	Jidal Tengah (*Central Timble*)
DASMOS	Pangkalan Data Sistem Pemantau Cerobong (*Database of Stack Monitoring System*)
DNAA	Sistem Analisa Pengaktifan Neutron Tertunda (*Delayed Neutron Activation Analysis System*)
DT	Tiub Kering (*Dry Tube*)
eSPP	Sistem Perlesenanan dan Penguatkuasaan
GA	General Atomics Inc.
HOPG	*Highly Oriented Pyrolytic Graphite*
HPGe	*High Purity Germanium*
IFE	Elemen Bahan Api Berinstrumen (*Instrumented Fuel Element*)
IMS	Sistem Pengurusan Bersepadu (*Integrated Management System*)
INSARR	*Integrated Safety Assessment of Research Reactors*
INSServ	International Nuclear Security Advisory Service
INSSP	Integrated Nuclear Security Support Plan
IPPAS	International Physical Protection Advisory Service
IPTA	Institut Pengajian Tinggi Awam
IPTS	Institut Pengajian Tinggi Swasta
iRISE	International Research Innovation, Invention & Solution Exposition
ISI	In-service Inspection
ISSAS	Safeguard and State System Accounting and Control Advisory Service
ITEX	International Invention, Innovation & Technology Exhibition
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JICA	Japan International Cooperation Agency
JKR	Jabatan Kerja Raya
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
LCD	Paparan Kristal Cecair (*Liquid Crystal Display*)
LPTA	Lembaga Perlesenan Tenaga Atom
MyFuel	An Integrated Nuclear Fuel Safety Assessment and Operating-Licensing Management System
NPT	Triti Ketakcambahan Senjata Nuklear (*Non-Proliferation Treaty)*
NSE	Nuklear, Sains dan Kejuruteraan (*Nuclear, Science and Engineering*)

NSEAP	Nuclear School Experiment on Reactor Physics and Neutron Science for Asia Pacific Region
NuR	Radiografi Neutron (*Neutron Radiography*)
OLC	Had dan Syarat Operasi (*Operation Licensing Condition*)
OptOur	Operating Hour
ORPAS	Occupational Radiation Protection Appraisal Service
PSD	Position Sensitive Detector
PTS	Sistem Pemindah Pneumatik (*Pneumatic Transfer System*)
ReDICS	Reactor Digital Instrumentation and Control
ROT	Latihan Pengendali Reaktor (*Reactor Operator Training)*
RR	Rak Berputar (*Rotary Rack*)
RRDB	IAEA Research Reactor Database
RTP	Reaktor TRIGA PUSPATI
SANS	Penyerak Neutron Bersudut Kecil (*Small Angle Neutron Scattering*)
SMS	Sistem Pemantau Cerobong (*Stack Monitoring System)*
SSAC	State System Accounting and Control
SSC	Struktur, system dan komponen (*Structure, System, and Component*)
SUST	Sudan University of Science and Technology
TC	Turus Terma (*Thermal Column*)
TRIMON	Monte Carlo Integration for TRIGA Reactor Core Management
TRT	Terapi Radionuklid Bersasar (*Targeted Radionuclide Therapy*)
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
UNITEN	Universiti Tenaga Nasional
UPM	Universiti Putra Malaysia
UPV	Ultra-Pulse Velocity
UTHM	Universiti Tun Hussein Onn Malaysia
UTM	Universiti Teknologi Malaysia
UZ_rH	Uranium Zirkonium Hidrat
SRO	Pengendali Reaktor Kanan (*Senior Reactor Operator*)
RO	Pengendali Reaktor (*Reactor Operator*)



01 SEJARAH

01 Idea Asal

Penubuhan institusi nuklear di Malaysia adalah cetusan idea Allahyarham Tun Dr. Ismail Dato' Abdul Rahman, Timbalan Perdana Menteri Malaysia. Beliau mencadangkan Malaysia menceburi bidang ini, setelah mengadakan lawatan ke reaktor penyelidikan di Indonesia.

Allahyarham Tun Dr. Ismail Dato' Abdul Rahman

02 Kronologi RTP

1968

01.07.1968
Malaysia menandatangani Triti Ketakcambahan Senjata Nuklear (NPT).

1969

15.01.1969
Malaysia menyertai IAEA.

1970

03.05.1970
Malaysia menerima pakai NPT.

1979

15.01.1979
Kerja-kerja penyediaan tapak PUSPATI di Bukit Ropa, Bangi, Selangor.

18.07.1979
IAEA meluluskan pembelian Reaktor TRIGA Mark II oleh kerajaan Malaysia.

1982

18.03.1982
Penerimaan sebilangan alat-alat elektronik yang dihadiahkan oleh kerajaan Jepun kepada PUSPATI di bawah program Japan International Cooperation Agency (JICA).

06.05.1982
Teras reaktor dimasukkan ke dalam tangki.

15.05.1982
(4.30 ptg)
Penerimaan kumpulan pertama komponen reaktor yang terdiri daripada bahan api, punca neutron dan pengesan neutron.

21.05.1982
(3.15 ptg)
Penerimaan kumpulan kedua komponen reaktor iaitu tujuh dram bahan api diterima (Rajah 3).

07.06.1982
Penerimaan kumpulan ketiga dan terakhir bahan api reaktor diterima.

25.06.1982
Bahan api dimasukkan ke dalam teras reaktor.

28.06.1982
(5 ptg)
Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) mencapai kegentingan pertama.

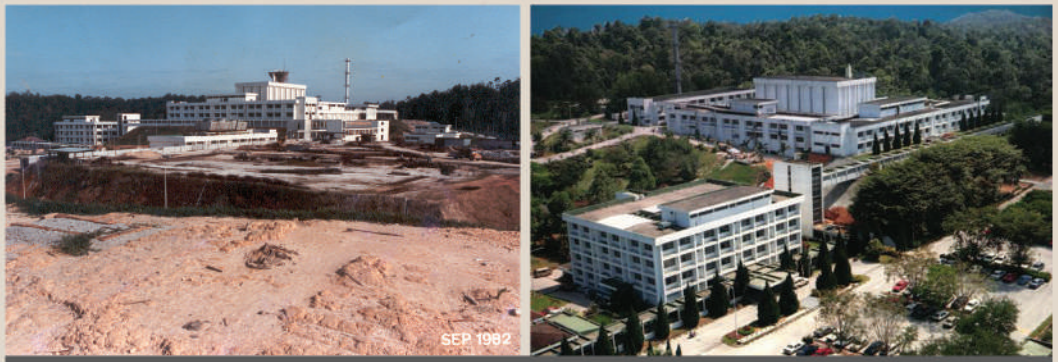
16.07.1982
Penerimaan kumpulan pertama komponen reaktor yang terdiri daripada bahan api, punca neutron dan pengesan neutron.

16.07.1982
Sesi pengujian dan pentauliahan RTP selesai dilaksanakan selepas kegentingan reaktor tamat. Sijil pemilikan RTP oleh PUSPATI yang ditandatangani oleh Y.B. Menteri Sains, Teknologi dan Alam Sekitar; Tan Sri Ong Kee Hui dan wakil USA (General Atomics, Inc.) diterima.

22.11.1982
Pemeriksaan pertama terhadap kawalan dan perakaunan bahan api nuklear di bawah Perjanjian NPT.

30.12.1982
RTP menerima 11 bahan api tambahan dari IAEA.

03 Sejarah Lokasi

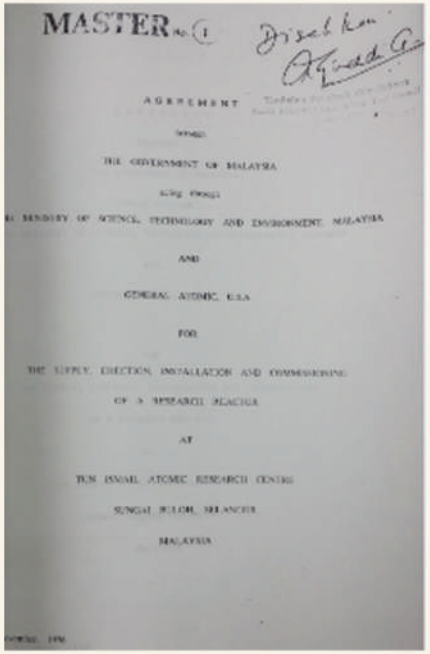


Footprint reaktor

Tapak asal PUSPATI seluas 47 ekar telah diluluskan di hutan simpan Sungai Buloh, Selangor pada 25 Mei 1976. Jemaah Menteri telah meluluskan pemindahan tapak PUSPATI dari Sungai Buloh ke Bukit Ropa, Bangi Selangor, yang menawarkan tanah lebih besar seluas 66 ekar. Lokasi ini menempatkan bangunan reaktor seluas 920 meter persegi dengan struktur RTP di bina di aras tanah.

04 Perjanjian Perbekalan RTP

Perjanjian tiga hala antara Kerajaan Malaysia, IAEA dan Kerajaan Amerika Syarikat untuk membekalkan RTP telah ditandatangani pada 20 September 1980.


MASTER

AGREEMENT

THE GOVERNMENT OF MALAYSIA

AND

GENERAL ATOMIC, U.S.A.

FOR

AT

MALAYSIA

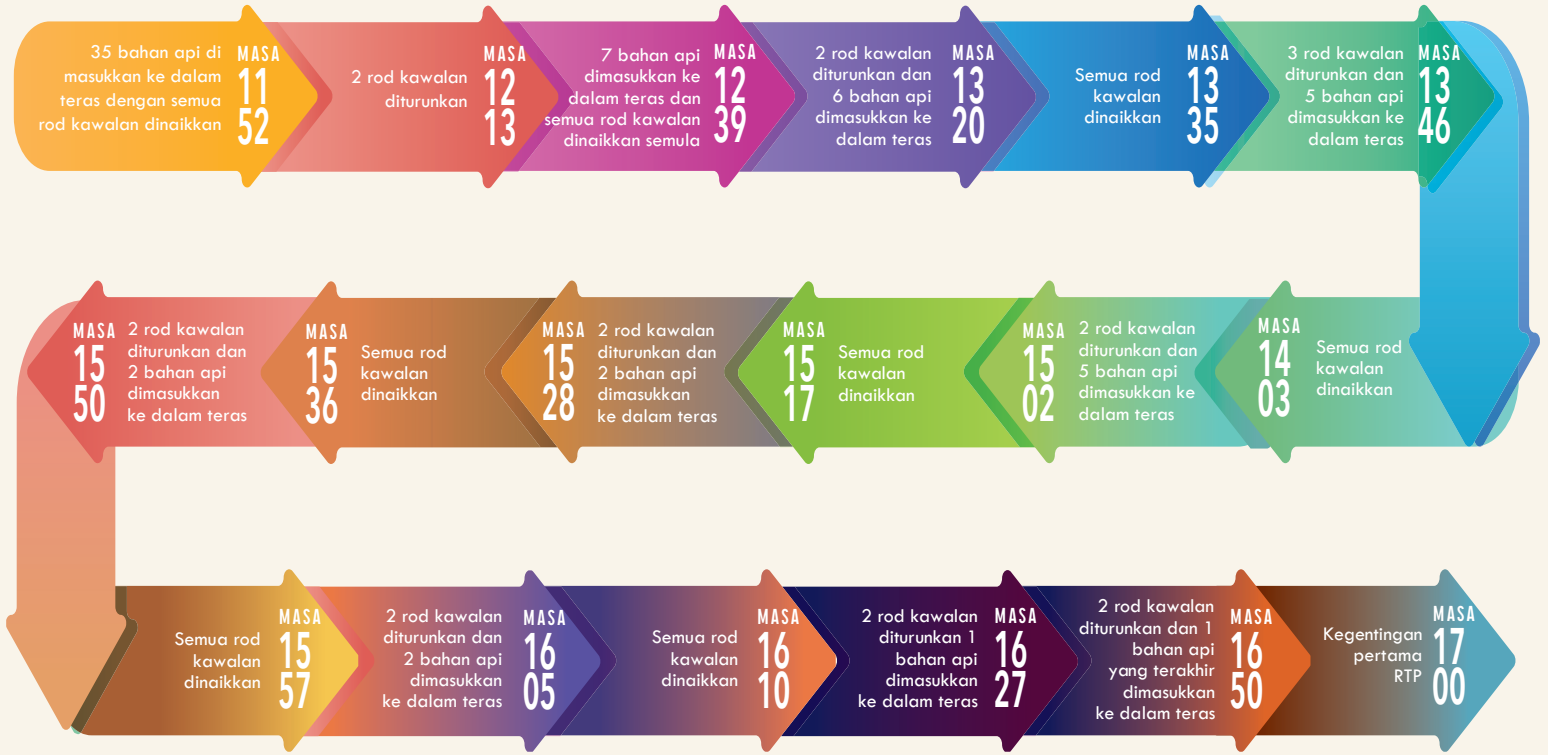
Muka hadapan perjanjian tiga hala

05 | Ujian Kegentingan Pertama

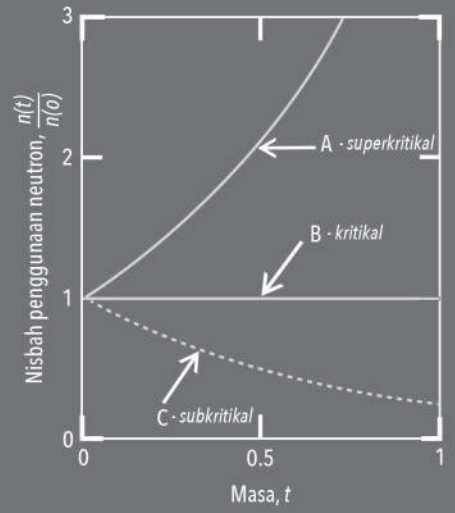
Ujian kegentingan RTP dijalankan pada hari Isnin, 28 Jun 1982 oleh Yaziz Yunus,. pengendali reaktor yang bertanggungjawab ketika itu. Proses ini diawasi oleh pakar General Atomics, Inc., Dr. Whittermore.

Bahan api nuklear dimasukkan satu persatu ke dalam teras. Ketika itu juga, tiga batang rod kawalan yang mengandungi bahan penyerap neutron dinaikkan secara berperingkat. Pada kemasukan bahan api nuklear ke-66, RTP mencapai tahap kegentingan buat pertama kali tepat jam 1700. Ujian kegentingan berakhir pada 1704 jam dan semua rod kawalan diturunkan semula ke dalam teras serta kunci dikeluarkan dari panel kawalan.

Kronologi Kegentingan RTP pada 28 Jun 1982



Apa itu kegentingan?

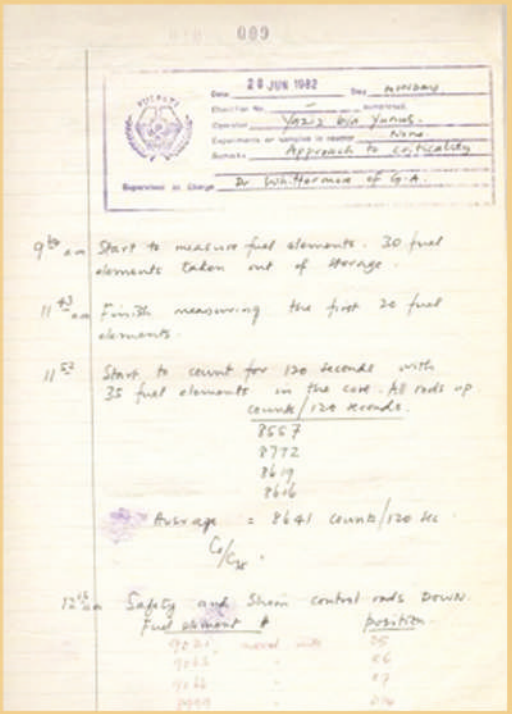


Reaktor mencapai tahap kegentingan apabila proses pembelahan mengeluarkan neutron yang cukup untuk mengekalkan tindak balas pembelahan berantai secara berterusan.

Ini bermakna nisbah penggandaan neutron di dalam generasi semasa terhadap generasi sebelumnya bersamaan satu.

06 Akta Perlesenan Tenaga Atom (Akta 304)

Kerajaan Malaysia telah meluluskan Akta Perlesenan Tenaga Atom (Akta 304) pada April 1984, bertujuan menyediakan peraturan dan kawalan penggunaan tenaga atom serta piawaian liabiliti kerosakan nuklear. Penubuhan Lembaga Perlesenan Tenaga Atom (LPTA) - pada 1 Februari 1985 membolehkan Kerajaan mengawal, memeriksa dan menguatkuasakan aktiviti tenaga atom untuk melindungi orang awam, pekerja dan alam sekitar.



Rekod kegentingan pertama di dalam buku log kendalian RTP

Ujian sebelum pentauliahan

07 Pengurus RTP

Pengurus RTP bertanggungjawab sepenuhnya terhadap pengurusan keselamatan, sekuriti dan kawalgunaan kemudahan RTP. Berikut adalah senarai pengurus RTP dari mula beroperasi sehingga kini.

Prof. Dr. Ir. Nahrul Khair Alang Md Rashid
(Jun 1982 - Dis 1986)

- Phd Kejuruteraan Nuklear, University of New Mexico, US, 1992
- MSc Instrumentasi Nuklear, University of Edinburgh, UK, 1977
- BEng Kejuruteraan Elektrik, University of Glasgow, UK, 1976

Jamal Khaer Ibrahim
(Jan 1987 - Nov 1995)
(Allahyarham)

- MSc Sains Reaktor Nuklear & Kejuruteraan, Queen Mary College, University of London, UK, 1981
- BSc (Eng) (Hons) Kejuruteraan Mekanikal, King's College, University of London, UK, 1979

Adnan Bokhari
(Dis 1995 - Jul 2007)

- BSc (Eng) Kejuruteraan Elektrik, University of Arizona, US, 1982

Datin Zarina Masood
(Jul 2007 - Okt 2016)

- MSc Sains Reaktor Nuklear & Kejuruteraan, Queen Mary College, University of London, UK, 1983
- BSc (Hons) Fizik, University of Manchester Institute of Science and Technology, UK, 1982

Dr. Muhammad Rawi Mohamed Zin
(Nov 2016 - Sep 2018)

- Phd Fizik, University of Keele, UK, 2011
- MSc Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Universiti Kebangsaan Malaysia, MY, 2002
- BSc Fizik Gunaan, Universiti Sains Malaysia, MY, 1993

Shaharum Ramli
(Okt 2018 - Nov 2020)

- MSc Mekatronik, University of Lancaster, UK, 1998
- BSc (Hons) Kejuruteraan Mekanikal, Nottingham University, UK, 1984

Dr. Julia Abdul Karim
(Dis 2020 - kini)

- DEng Kejuruteraan Nuklear, Tokyo Institute of Technology, JP, 2016
- MSc Fizik Gunaan, Universiti Malaya, MY, 2008
- BSc Fizik Pengkomputeran dan Elektronik, Universiti Malaya, MY, 2000

08 | Pengendali Reaktor Kanan Bertauliah

Kemudahan RTP mula dilesenkan pada 2007 di bawah LPTA/A/1026 oleh pihak LPTA. Bagi memenuhi syarat lesen, kemudahan RTP perlu mempunyai pengendali reaktor kanan bertauliah yang bertanggungjawab membantu menyelia operasi RTP.

Ahmad Razali Ismail (Allahyarham)

Mohd Fauzi Saad

Roslan Md Dan

Mohd Fairus Abdul Farid

Ridzuan Abdul Mutalib

Tonny Lanyau

Na'im Syauqi Hamzah

Mohd Sabri Minhat

09 | Pengendali Reaktor Bertauliah

Pengendali reaktor bertauliah yang telah berkhidmat di RTP sejak 1982 sehingga kini adalah seperti berikut:

No. Sijil	Nama
0183	Yaziz Yunus
0383	Jamal Khaer Ibrahim
0483	Nahrul Khair Alang Md Rashid
0783	Syed Azmi Syed Ali
0884	Gui Ah Auu
0984	Zarina Masood
1084	Mohammad Suhaimi Kassim
1184	Syed Nahar Syed Hussin
1284	Mohd Amin Sharifuddin Salleh
1385	Abu Bakar Harun
1486	Mohd Fauzi Saad
1587	Shahidan Yob
1687	Mohd Lud Ahmad Tajuddin
1787	Mohd Yusof Dalim
1887	Kanesan Sinnakaruppan
1987	Sherrifah Noor Kamseah Syed Ahmad Idid
2088	Roslan Md Dan
2188	Mohd Ramli Hj Arshad
2288	Hishamuddin Abdul Ghani
2388	Lau How Mooi
2488	Adnan Bokhari
2591	Mislan Mondakir
2791	Ahmad Razali Ismail
2799	Zulkifli Abdul Rahman

0121	Abi Muttaqin Jalal Bayar
0221	Ahmad Nabil Ab. Rahim
0321	Alfred Sanggau Ligam
0421	Hasniyati Md Razi, Dr.
0621	Mat Zin Mat Husin
0721	Mohd Fairus Abdul Farid
0821	Mohd Huzair Hussain
0921	Mohd Sabri Minhat
1021	Muhammad Husamuddin Abdul Khalil
1121	Muhammad Khairul Ariff Mustafa
1221	Na'im Syauqi Hamzah
0521	Norfarizan Mohd Said, Dr.
1321	Nurfarhana Ayuni Joha
1421	Nurhayati Ramli
1521	Ridzuan Abdul Mutalib
1621	Tonny Lanyau
1721	Yahya Ismail
1821	Zaredah Hashim

10 Proses Pentauliahan Pengendali Reaktor

Pentauliahan pengendali reaktor nuklear di Malaysia telah bermula sejak tahun 1984. Proses pentauliahan ini terdiri daripada tiga fasa.

- Fasa pertama, calon pengendali perlu menjalani latihan dalam perkhidmatan sekurang-kurangnya enam bulan secara berterusan.
- Fasa kedua, calon perlu menghadiri kursus latihan pengendali (Reactor Operator Training, ROT) yang merangkumi lima modul, iaitu Modul Asas, Modul Kejuruteraan Reaktor, Modul Peraturan dan Organisasi, Modul Facility Walkthrough dan Modul Latihan Konsol.
- Fasa ketiga, calon pengendali perlu menduduki tiga peperiksaan dengan tahap kesukaran yang sangat tinggi dan markah lulus adalah 80% ke atas.

02 STRUKTUR, SISTEM DAN KOMPONEN RTP

11 | Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP)

Malaysia mempunyai sebuah reaktor nuklear penyelidikan dikenali sebagai Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) yang digunakan untuk tujuan penyelidikan berkaitan teknologi nuklear. Reaktor dari jenis TRIGA ini dikeluarkan oleh Syarikat General Atomics Inc. (GA) yang terletak di Amerika Syarikat. RTP mencapai tahap kegentingan pertamanya pada 28 Jun 1982.

Apa itu reaktor nuklear?

Struktur kebuk di mana tindakbalas nuklear berlaku secara terkawal dan mampan

8 Taburan reaktor nuklear penyelidikan TRIGA di dunia
Sumber: IAEA Research Reactor Database (RRDB)

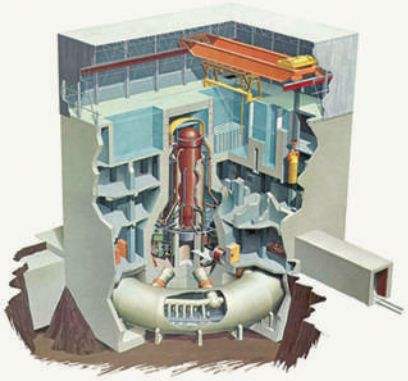
Nota: Nombor pada peta menunjukkan bilangan reaktor penyelidikan di setiap negara

12 | Syarikat General Atomics Inc. (GA)

Syarikat General Atomics Inc. adalah sebuah syarikat yang membekalkan reaktor TRIGA ke seluruh dunia. Sebanyak 66 buah reaktor TRIGA yang dibina di 24 negara telah beroperasi dengan selamat sejak tahun 1950-an. Sehingga tahun 2021, terdapat 37 buah reaktor masih lagi aktif dikendalikan, yang mana sembilan dalam peringkat pembubaran dan 20 telah dinyahtauliah. Reaktor TRIGA mempunyai keupayaan kuasa terma pelbagai skala serendah 0.1 hingga 14 megawatt-terma bergantung kepada fungsi sesebuah reaktor tersebut. RTP mempunyai keupayaan tenaga maksimum 1 megawatt-terma dilengkapi dengan kemudahan untuk latihan dan penyelidikan.

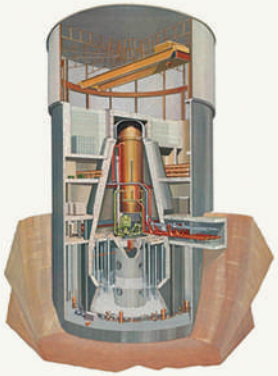
13 | Pengkelasan TRIGA

Reaktor penyelidikan yang dibina di Nuklear Malaysia adalah jenis TRIGA Mark II dan juga merupakan reaktor jenis kolam.
Tiga pengkelasan utama reaktor penyelidikan TRIGA yang dihasilkan oleh Syarikat GA adalah:



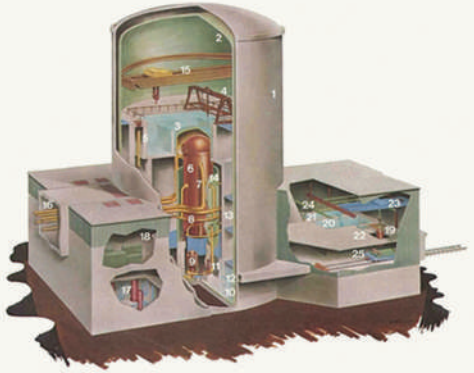
Mark I

Teras reaktor dibina di bawah tanah tanpa kemudahan alur neutron



Mark II

Teras reaktor dibina di atas permukaan tanah dengan kemudahan alur neutron



Mark III

Teras reaktor boleh-gerak dibina di atas permukaan tanah dengan kemudahan alur neutron

Training
Reactor
Isotope production
General
Atomic

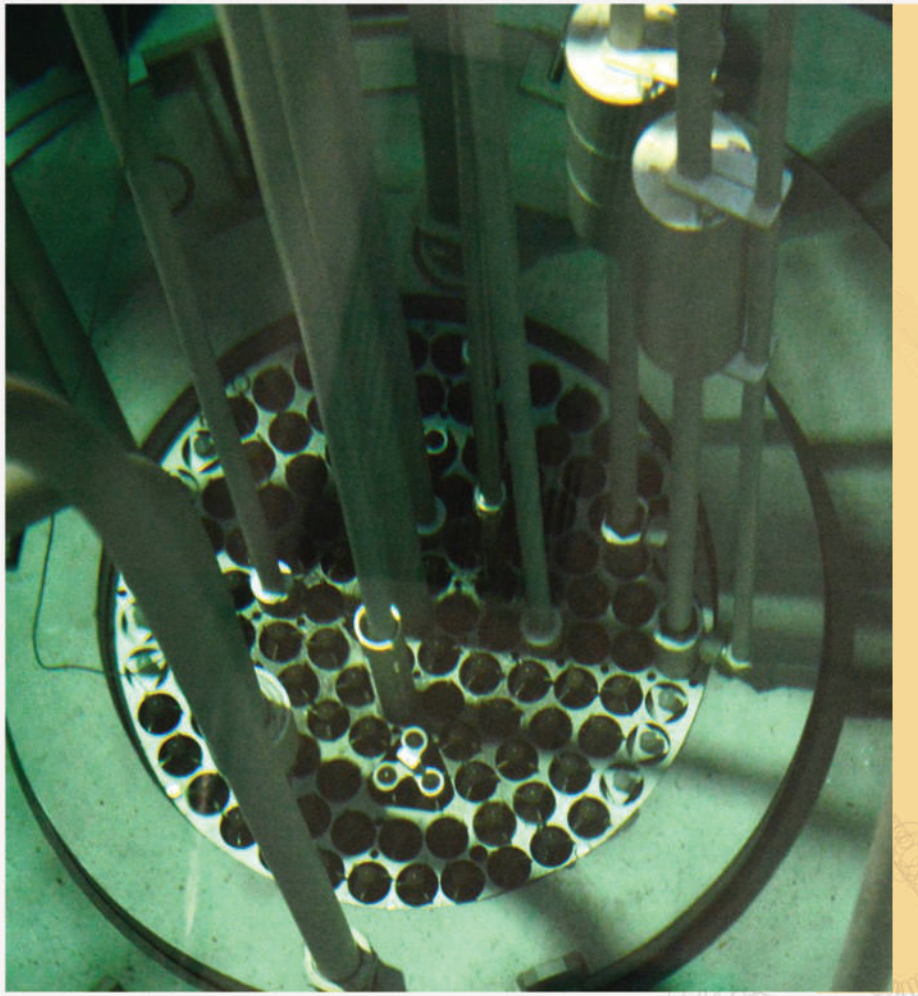
14 | Maksud TRIGA

TRIGA ialah singkatan kepada gabungan tiga kegunaan utamanya iaitu latihan dan pembelajaran (*Training*), penyelidikan (*Research*) dan pengeluaran isotop (*Isotope production*) serta syarikat pembekalnya iaitu Syarikat GA.

15 | Struktur Bangunan RTP

Teras reaktor dan kemudahan penyelidikan dikelilingi oleh struktur perisai biologi yang diperbuat daripada konkrit berbentuk heksagon (dari pandangan atas). Perisai biologi ini terdiri daripada konkrit jenis barite berketumpatan tinggi, air dan pembalik grafit. Jejari ketebalan konkrit adalah 2.3 meter, air 0.46 meter dan grafit 0.26 meter. Struktur perisai konkrit mempunyai ketinggian 6.5 meter. Fungsi utamanya adalah menghalang sinaran dari terbebas ke persekitaran. Struktur bangunan RTP dibina dengan keupayaan menahan pecutan seismik sekurang-kurangnya 0.3g menegak dan 0.6g mendatar.

Pandangan sisi perisai biologi



Teras RTP

16 Teras RTP

Teras RTP merupakan sebuah kebuk yang boleh memuatkan 127 bahan api uranium dan empat batang rod kawalan bagi membolehkan proses pembelahan atom berlaku secara terkawal. Kesemua bahan api dan rod kawalan disusun dalam teras dalam keadaan menegak di antara pemegang atas dan bawah dalam grid berbentuk enam bulatan sepusat. Teras reaktor terletak pada bahagian paling tengah tangki reaktor dan berada 5.0 meter di bawah paras air.

17 Bahan Api RTP

Umumnya, bahan nuklear yang digunakan sebagai bahan api di dalam reaktor adalah uranium, plutonium atau torium. Bahan api RTP terdiri daripada uranium dan zirkonium hidrat ($UZrH_{1.6}$) dengan tiga jenis peratusan berat uranium yang berbeza iaitu 8.5wt%, 12wt% dan 20wt%. Bahan api nuklear ini berbentuk silinder dengan diameter 3.65 cm dan panjang keseluruhan 75.2 cm. Kelongsong bahan api diperbuat daripada keluli tahan karat yang mempunyai toleransi haba yang tinggi.

Bahan api RTP

18 Pengayaan Bahan Api

Mineral uranium mempunyai kelimpahan semulajadi sebanyak 99.7% atom U-238 dan 0.3% atom U-235 di persekitaran. Hanya atom U-235 yang boleh digunakan sebagai bahan api nuklear. Namun begitu, nilai kelimpahan sebanyak 0.3% tidak mencukupi menjadikannya sebagai bahan boleh belah (*fissile material*) dan perlu melalui proses pengayaan. Bahan api RTP menggunakan U-235 yang telah diperkaya sebanyak 19.99%.

19 Ciri Unik Bahan Api UZrH

Rod ZrH di dalam bahan api UZrH berfungsi sebagai pelambat neutron yang akan bergetar pada suhu tinggi. Apabila suhu semakin tinggi, kesan *negative reactivity temperature coefficient* menjadi semakin besar.

Ini bermakna proses tindakbalas berantai yang membentuk haba akan berkurangan dengan sendirinya disebabkan oleh kesan Doppler. Oleh itu, populasi neutron di dalam teras berkurangan, dan paras kuasa reaktor menjadi rendah serta menjadikan reaktor lebih selamat untuk dikendalikan.

Model bahan api RTP

20 Rod Kawalan

Bahan penyerap neutron yang digunakan sebagai rod kawalan adalah boron, hafnium, argentum, cadmium atau lain-lain. RTP menggunakan *boron carbide* (B_4C) untuk mengawal tindak balas pembelahan nuklear di dalam teras reaktor. RTP menggunakan dua jenis rod kawalan, iaitu *air follower* dan *fuel follower.*

21 *Air Follower*

Rod kawalan jenis *air follower* mengandungi 38.1 cm B_4C dan 53.02 cm udara. Hanya sebatang rod kawalan jenis ini digunakan dalam teras RTP. Kelongsong *air follower* diperbuat daripada aluminium. Fungsi utama rod ini adalah untuk menaik dan menstabil paras kuasa reaktor dengan pantas. *Air follower* berupaya melonjak naik sehingga ke ketinggian maksimum yang membolehkan paras kuasa reaktor mencapai ~1.2 gigawatt terma dalam masa ~3 milisaat.

22 *Fuel Follower*

Rod kawalan jenis *fuel follower* mengandungi 38.1 cm B_4C, 38.1 cm bahan api UrZH, dan 14.92 cm udara pada kedua-dua rod kawalan. Kelongsong *fuel follower* diperbuat daripada keluli tahan karat 304. RTP menggunakan tiga batang rod kawalan jenis ini untuk mengawal paras kuasa reaktor. Semua rod kawalan (*air* dan *fuel follower*) dikawal dari bilik kawalan reaktor.

23 Mekanisma Rod Kawalan

Semasa kendalian reaktor, paras kuasa akan meningkat apabila rod kawalan dinaikkan secara perlahan dari dalam teras. Ini membolehkan neutron yang terhasil daripada tindak balas pembelahan dikawal. Manakala, paras kuasa reaktor akan berkurang apabila rod kawalan diturunkan ke dalam teras kerana bilangan neutron terhasil akan diserap oleh boron.

Gambaran mekanisma rod kawalan

Motor pandu rod kawalan diatas pelan reaktor

24 Elemen Bahan Api Berinstrumen

Suhu teras reaktor diukur menggunakan Elemen Bahan Api Berinstrumen (*Instrumented Fuel Element*-IFE) yang dilengkapi dengan *thermocouple*. IFE di diletakkan di kedudukan yang paling panas yang berupaya mengukur suhu maksimum bahan api berdasarkan konfigurasi teras reaktor. Di RTP, terdapat dua IFE digunakan untuk tujuan pengukuran suhu.

Elemen bahanapi berinstrumen

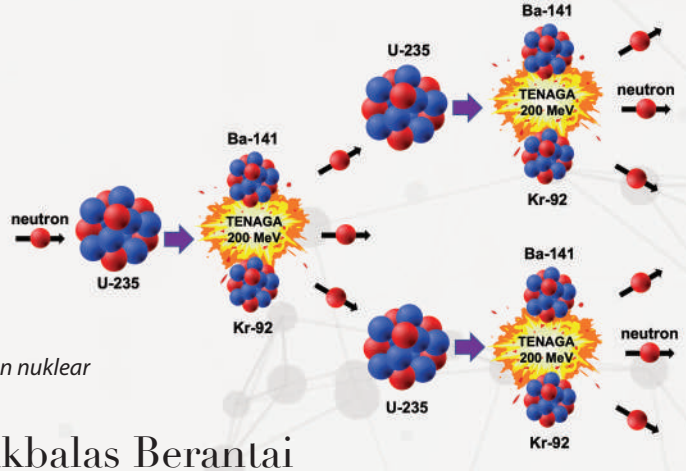
25 Kebuk Pembelahan Neutron

Paras kuasa reaktor diukur menggunakan tiga kebuk pembelahan neutron yang ditempatkan di tepi teras. Kebuk ini mengandungi gas nitrogen dengan salutan nipis uranium-235.

Neutron terma yang melalui kebuk akan diserap oleh atom uranium-235. Serpihan pembelahan akan mengionkan nitrogen dalam kebuk dan kadar penghasilan ion ini adalah bersamaan bilangan neutron terma yang dijanakan. Oleh itu, bilangan bacaan neutron di dalam kebuk mewakili bacaan paras kuasa reaktor. Bacaan ini dipaparkan pada panel konsol di bilik kawalan reaktor.

26 Pembelahan Nuklear

Proses pembelahan nuklear merupakan tindak balas di mana apabila satu neutron diserap oleh nukleus yang berjisim besar dan membelah menjadi dua nukleus yang lebih kecil dan ringan. Di RTP, proses pembelahan berlaku apabila atom uranium-235 menyerap satu neutron dan menghasilkan dua atau tiga neutron baharu, produk pembelahan dan juga pembebasan haba.



Pembelahan nuklear

27 Tindakbalas Berantai

Dua atau tiga neutron baharu yang terhasil semasa proses pembelahan nuklear seterusnya akan membelah lebih banyak atom uranium yang lain dan berlaku secara berterusan. Fenomena tindak balas berterusan ini dinamakan sebagai tindak balas berantai nuklear (*chain reaction*). Neutron yang dihasilkan digunakan untuk pelbagai tujuan penyelidikan dan pembangunan sains dan teknologi nuklear di negara kita.

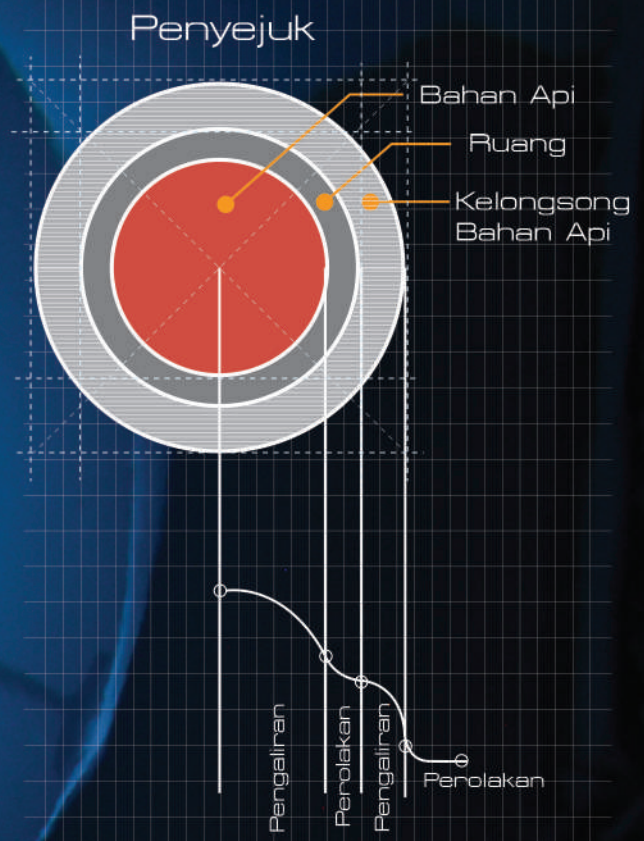
28 Sinar Cherenkov

Sinar Cherenkov merupakan cahaya kebiruan yang dihasilkan oleh zarah bercas apabila ia melalui medium telus optik pada kelajuan yang lebih besar daripada kelajuan cahaya dalam medium tersebut. Sinaran ini boleh dilihat pada air di dalam teras semasa RTP beroperasi.

29 Haba

Haba yang dijana melalui tindakbalas pembelahan nuklear akan memanaskan air di dalam kolam yang kemudiannya disejukkan melalui sistem penyejukan reaktor. Keupayaan tenaga RTP adalah rendah iaitu 1 megawatt-terma. Oleh itu, haba yang dihasilkan tidak mencukupi untuk menjaga tenaga elektrik. Sebaliknya, haba yang dihasilkan terbebas ke persekitaran dewan reaktor.

Cahaya kebiruan menunjukkan sinar Cherenkov dari teras RTP



Mekanisma pemindahan haba

30 Mekanisme Pemindahan Haba

Mekanisma pemindahan haba di RTP berlaku melalui proses pengaliran dan perolakan. Haba dipindahkan ke permukaan kelongsong bahan api melalui proses pengaliran, dan seterusnya dipindahkan ke air kolam melalui proses perolakan. Ini akan menyebabkan suhu air kolam meningkat dan haba perlu disingkirkan melalui sistem penyejuk.

31 Sistem Penyejuk

RTP dilengkapi dengan sistem penyejuk primer dan sekunder. Sistem penyejuk primer mengalihkan haba dari kolam reaktor melalui penukar haba. Manakala, sistem sekunder menarik haba dari penukar haba ke menara penyejuk. Air yang disejukkan dialirkan semula ke dalam kolam reaktor bagi membentuk satu kitaran yang lengkap dan tertutup (*close cycle*). RTP menggunakan air yang dinyahmineral dan masih menggunakan air yang sama sejak mula beroperasi sehingga ke hari ini.

32 Peranan Air Nyahmineral

Air nyahmineral digunakan sebagai bahan penyejuk di RTP. Selain bertindak sebagai bahan penyejuk, air nyahmineral ini juga berfungsi sebagai bahan pelambat neutron yang bertenaga tinggi. Dalam masa yang sama, air ini bertindak sebagai pelindung biologi yang akan melemahkan kesan sinaran yang terhasil dari dalam teras reaktor.

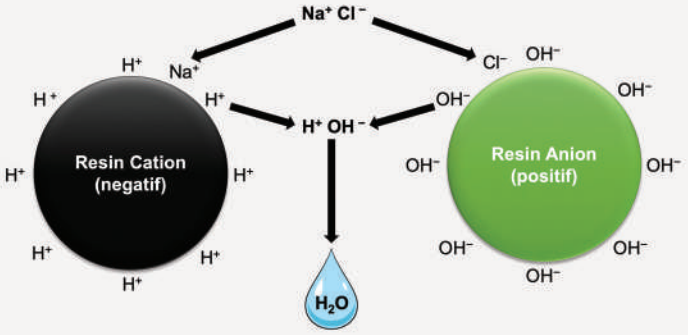
33 Sistem Penulenan Air

Sistem Penulenan Air berfungsi untuk mengekalkan kekonduksian air yang rendah bagi meminimakan kesan pengaratan ke atas komponen reaktor terutamanya bahan api nuklear di dalam teras. Selain itu, sistem ini juga bertindak mengurangkan keradioaktifan air dengan menyingkir hampir kesemua partikel dan bendasing terlarut melalui penyahmineral yang mengandungi resin. Dalam masa yang sama, mengekalkan kejelasan optik air di dalam kolam reaktor.

34 Resin

RTP menggunakan resin jenis Amberlite IRN150 sebagai bahan penyahmineral air. Resin ini berfungsi sebagai media pertukaran ion yang mengandungi campuran ion H+ dan ion OH- di dalam Sistem Penulenan Air. Ion H+ dan OH- ini akan menarik kation dan anion yang terhasil daripada proses pembelahan nukleus atau bahan-bahan yang teraktif. Proses penarikan ion menyebabkan air dinyahmineral dan menjadi neutral.

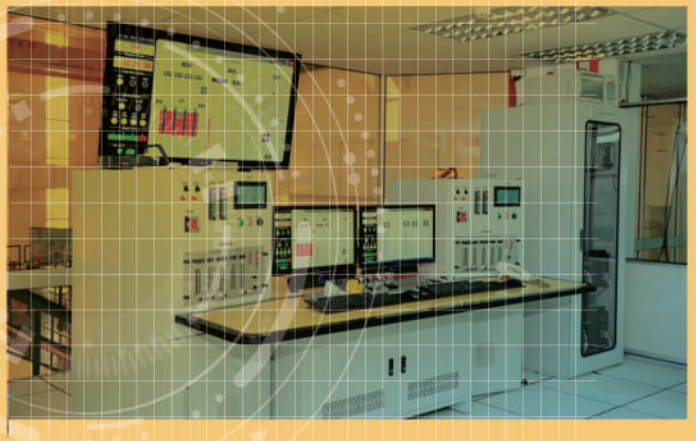
Amberlite IRN150



Skematik penukaran ion oleh resin

35 Instrumentasi dan Kawalan RTP

Pemantauan dan paparan parameter reaktor seperti fluks neutron, paras kuasa reaktor, suhu bahan api, suhu air pukal, kedudukan rod kawalan, kadar peningkatan kuasa dan lain-lain yang berkaitan dikawal oleh sistem instrumentasi dan kawalan. Sistem ini juga berupaya melindungi reaktor daripada keadaan tidak normal yang boleh mengakibatkan kemalangan. Sekiranya berlaku sebarang tindak balas luar biasa, sistem logik perlindungan akan menjana isyarat kecemasan untuk menurunkan semua rod kawalan ke dalam teras reaktor.



03 PENGURUSAN 3S

Safety, Security, Safeguard (3S)

Prinsip 3S digunapakai di RTP sebagai tindakan perlindungan bagi mengurangkan risiko sinaran melalui amalan pengurusan keselamatan, sekuriti dan kawalselia semenjak 1982.

Dokumen Safety Analysis Report RTP merupakan rujukan utama pemakaian prinsip 3S di RTP.

36 Keselamatan

Prinsip asas keselamatan yang melibatkan semua aktiviti nuklear adalah melindungi manusia dan alam sekitar daripada kesan bahaya sinaran mengion dalam semua keadaan yang mendatangkan risiko. Prinsip ini dinyatakan secara jelas di dalam *IAEA Safety Standards No. SF-1: Fundamental Safety Principles*. RTP mengamalkan asas keselamatan secara menyeluruh di dalam semua aktivitinya termasuk pengurusan, penyenggaraan, pemantauan dan lain-lain.

37 Perlindungan Fizikal

Prinsip asas sekuriti nuklear adalah untuk melindungi bahan nuklear dan radioaktif atau kemudahan yang berkaitan dengannya daripada sebarang tindakan yang disengajakan (kecurian, sabotaj, akses tanpa kebenaran, pemindahan haram atau perbuatan berniat jahat) yang boleh membahayakan kesihatan dan keselamatan orang awam atau alam sekitar. Pendekatan yang digunakan adalah penghalangan, pengesanan, penafian, penangguhan dan pertahanan.

38 Kawalgunaan Nuklear

Objektif kawalgunaan nuklear adalah untuk mengesan sebarang lencongan terhadap kuantiti bahan api nuklear bagi menjalankan aktiviti pembuatan senjata atau tujuan tidak diketahui yang boleh mendatangkan risiko serta membahayakan kesihatan dan keselamatan orang awam atau alam sekitar. Penggunaan bahan api nuklear dan radioaktif di RTP disemak dan dikawal selia melalui sistem perakaunan dan kawalan oleh pihak IAEA dan AELB. Pemeriksaan pertama perakaunan dan kawalan bahan api RTP oleh IAEA di bawah NPT pada 22 November 1982.

39 Pengurusan Penuaan

Struktur, sistem dan komponen RTP menunjukkan kesan penuaan yang ketara setelah empat dekad beroperasi. Walau bagaimanapun, pencegahan dan pengurangan kesan penuaandapat dicapai dengan pelaksanaan program pengurusan penuaan reaktor. Antara aktiviti yang terlibat di bawah program ini adalah seperti penyenggaraan berkala, pemantauan dan pemeriksaan RTP melalui *in-service inspection* (ISI).

Di samping itu, pelaksanaan pelbagai projek peremajaan juga telah dapat memastikan RTP kekal dalam keadaan baik dan selamat untuk operasi berterusan.

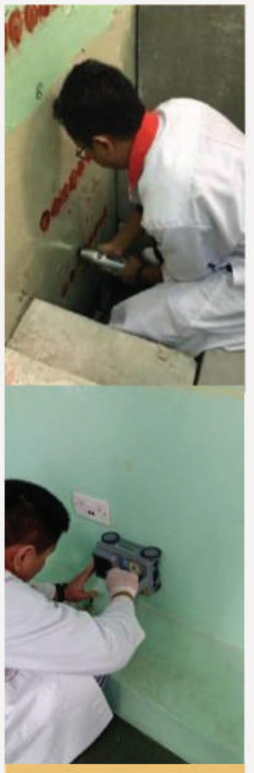
40 Penyenggaraan Berkala

Penyenggaraan dan pemeriksaan dilakukan secara berkala, dua kali setahun (separa dan tahunan) bagi memenuhi syarat lesen LPTA/A/1026. Tempoh penyenggaraan separa dilaksanakan selama dua minggu dan penyenggaraan tahunan selama empat minggu. Penyenggaraan dilakukan bagi memastikan struktur, sistem dan komponen (SSC) reaktor mematuhi had dan syarat operasi yang ditetapkan. Pengoperasian RTP dihentikan semasa penyenggaraan berlangsung dan tiada khidmat penyinaran dijalankan.

41 Pengurusan Teras RTP

Bahan api nuklear disusun secara sistematik di dalam teras reaktor bagi mendapatkan nilai fluks yang optimum untuk khidmat penyinaran. Pengurusan teras dilakukan bagi mengimbang penggunaan bahan api pada setiap kitaran operasi RTP. Sebanyak 15 kitaran (*Begin-of-cycle-to-End-of-Cycle*, BOC-EOC) pengurusan teras dilakukan sejak RTP mula beroperasi. Purata jangka hayat bahan api dijamin selama 50 tahun oleh pihak pengeluar, bergantung kepada penggunaannya, sehubungan itu penjagaan bahan api menerusi pengurusan teras yang baik mampu memanjangkan jangka hayatnya sehingga 60-65 tahun. Kod neutronik seperti TRIMON, TRIGLAV dan MCNP digunakan dalam pengurusan teras RTP.

Penyenggaraan RTP

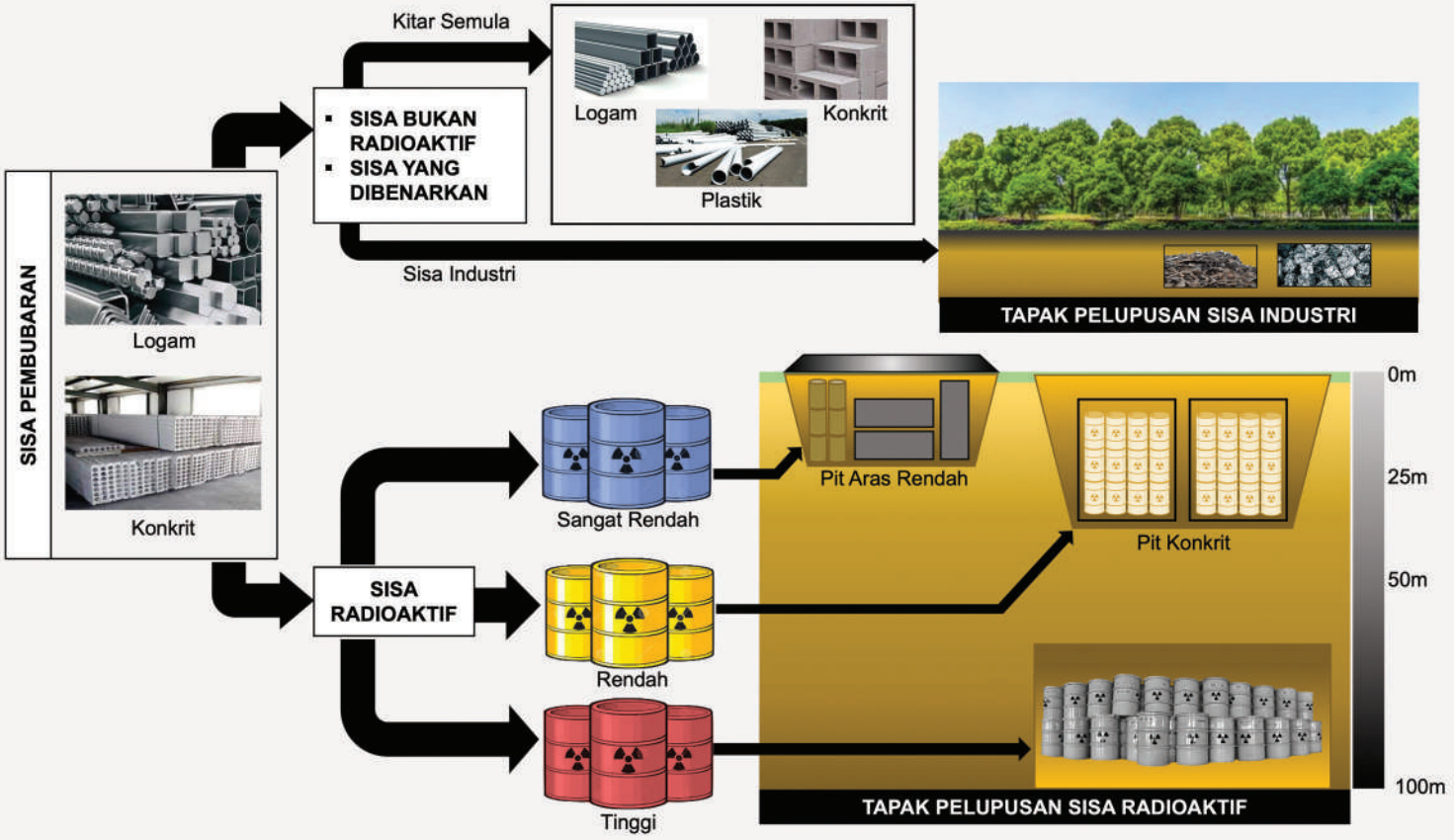


Pemeriksaan permukaan perisai konkrit menggunakan UPV

Pemeriksaan termal paip menara penyejuk menggunakan infrared tomography

42 *In-Service Inspection* (ISI)

Kaedah *in-service inspection* (ISI) digunapakai dalam pengurusan penuaan SSC RTP. Pemeriksaan ini dilakukan bagi mengenalpasti, dan melihat kondisi pengaratan, kakisan, stres terma, kelesuan (*fatigue*), dan kesan penuaan yang lain. Antara kaedah yang digunakan adalah, pemeriksaan secara ultrasonik, *visual, ultra-pulse velocity* (UPV), *boroscopy, liquid penetrant test, infrared tomography.*



Ilustrasi pengurusan sisa radioaktif

43 Pengurusan Sisa Radioaktif RTP

Pengurusan sisa radioaktif adalah untuk memastikan sisa yang dijana daripada operasi dan penggunaan RTP dilupuskan dengan cara yang selamat dan betul supaya tidak mendatangkan potensi bahaya sinaran kepada manusia dan persekitarannya. Sisa radioaktif dilupuskan mengikut piawaian keselamatan IAEA. Sisa radioaktif RTP terdiri daripada pepejal (contoh: resin, penapis udara, pakaian tercemar, tisu, barang kaca), cecair (contoh: air yang digunakan untuk mencuci peralatan, dan pakaian yang tercemar), dan gas (contoh: sisa bawaan udara termasuk gas radioaktif, wap dan zarah). Sisa pepejal berjangka hayat rendah dikumpul di dalam tong kuning, manakala sisa cecair di kumpul di dalam pit bawah tanah sebelum dihantar ke Pusat Pengurusan Sisa Agensi Nuklear Malaysia.

Tong kuning sisa radioaktif

44 Pelan Penyahtauliahan

Reaktor penyelidikan atau reaktor kuasa nuklear, akan mengalami fasa pembubaran di akhir kitaran operasi. Oleh itu, pelan penyahtauliahan diperlukan bagi memastikan proses pembubaran reaktor berlaku secara selamat dan terancang agar tidak membebankan generasi akan datang.

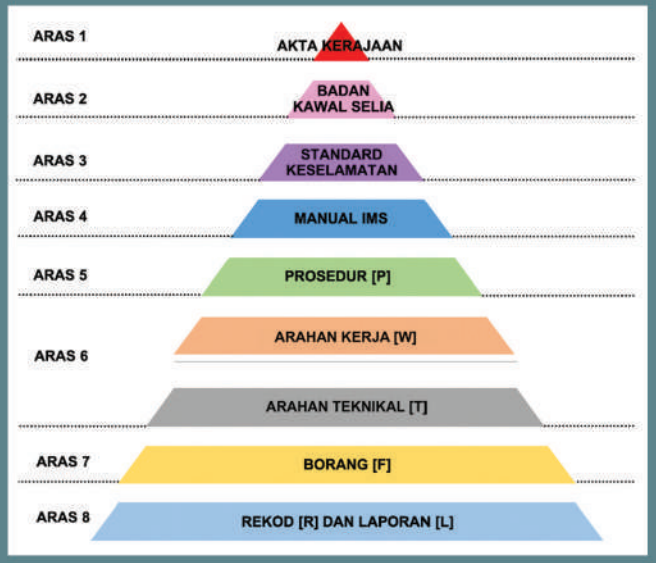
Secara umumnya, Pelan Penyahtauliahan RTP mengandungi :

- Strategi pembubaran dan pelupusan bahan radioaktif
- Kos pembubaran dan pelupusan
- Inventori dan analisa bahan nuklear dan radioaktif
- Pemantauan radiologi
- Sistem pengurusan radioaktif dan bahan api nuklear terpakai.

45 Pemantauan Parameter Operasi

Pemantauan parameter operasi dijalankan untuk memastikan SSC berada dalam keadaan optimum. Antara aktiviti yang terlibat adalah ujian dan pemeriksaan terhadap sistem pemantauan pelepasan paras radiasi (*stack*), pemantauan kimia dan kekonduksian air, sistem penyejuk utama dan sekunder, sistem bebanan elektrik, sistem kawalan REDICS dan lain-lain.

Ini bertujuan bagi memastikan pematuhan terhadap had dan syarat operasi (OLC) serta mengesan keadaan abnormal. Melalui pemantauan, keadaan abnormal dikesan berdasarkan analisa prestasi, keupayaan dan ketidakcekapan peralatan atau komponen.



Ilustrasi data berperingkat didalam IMS-RTP

46 Sistem Pengurusan Bersepadu (IMS)

Sistem Pengurusan Bersepadu merupakan manifestasi perancangan dan pengurusan RTP mengandungi pendekatan dan strategi ke arah operasi RTP yang selamat, cekap dan berkesan. IMS-RTP dibangun dengan berpandukan dokumen IAEA dan mempunyai lapan aras struktur kepentingan yang menyepadukan polisi, objektif (keselamatan, kesihatan, alam sekitar, sekuriti, kualiti), kewangan, dan latihan.

47 Lesen RTP

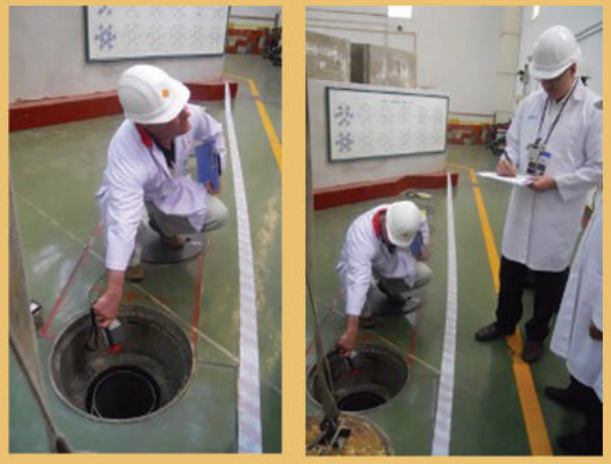
Akta Perlesenan Tenaga Atom (Akta 304) diwartakan pada 1984 bagi mengadakan peruntukan terhadap kawalseliaan dan kawalan tenaga atom. Akta ini dikuatkuasa dua tahun selepas pentauliahan RTP. Lesen LPTA/A/1026 mula dikuatkuasakan mulai 2007 dengan mengambilkira saranan IAEA terhadap fasiliti nuklear. Lesen ini perlu diperbaharui setiap tiga tahun dan pembaharuan dibuat secara dalam talian melalui Sistem Perlesenanan dan Penguatkuasaan (eSPP) LPTA.

Log masuk Sistem SPP

Contoh Lesen RTP

1st IPPAS, April 2016

INSARR, April 2014



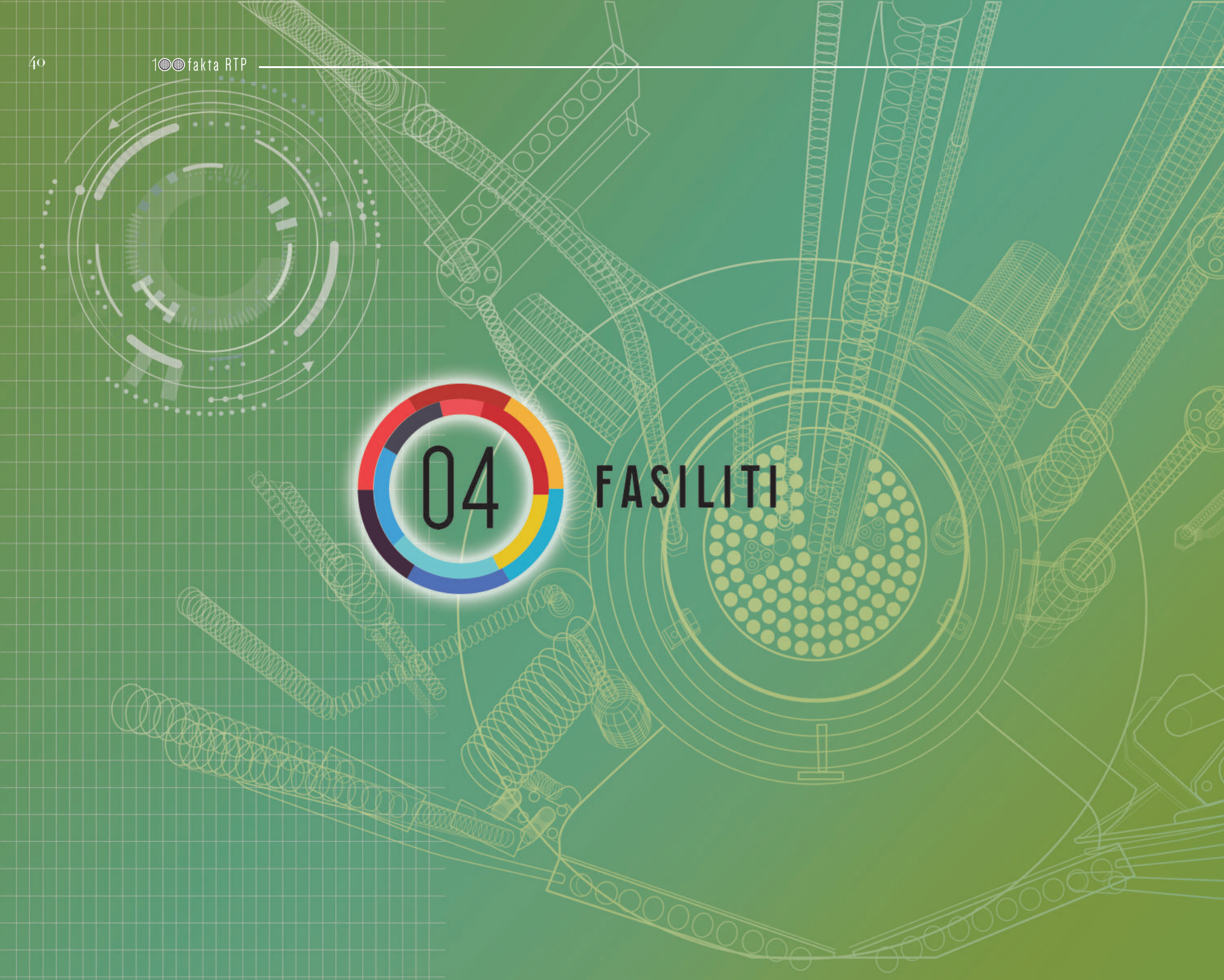
Pemeriksaan kawal gunaan oleh IAEA, November 2018

48 Misi Pakar IAEA terhadap Penilaian Keselamatan, Sekuriti dan Kawal gunaan di RTP

RTP menerima misi pakar untuk penilaian keselamatan, sekuriti dan kawal gunaan dari semasa ke semasa. Ini menunjukkan ketersediaan dan komitmen yang tinggi terhadap pengurusan keselamatan operasi reaktor di peringkat kebangsaan dan antarabangsa. Antara misi pakar IAEA ke RTP tersebut adalah:

1. *International Physical Protection Advisory Service* (IPPAS)
2. *Integrated Nuclear Security Support Plan* (INSSP)
3. *International Nuclear Security Advisory Service* (INSServ)
4. *Integrated Safety Assessment of Research Reactors* (INSARR)
5. *Occupational Radiation Protection Appraisal Service* (ORPAS)
6. IAEA *Safeguard and State System Accounting and Control* (SSAC) *Advisory Service* (ISSAS)

Dalam setiap misi pakar tersebut, pihak RTP perlu bersedia untuk mengemukakan bukti pengurusan keselamatan reaktor berada di tahap optimum. Pakar IAEA akan memberi cadangan penambahbaikan sekiranya didapati amalan pengurusan keselamatan reaktor tidak mencapai keperluan minima.



04 FASILITI

49 | Fasiliti Penyinaran Neutron

RTP dilengkapi beberapa fasiliti penyinaran neutron di dalam dan luar teras reaktor. Fasiliti penyinaran direka bentuk untuk memanfaatkan sumber neutron khususnya dalam bidang nuklear, sains dan kejuruteraan (NSE). Selain itu, RTP juga mempunyai makmal penyelidikan yang digunakan untuk menyokong aktiviti penyelidikan dan pembangunan di RTP.

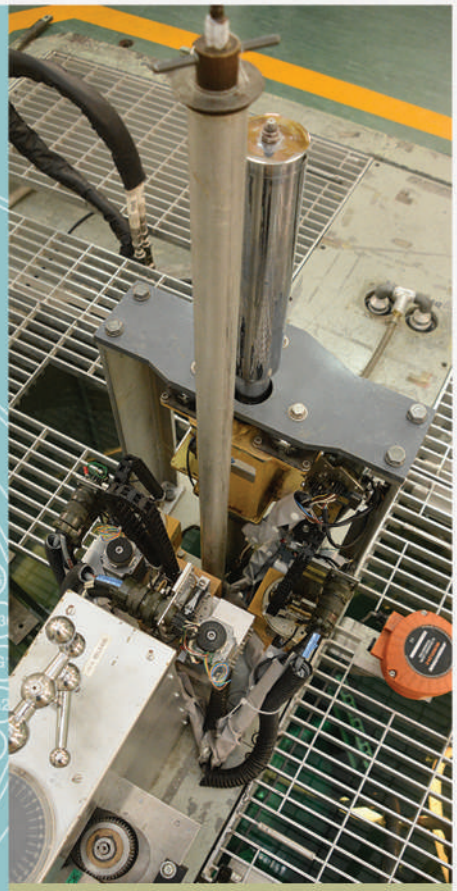
50 | Penyinaran Dalam Teras

Fasiliti penyinaran neutron di dalam teras reaktor mempunyai nilai fluks neutron yang berbeza bagi kajian unsur dan pembentukan radioisotop. Fasiliti yang tersedia adalah:

1. Jidal Tengah (*Central Thimble*)
2. Tiub Kering (*Dry Tube*)
3. Sistem Pemindah Pneumatik (*Pneumatic Transfer System*)
4. Rak Berputar (*Rotary Rack*)
5. Analisa Pengaktifan Neutron Tertunda (*Delayed Neutron Activation Analysis)*
6. Sistem Penghasilan Isotop *(Isotope Production System*)
7. Lubang Eksperimen berdiameter 1 cm (*Irradiation Channel)*
8. Plat 3-segi boleh alih (*Removable Triangular Plate*)
9. Plat 6-segi boleh alih (*Removable Hexagonal Plate*)

51 | Jidal tengah (CT)

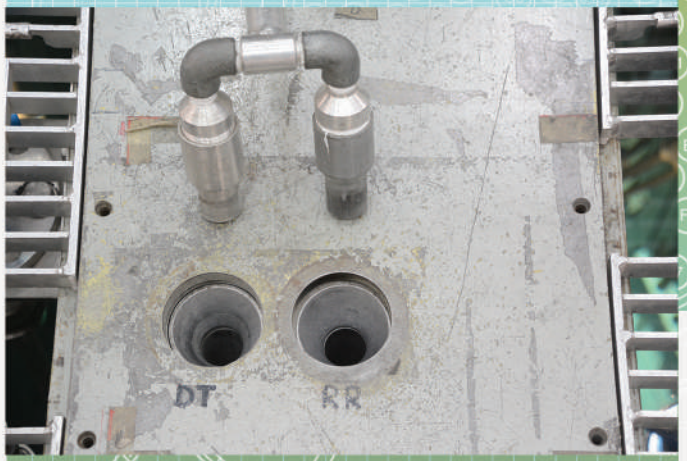
Jidal tengah (*CT*) adalah tiub aluminium kosong bergaris pusat 3.38 cm yang dipenuhi air. CT terletak di bahagian tengah teras hingga ke pelantar reaktor. CT digunakan untuk penyinaran sampel bersaiz kecil pada medan neutron yang paling maksimum. Sampel yang disinarkan mestilah dimasukkan ke dalam bekas kedap air. Air yang memenuhi ruang CT boleh dikeluarkan sekiranya penyinaran sampel di dalam keadaan kering hendak dilakukan.



Jidal tengah

52 Tiub Kering (DT)

Tiub Kering (DT) berada di dalam teras reaktor yang dipenuhi air, walaubagaimanapun, kemudahan DT kekal berada dalam keadaan kering untuk penyinaran sampel yang memerlukan fluks neutron sederhana tinggi. DT juga boleh digunakan untuk penyinaran sampel flora, fauna, makanan, air dan lain-lain. Selain itu, fasiliti ini seringkali digunakan untuk penghasilan radioisotop berjangka hayat rendah.



Lubang DT dipelantar reaktor

53 Sistem Pemindah Pneumatik (PTS)

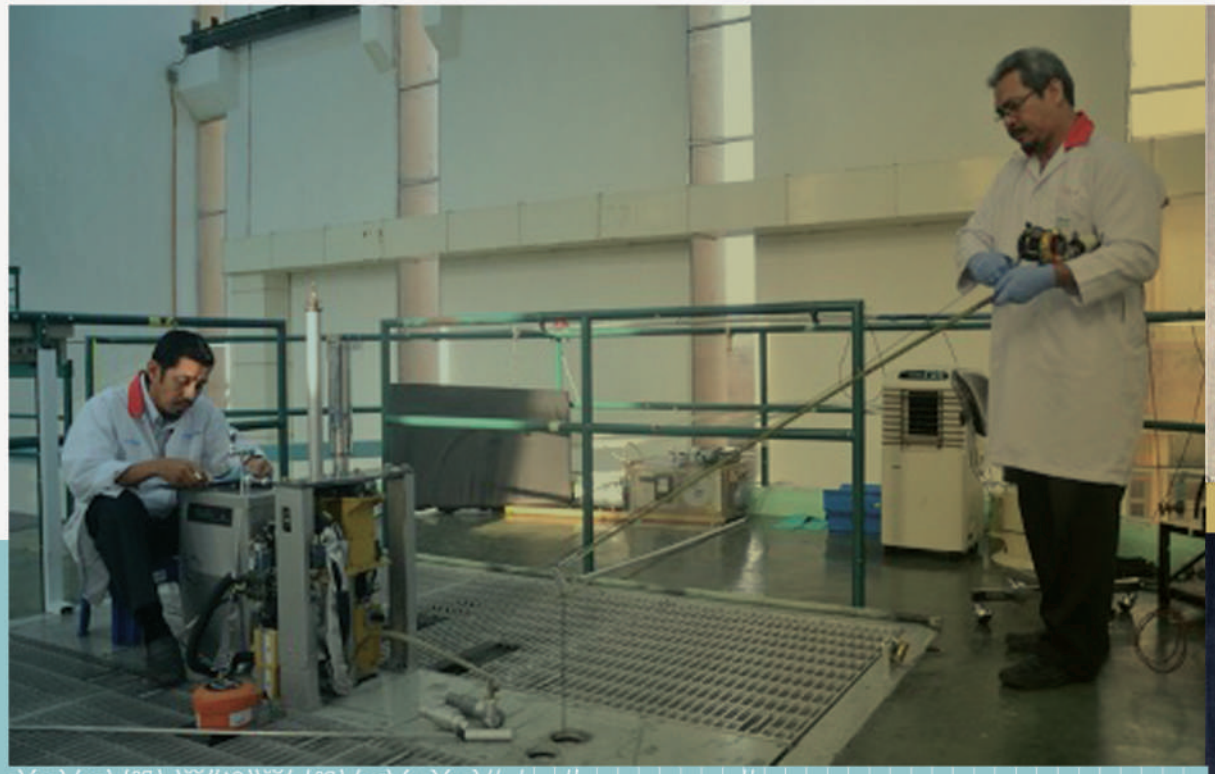
Sistem Pemindah Pneumatik (PTS) digunakan untuk kajian pengaktifan neutron dengan tempoh penyinaran yang singkat. Jangka masa penyinaran boleh ditetapkan dari beberapa saat hingga ke beberapa minit. Sistem PTS terdiri daripada paip yang menyambungkan bilik pneumatik kepada satu lokasi penyinaran di dalam teras reaktor. PTS dikendalikan menggunakan konsep perbezaan tekanan udara.

Kebuk wasap

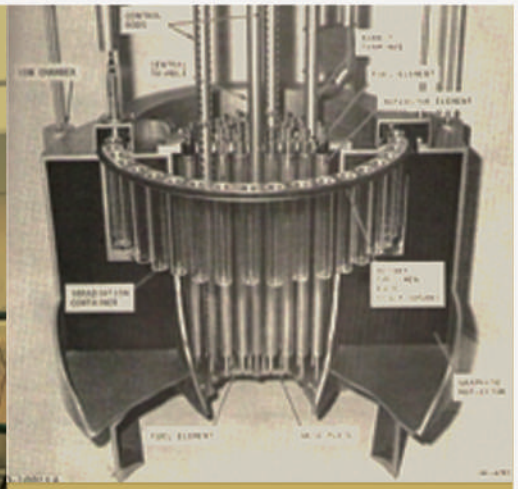
Stesen sistem pemindah pneumatik didalam kebuk wasap

Bekas sampel dan tiub penyinaran PTS

Stesen penghantar/penerima sampel di tempatkan dalam kebuk wasap yang terletak di bilik pneumatik. Sampel penyinaran perlu dimasukkan terlebih dahulu ke dalam bekas sampel (*sample vial*). Bekas ini kemudiannya ditutup kedap dan dimasukkan ke dalam tiub penyinaran TRIGA.



Batang kail khas yang digunakan untuk memasukkan dan mengeluarkan sampel RR



Rak Berputar

Tiub penyinaran RR

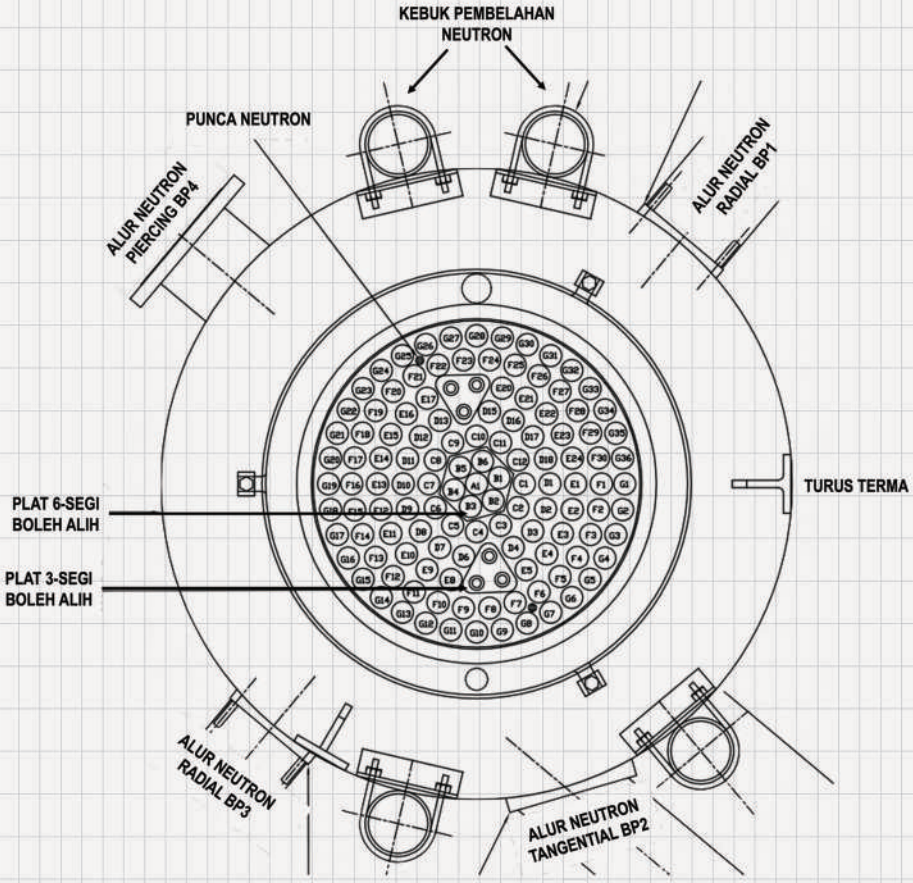
54 Rak Berputar (RR)

Rak berputar (RR) digunakan untuk kajian pengaktifan neutron dengan tempoh penyinaran yang sederhana dan panjang. Jangka masa penyinaran boleh ditetapkan dari beberapa minit hingga ke beberapa jam. RR yang terletak di dalam pembalik grafit di sekeliling teras reaktor, mengandungi 40 lubang penyinaran yang boleh menempatkan 79 sampel. Sampel penyinaran hendaklah dimasukkan ke dalam bekas sampel yang ditutup kedap dan kemudian dimasukkan pula ke dalam tiub penyinaran TRIGA. Batang kail khas digunakan untuk mengeluarkan sampel dari RR. Rak ini dipusing secara manual menggunakan dial atau menggunakan motor elektrik dengan kelajuan satu pusingan seminit. RR akan berputar secara berterusan di sepanjang tempoh penyinaran, menyebabkan kesemua sampel terdedah kepada fluks neutron sekata.

55 Sistem Analisa Pengaktifan Neutron Tertunda (DNAA)

Sistem Analisa Pengaktifan Neutron Tertunda (DNAA) dipasang pada 7 Mei 1986. Fasiliti ini berkeupayaan untuk melakukan analisis kuantitatif uranium dan torium secara serentak dengan kemampuan mengesan kepekatan unsur sehingga unit bahagian per bilion (ppb).

Sebanyak 160 sampel boleh dimuatkan dalam modul penyinaran. Sistem kawalan automatik digunakan untuk memasukkan sampel ke dalam teras reaktor. Sehingga kini, lebih dari 20,000 sampel geologi seperti enap cemar minyak dan sisa perlombongan telah disinar menggunakan DNAA.



39. Susun atur fasiliti penyinaran dalam teras teras RTP

56 Lubang Eksperimen Berdiameter 1 cm

Pada permukaan plat grid di atas teras RTP terdapat sepuluh lubang eksperimen berdiameter 1 cm. Selain daripada menempatkan punca neutron *Americium Beryllium*, lubang eksperimen ini juga digunakan untuk mengkaji profil neutron di dalam teras. Radas yang sering digunakan di fasiliti ini terdiri daripada rod aluminium berukuran 72.1 cm tinggi dan 0.8 cm diameter.

57 Plat Tiga Segi dan Enam Segi Boleh Alih

Plat tiga segi dan enam segi boleh alih merupakan fasiliti penyinaran di dalam teras untuk dedahan neutron berfluks tinggi. Plat tiga segi boleh menampung sampel berdiameter sehingga 6 cm dan ketinggian sehingga 68 cm, manakala plat enam segi boleh menampung sampel berdiameter sehingga 11 cm dan ketinggian 68 cm sekiranya dialihkan.

Penggunaan kedua-dua plat penyinaran ini memerlukan pemindahan rod bahan api supaya ruang kosong yang ditinggalkan dapat diisi dengan sampel. Walau bagaimanapun, proses penukaran ini akan memberi impak besar kepada nilai kemasukan reaktiviti reaktor. Oleh itu, penilaian teliti perlu dilakukan sebelum eksperimen dijalankan bagi memastikan semua keperluan operasi dan keselamatan dipenuhi.

Himpunan bongkah grafit

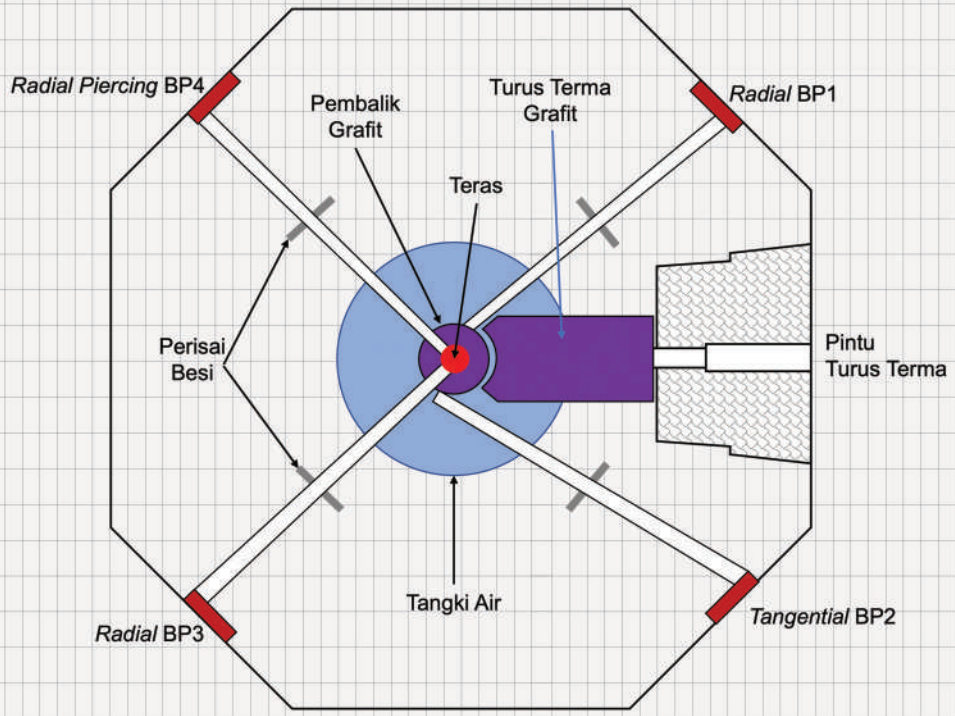
Pintu konkrit turus terma

58 Penyinaran Luar Teras

Fasiliti penyinaran neutron di luar teras reaktor digunakan untuk pelbagai eksperimen dengan fluks yang lebih rendah daripada di dalam teras. Fasiliti yang tersedia adalah, Turus Terma (*Thermal Column*) dan empat Alur Neutron (*Neutron Beam Port)*.

59 Turus Terma (TC)

Turus terma (TC) merupakan bongkah grafit yang disusun di bahagian luar tangki reaktor. Bongkah grafit ini boleh dikeluarkan satu persatu dan sampel boleh disinarkan di dalam TC dengan meletakkannya di antara himpunan grafit. Pintu TC diperbuat daripada konkrit berketumpatan tinggi yang berat dan digerakkan di atas landasan yang dikendalikan oleh motor elektrik. Fasiliti ini sesuai untuk penyinaran biologi kerana mempunyai sumber neutron terma yang tinggi.



Keratan rentas reaktor TRIGA PUSPATI menunjukkan kedudukan lubang alur

Lubang alur neutron

60 Alur Neutron

Lubang alur neutron disusun di sekeliling teras, tiga daripadanya membentuk jejari dari teras reaktor ke permukaan perisai konkrit.

Terdapat empat lubang alur neutron di luar teras reaktor yang dikenali sebagai BP1, BP2, BP3 dan BP4. BP1, BP3 dan BP4 membentuk jejari dari teras reaktor ke permukaan perisai konkrit, sementara BP2 berkeadaan tangen dengan teras reaktor. Hujung sebelah dalam BP1 dan BP3 terhenti di bahagian luar pembalik teras, sementara BP4 menembusi pembalik grafit dan terus ke bahagian dalam berhampiran dengan teras (*radial piercing*). Kesemua empat lubang alur ini berdiameter 15 cm setiap satu.

Lubang alur neutron ini boleh dimanfaatkan untuk pembangunan instrumen yang bersesuaian bagi menjalankan eksperimen sains neutron seperti penyerakan, pembelauan, dan pengimejan (radiografi dan tomografi).

Fasiliti NuR

Sistem manipulator and sistem kamera neutron di NuR

61 Radiografi Neutron (NuR)

Radiografi neutron yang pertama di RTP adalah NuR 1. Fasiliti ini dipasang di lubang alur neutron nombor satu (BP1) pada 8 Disember 1983 dan merupakan fasiliti perintis. Manakala, fasiliti kekal NuR 2 di bangunkan pada 12 November 1984 di lubang alur neutron nombor tiga (BP3). Teknik pengimejan radiografi neutron adalah sama seperti yang digunakan di dalam radiografi sinar-X. Fasiliti NuR terdiri daripada tiga komponen utama iaitu punca neutron daripada teras reaktor, pengkolimat dan sistem pengesanan. NuR pada awalnya menggunakan filem untuk mendapatkan imej melalui teknik radiografi dan pengimejan neutron. Seiring dengan perkembangan teknologi, fasiliti ini ditambah baik dengan kamera jenis *Coupled-Charged Device* (CCD) yang membolehkan teknik pengimejan digital dilakukan. Kombinasi sistem pengimejan digital dengan sistem manipulator mampu menghasilkan unjuran imej keratan rentas dua dimensi melalui teknik tomografi.

62 Penyerak Neutron Bersudut Kecil (SANS)

Fasiliti Penyerak Neutron Bersudut Kecil (SANS) terletak di lubang alur keempat (BP4). SANS mengandungi kolimator primer dan sekunder, penapis berilium, perisai biologi, ruang penyinaran sampel, secondary *flight tube*, *Highly Oriented Pyrolytic Graphite* (HOPG) neutron monokromator, kriostat dan pengesan neutron jenis *Position Sensitive Detector* (PSD).

Neutron daripada teras akan melalui penapis berilium, kemudiannya dibelau oleh HOPG bagi menghasilkan neutron monokromatik yang mempunyai panjang gelombang 5Å. Neutron monokromatik akan terserak pada sudut serakan yang kecil untuk mengkaji struktur bahan pada skala mesoskopik antara 10 hingga 100 nm.

Sistem SANS

63 Fasiliti Penyelidikan Sokongan

Empat fasiliti makmal yang boleh digunakan untuk menyokong aktiviti penyelidikan dan pembangunan di RTP adalah Makmal Fizik Neutron, Makmal Thermal Hidraulik dan Makmal Simulator (Loji Kuasa Nuklear dan Reaktor Penyelidikan). Makmal ini digunakan oleh para penyelidik di dalam kajian reaktor fizik, neutronik, perisai sinaran, hidraulik terma dan simulasi. Selain itu, makmal ini juga digunakan sebagai alat bantu di dalam pendidikan dan latihan berasaskan reaktor penyelidikan nuklear.

Makmal Fizik Neutron

64 Makmal Fizik Neutron

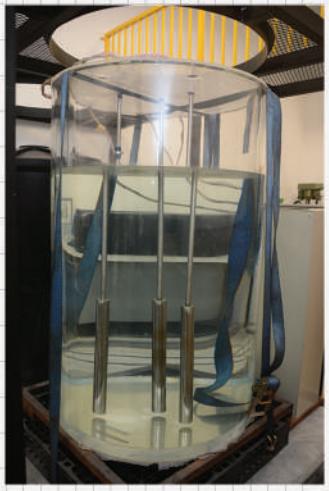
Makmal Fizik Neutron mempunyai kemudahan penyediaan sampel bagi eksperimen yang akan dijalankan di reaktor. Makmal ini dilengkapi dengan pengesan HPGe yang berkeupayaan untuk mengesan sinar gama dan neutron. Pengesan ini boleh digunakan untuk forensik nuklear, pengaktifan neutron, perisai plumbum dan kit eksperimen sains nuklear.

65 Makmal Hidraulik-Terma

Makmal hidraulik-terma menyediakan kemudahan kepada para penyelidik yang ingin melakukan eksperimen berkaitan dengan sistem penyejuk. Makmal ini dilengkapi dengan Sistem Test-RIG penyejuk reaktor, yang terdiri daripada, pelantar ujian, sistem kawalan automasi, paparan kristal cecair (LCD) dan peralatan mekanikal. Penyelidikan yang boleh dijalankan adalah berkaitan keselamatan operasi sistem penyejuk, penyenggaraan ramalan (predictive maintenance), pembelajaran mesin (*machine learning*) dan fluks pemanasan kritikal (*critical heat flux*). Makmal ini juga berpotensi dijadikan sebagai eksperimen *critical assembly*.

Susunan pepasangan peralatan eksperimen; heater panel board

Papan kawalan pemanas air

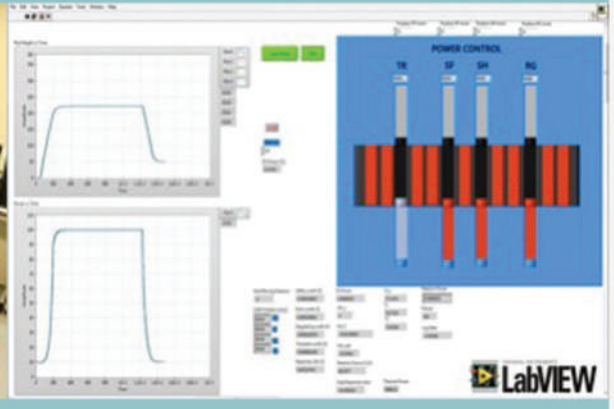


Tangki air litar primer

66 Makmal Simulator

Simulator di reka bentuk untuk memberikan simulasi situasi sebenar operasi dan kawalan reaktor nuklear. Simulator digunakan sebagai medium pendidikan dan latihan untuk memahami situasi pengoperasian normal dan tidak normal. Terdapat dua jenis simulator reaktor nuklear yang tersedia di RTP iaitu kawalan proses loji kuasa nuklear berasaskan komputer dan simulator reaktor penyelidikan jenis TRIGA.

Simulator kawalan proses loji kuasa nuklear berasaskan komputer



Simulator reaktor penyelidikan jenis TRIGA

05 APLIKASI

67 Sumber Neutron

RTP merupakan satu-satunya fasiliti yang mempunyai sumber neutron stabil di Malaysia. Sumber neutron boleh digunakan untuk pelbagai kajian unsur bahan, pengeluaran radioisotop untuk perubatan, pertanian dan industri, serta pengimejan sampel.

Kit perubatan pengeluaran radisotop

68 Sampel Penyinaran

Lebih 100,000 bilangan sampel telah disinarkan dengan sumber neutron di RTP sejak tahun 1982. Jenis sampel yang disinarkan dengan sumber neutron termasuk padi, madu, sarang burung, enap cemar, chitosan dan lain-lain. Tujuan penyinaran sampel adalah untuk menganalisis multi-elemen secara kualitatif dan kuantitatif unsur utama dan minor, dan jejak dalam sampel. Selain itu, artifak berharga daripada tapak arkeologi turut disinarkan.

Sampel madu

Penapis udara

Air mineral

Tumbuhan

Ilmenite

Manik

69 Penilaian Sampel Penyinaran

Penilaian sampel di RTP dilakukan untuk menjamin keselamatan dan tidak bertentangan dengan had operasi reaktor. Setiap sampel perlu dikemuka, disemak dan dinilai oleh penilai sampel. Jenis sampel penyinaran tidak boleh mengandungi:

- grafit, tembaga dan raksa kerana boleh mempercepatkan proses pengaratan aluminium.
- plastik yang mengandungi klorida membebaskan klorin apabila disinarkan di dalam teras reaktor.
- cecair seperti air dan minyak akan membebaskan gas apabila disinarkan di dalam teras reaktor.
- besi waja dan zirkonium akan menjadi lebih keras dan rapuh apabila terdedah kepada medan neutron.
- cecair hidrogen, metana dan karbon disulfida boleh mengakibatkan kebakaran dan letupan.
- sampel yg mempunyai keratan rentas serapan neutron yang besar akan memberi kesan kepada reaktiviti teras.
- kuantiti sampel bahan fisil perlu dihadkan supaya tidak meningkatkan kadar reaktiviti teras reaktor.

70 Kaedah Pengaktifan Neutron

Kaedah pengaktifan neutron menawarkan kepekaan dan sensitiviti yang lebih tinggi berbanding kaedah lain di dalam kajian penentuan unsur. Melalui kaedah ini, unsur-unsur tertentu dapat dikenal pasti dan boleh diukur pada kepekatan yang sangat rendah sehingga bahagian per juta (ppm). Selain itu, ketepatan dan kejituan yang tinggi dalam kaedah ini membolehkan penentusahan kepekatan unsur dalam bahan rujukan piawaian.

Sampel manik dimasukkan ke dalam vial

Sistem Automasi HPGe yang digunakan untuk menganalisis sampel pengaktifan neutron

71 | Komposisi Kandungan Unsur

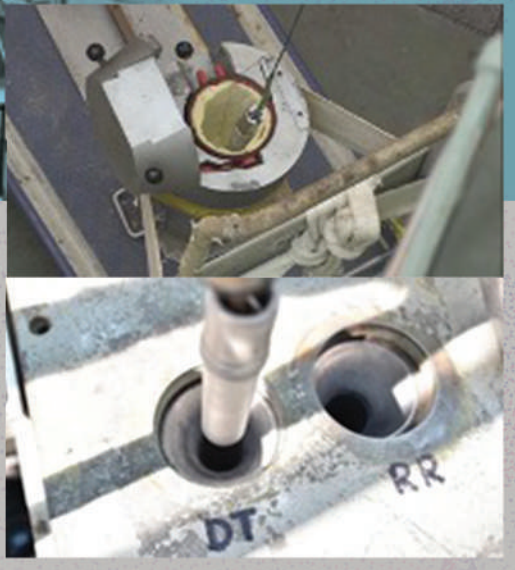
Komposisi kandungan unsur bagi bahan sejarah arkeologi purba seperti artifak kapal karam, fosil, pinggan mangkuk porselin, dan pasu boleh diketahui melalui teknik analisis pengaktifan neutron. Secara umumnya, komposisi kandungan unsur bahan sejarah tersebut boleh ditentukan dengan kaedah konvensional. Namun, kaedah ini mengambil masa yang lebih lama dan rumit. RTP menjadikannya lebih mudah melalui kaedah pengaktifan neutron, dengan penentuan serentak sehingga 50 elemen melalui satu analisis sahaja.

Pinggan mangkuk porselin

Proses penghasilan sampel radio isotop perubatan di RTP

72 | Pembentukan Radioisotop

RTP pernah dikendalikan selama 72 jam tanpa henti khusus bagi pembentukan radioisotop pada tahun 1992. Sejumlah 195,000 milicurie (mCi) radioisotop telah dihasilkan dari tahun 1982 hingga 2020 dan hampir 80% radioisotop adalah technetium-99m (Tc-99m). Proses pembentukan radioisotop dari awal hingga akhir menggunakan khidmat kepakaran penyelidik RTP sepenuhnya. Radioisotop pertama yang dikeluarkan oleh RTP adalah natrium-24 (Na- 24) untuk kegunaan bukan perubatan pada tahun 18 Ogos 1984.



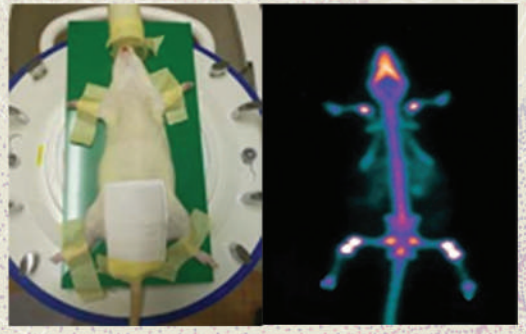
Sampel dikeluarkan dari teras reactor

73 Radioisotop Perubatan

Radioisotop perubatan yang dihasilkan oleh kemudahan reaktor digunakan untuk terapi radionuklid bersasar (TRT), diagnosis terapeutik, penjagaan paliatif dan lain-lain . Radioisotop seperti technetium-99m (Tc-99m) dimasukkan ke dalam badan pesakit dan berfungsi sebagai penjejak sel barah. Sel barah boleh dikenal pasti melalui kaedah pengimejan diagnostik, seterusnya rawatan konsultasi yang sesuai boleh disyorkan.

Jenis radioisotop yang pernah dihasilkan melalui RTP adalah iodin-131, samarium-153, lutetium-177 dan holmium-166, mempunyai keupayaan untuk mensasar dan membunuh sel barah tanpa merosakkan sel normal dalam tubuh badan pesakit.

Produk radioisotop Nuklear Malaysia sedia dibekalkan ke hospital



Imej penjejak radioisotop

Sukarelawan pertama ujian klinikal radioisotop perubatan Tc-99m

74 Sukarelawan Pertama

Sukarelawan pertama bagi ujian klinikal radioisotop perubatan Tc-99m yang dihasilkan oleh RTP pada tahun 1988 merupakan pegawai penyelidik Nuklear Malaysia. Ujian ini membuktikan radioisotop perubatan adalah selamat digunakan tanpa mendatangkan sebarang kesan sampingan yang memudaratkan kepada pesakit.

75 Radioisotop Industri

RTP menghasilkan radioisotop industri untuk aplikasi penyurih (radiotracer). Fosforus-32 (P- 32) merupakan penyurih pertama dihasilkan pada 1985 untuk aktiviti hidrologi bagi mengesan pergerakan air bawah tanah. Radioisotop lain seperti aurum-198 (Au-198), technetium-99m (Tc-99m), iridium-192 (Ir-192), bromin-82 (Br-82), ferum-59 (Fe-59), zink-165 (Zn-165) dan tritium-3 (H-3) turut dihasilkan melalui RTP.

Tc-99m digunakan didalam kajian arah air bawah tanah melalui teknik telaga tunggal (single-well technique)

Radioisotop Br-82 digunakan untuk menentukan tempoh agihan masa loji pembakaran di Hospital Kuantan

Penyediaan pasir Ir-192 di kapal korek untuk kajian pengangkutan sedimen di Pelabuhan Bintulu, Sarawak

Penggunaan radioisotop Au-198 dan H-3 di Empangan Pedu, Kedah bagi mengkaji tirisan air awalan di permukaan empangan

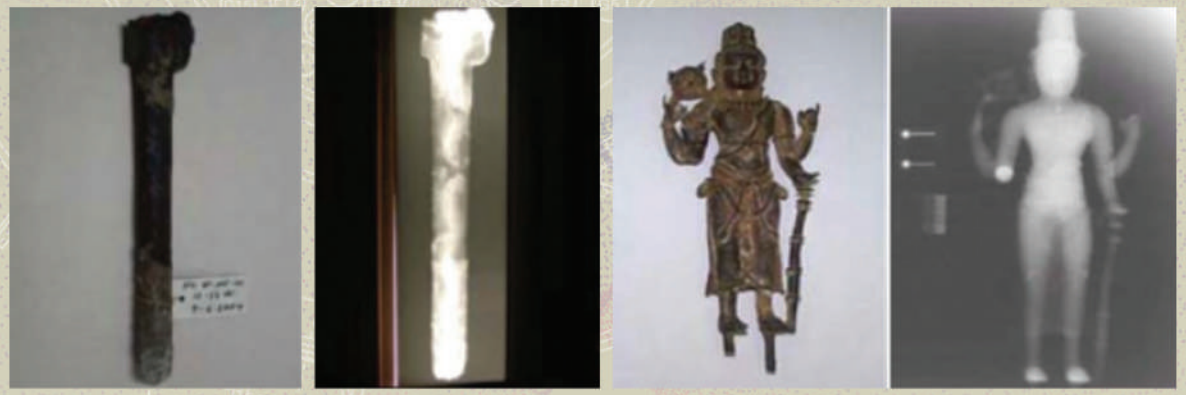
76 | Sinar-X vs Neutron

Sebagaimana imej radiografi dihasilkan oleh sinar-X, neutron juga dapat menghasilkan imej melalui radiografi neutron. Radiografi neutron berupaya menembusi elemen berat seperti uranium, plumbum dan besi keluli. Selain itu, ia juga berupaya menghasilkan imej elemen ringan seperti air, hidrokarbon dan lain-lain kerana elemen yang lebih ringan mampu menyerap neutron. Keunikan sifat neutron boleh membantu membezakan isotop yang berlainan dari unsur-unsur tertentu. Kelebihan ini merupakan pelengkap kepada bahan yang sukar diperiksa menggunakan sinar-X berbanding dengan neutron.

Gambar artifak asal, imej dari sinar-X, imej dari sinar neutron

77 | Kemudahan Radiografi Neutron

Kemudahan radiografi neutron di RTP berupaya mengesan kakisan dan kelembapan pada komponen komposit kapal terbang, pengesanan nodul akar dalam penyelidikan mutasi biak baka, pemeriksaan komponen elektronik, pemeriksaan artifak muzium dan lain-lain.



Imej radiografi neutron daripada RTP terhadap warisan budaya dengan kerjasama Jabatan Muzium dan Antikuiti, Kementerian Pelancongan, Kebudayaan dan Kesenian, Malaysia

78 Analisis Sampel Biologi

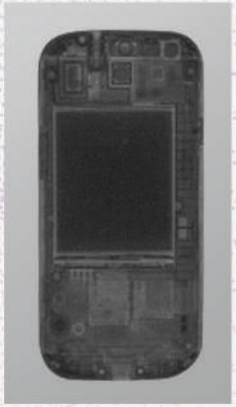
Neutron amat sesuai untuk menganalisis sampel biologi. Kontras imej neutron menunjukkan kandungan hidrogen di dalam sampel. Imej objek yang didedahkan dengan sinar neutron kelihatan lebih jelas dari sinar-X. Selain itu, imej neutron dapat membezakan di antara bunga sebenar dan tiruan. Besi di dalam dahan dapat dilihat dengan jelas pada bunga tiruan.

(a) (b) (c)

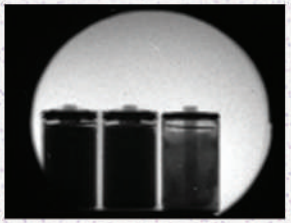
Perbezaan kontras (a) Gambar bunga raya (b) Imej sinar-X, (c) Imej neutron

79 Pengimejan Radiografi Neutron

Pengimejan radiografi neutron berpotensi membantu dalam industri pembuatan elektronik. Sebagai contoh, kontras pada imej neutron membezakan pelbagai komponen mikro di dalam telefon bimbit. Maklumat ini boleh membantu dalam mengenalpasti kecacatan komponen secara visual bagi kawalan mutu pembuatan. Selain itu, imej radiografi neutron boleh juga menunjukkan kepekatan kandungan cecair di dalam sarung logam berat seperti di dalam sampel bateri.



Imej telefon bimbit



Perbezaan imej Neutron di antara bateri baru dan bateri lama

Imej cecair didalam botol plastik yang dihalang kepingan plumbum

80 Pemeriksaan Sekuriti

Neutron mempunyai ciri kuasa penembusan yang sangat tinggi. Ciri ini berpotensi digunakan untuk pemeriksaan keselamatan agensi penguatkuasa dan forensik. Sebagai contoh, pemeriksaan bagasi di lapangan terbang atau kontena pelabuhan, bahan yang dilapisi dengan kepingan plumbum tidak dapat ditembusi oleh sinar-X. Sebaliknya, melalui dedahan dengan neutron, sampel yang terlindung dalam kepingan/bekas plumbum dapat dikenal pasti. Walau bagaimanapun, neutron tidak sesuai digunakan ke atas pemeriksaan manusia.

06 CERITERA KEJAYAAN

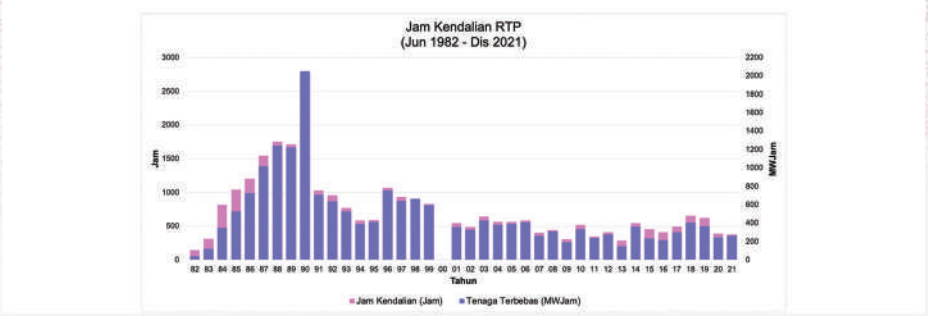
81 Persijilan Pengendali Reaktor

RTP perlu dikendalikan oleh pengendali reaktor yang diiktiraf bagi memastikan keselamatan pengoperasiannya. Perkara ini dinyatakan di dalam garis panduan persijilan dan persijilan semula pengendali reaktor (LEM/TEK/54). Persijilan pengendali reaktor baharu dilaksanakan oleh LPTA, manakala, persijilan semula pengendali reaktor dilaksanakan oleh Jawatankuasa Keselamatan, Kesihatan Pekerjaan dan Alam Sekitar (JKSHE), Agensi Nuklear Malaysia. Sehingga kini, seramai 43 orang pengendali berjaya diiktiraf melalui persijilan pengendali reaktor.

82 Kendalian dan Penyenggaraan RTP

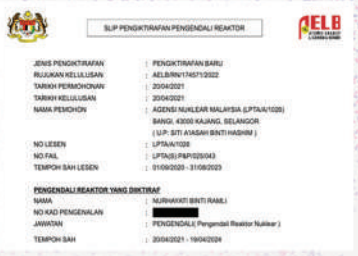
Ketersediaan operasi RTP adalah selama lapan jam sehari dan lima hari seminggu untuk sepanjang tahun kecuali pada masa penyenggaraan berjadual dan cuti umum. Secara purata, RTP dikendalikan pada paras kuasa 750kW selama enam jam sehari.

Pada sepuluh tahun pertama, purata kendalian RTP sebanyak 1500 jam setahun berikutan penghasilan radioisotop secara intensif bagi memenuhi permintaan sektor perubatan, pertanian dan industri di Malaysia. RTP pernah di kendalikan selama 72 jam tanpa henti pada ketika itu. Setelah mengambil kira faktor ekonomi dan keupayaan RTP yang terhad pada paras kuasa 1MW, penghasilan radioisotop secara intensif terpaksa dikurangkan. Ini bagi memastikan penggunaan bahan api nuklear secara berhemat. Pada tahun-tahun seterusnya, purata kendalian RTP adalah sebanyak 500 jam setahun.



Jam Kendalian RTP tahun 1982-2021

Peperiksaan bertulis Pengendali Reaktor di LPTA



SLIP PENGIKTIRAFAN PENGENDALI REAKTOR

JENIS PENGIKTIRAFAN	: PENGIKTIRAFAN BARU
RUJUKAN KELULUSAN	: AELB/RN/174571/2022
TARIKH PERMOHONAN	: 20/04/2021
TARIKH KELULUSAN	: 20/04/2021
NAMA PEMOHON	: AGENSI NUKLEAR MALAYSIA (LPTA/A/1028) BANGI, 43000 KAJANG, SELANGOR (U.P: SITI AYASAH BINTI HASHIM)
NO LESEN	: LPTA/A/1028
NO FAIL	: LPTA(S)/P&P/025/043
TEMPOH SAH LESEN	: 01/09/2020 - 31/08/2023

PENGENDALI REAKTOR YANG DIKTIRAF

NAMA	: NURHAYATI BINTI RAMLI
NO KAD PENGENALAN	: [redacted]
JAWATAN	: PENGENDALI(Pengendali Reaktor Nuklear)
TEMPOH SAH	: 20/04/2021 - 19/04/2024

Contoh slip Pengiktirafan Pengendali Reaktor yang dikeluarkan oleh pihak LPTA

83 Pembangunan Pangkalan Data Operasi

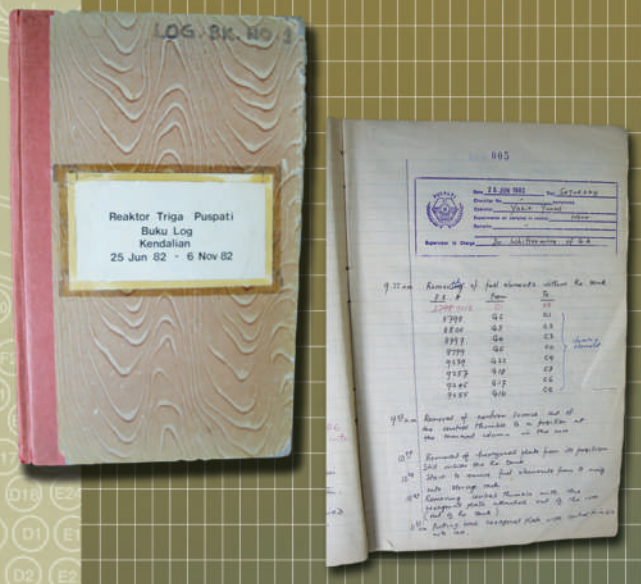
Data operasi RTP direkodkan di dalam pangkalan data yang dibangunkan secara dalaman (*in-house*) oleh kakitangan PTR. Sistem pangkalan data ini bertujuan untuk memantau, merekod, menganalisis dan melapor parameter keselamatan reaktor dengan lebih berkesan.

Sistem pangkalan data yang telah dibangunkan adalah:

1. Analisis Data (*ANADATA*): Data kendalian RTP
2. *ANADATA* versi baru: *Operating Hour* (*OptOur*)
3. *MyFuel*: *An Integrated Nuclear Fuel Safety Assessment and Operating Licensing Management System*
4. *DASMOS: Database of Stack Monitoring System*

84 ANADATA

Data kendalian RTP direkodkan sejak ia mula beroperasi pada tahun 1982. Pada awal operasi RTP, kesemua data direkodkan secara manual di dalam buku log kendalian. Walaupun penggunaan komputer tidak meluas ketika itu, Sistem ANADATA berjaya dibangunkan oleh pegawai penyelidik RTP bagi tujuan merekod data kendalian secara sistematik. Parameter yang direkodkan adalah jam kendalian, tenaga terbebas, bilangan sampel, dan perubahan reaktiviti pada masa RTP dikendalikan.

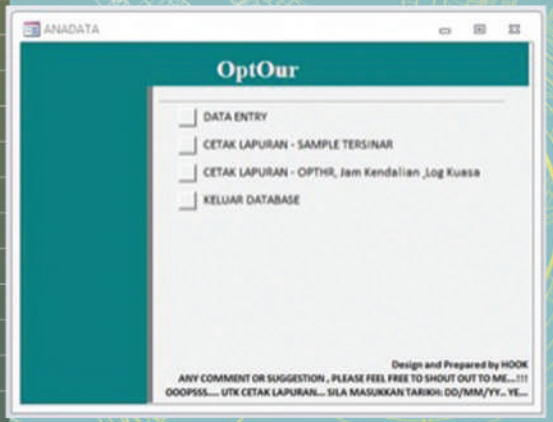


Buku log kendalian pertama RTP

Antara muka grafik pengguna Sistem ANADATA yang masih menggunakan persekitaran arahan (command environment) adalah tidak mesra pengguna

85 OptOur

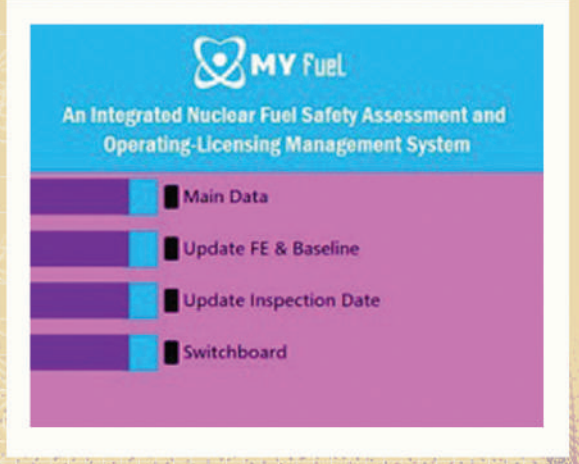
OptOur merupakan ANADATA versi baharu yang dibangun menggunakan Microsoft Access oleh pasukan pegawai penyelidik PTR pada tahun 2008 dan mula digunakan sepenuhnya pada 2010. Kelebihan OptOur adalah mesra pengguna, data kendalian direkodkan dengan lebih komprehensif, dan laporan kendalian dapat dijana serta merta pada bila-bila masa jika diperlukan.



Antara muka grafik pengguna OptOur

86 MyFuel

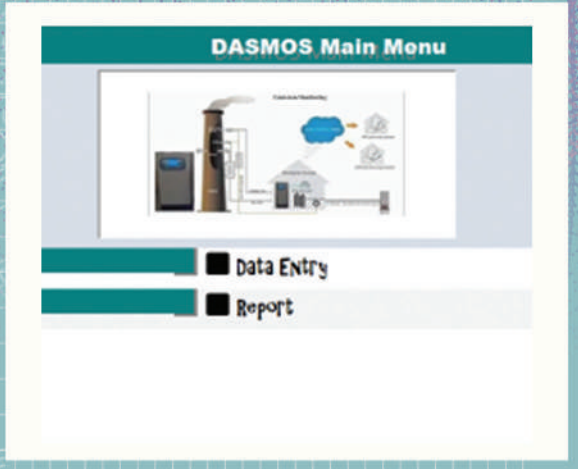
Malaysia menerima bekalan bahan api nuklear melalui projek supply-agreement INFCIRC/287. Penggunaan bahan api RTP perlu dilaporkan kepada IAEA setiap tahun seperti yang tertakluk di bawah perjanjian tersebut. MyFuel merupakan pangkalan data untuk merekod dan menyimpan maklumat bahan api RTP bagi tujuan kawal gunaan nuklear di peringkat SSAC dan *Nuclear Material Accounting and Control* (NMAC).



Antara muka grafik pengguna MyFuel

87 Database Stack Monitoring System (DASMOS)

Pengoperasian RTP menghasilkan dan melepaskan efluen yang terdiri daripada zarahan, radioiodin, dan gas nadir melalui cerobong udara. *Stack Monitoring System* (SMS), memantau dan merekod data efluen yang dilepaskan. Walau bagaimanapun, SMS tidak boleh menjana laporan secara bulanan atau tahunan untuk tujuan analisis keselamatan. Oleh itu, sistem DASMOS dibangunkan untuk menambahbaik sistem SMS.



Antara muka grafik pengguna DASMOS

Pemeriksaan SSC semasa penyenggaraan RTP

88 Penyenggaraan Secara Dalaman

Penyenggaraan RTP dilakukan oleh kakitangan secara berkala setiap tahun bagi memastikan keselamatan operasi RTP berada pada tahap optimum. Penyenggaraan ini meliputi pemeriksaan secara pencegahan, membaik pulih dan kalibrasi, berdasarkan pada keadaan semasa bagi pematuhan had operasi dan syarat lesen yang ditetapkan.

Pemeriksaan yang menyeluruh terhadap SSC semasa penyenggaraan adalah seperti berikut:

1. Elemen bahan api nuklear
2. Sistem reaktor
3. Sistem penyejukan reaktor
4. Sistem pengudaraan reaktor
5. Kemudahan penyinaran
6. Sistem bekalan elektrik
7. Sistem pemampat udara
8. Sistem pemadam kebakaran
9. Sistem penyaman udara

89 | ReDICS

Konsol kawalan analog yang digunakan sejak 1982 telah usang dan mengalami masalah penuaan serta tiada alat ganti di pasaran. Pada tahun 2014, konsol kawalan analog telah digantikan dengan Sistem *Reactor Digital Instrumentation and Control* (ReDICS).

Projek ReDICS dilaksanakan dengan kerjasama di antara Nuklear Malaysia dengan Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). Melalui kerjasama ini, kakitangan PTR terlibat secara langsung di peringkat reka bentuk, fabrikasi, ujilari dan pentauliahan menerusi program pemindahan teknologi.

Program pemindahan teknologi ini berjaya membangunkan kepakaran tempatan dalam bidang instrumentasi dan kawalan nuklear di RTP.

Konsol kawalan digital

90 Simulator RTP

Simulator RTP terhasil daripada proses transformasi konsol kawalan analog lama RTP kepada konsol kawalan yang lebih interaktif. Proses transformasi berjaya dilakukan oleh pegawai penyelidik PTR yang mengambil masa selama setahun. Simulator RTP digunakan untuk meningkatkan kefahaman mengenai operasi, fizik dan hidraulik terma reaktor bagi tujuan pendidikan dan latihan.

Konsol kawal analog

Simulator RTP

Kolam Bahan Api Nuklear Terpakai

91 Kolam Bahan Api Nuklear Terpakai

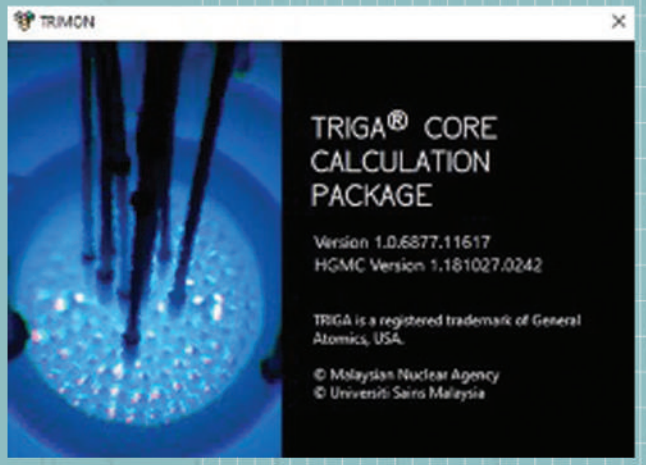
Kemudahan Kolam Bahan Api Nuklear Terpakai adalah kolam simpanan sementara bahan api terpakai untuk persediaan proses pembubaran RTP pada masa akan datang. Kemudahan ini berjaya dibangunkan menggunakan teknologi *double wall flask*. Teknologi ini mampu menampung bebanan air dan bahan api terpakai secara praktikal dalam jangkamasa yang cukup panjang sebelum dipindahkan ke penyimpanan kekal.

92 | TRIMON

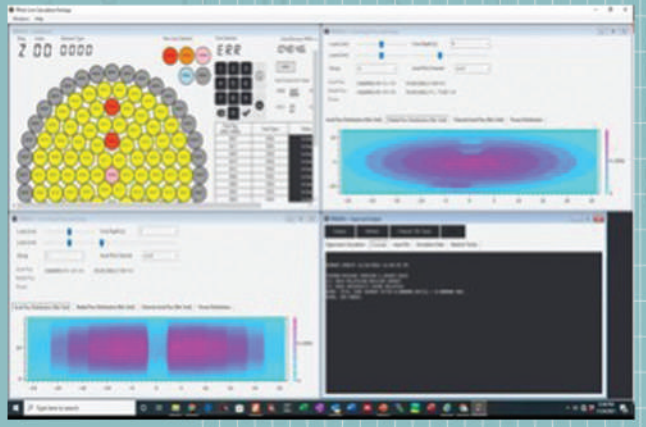
Deterministic - Monte Carlo Integration for TRIGA Reactor Core Management (TRIMON) ialah perisian pengurusan bahan api dan teras reaktor TRIGA, yang dibangunkan oleh pegawai penyelidik PTR bersama Universiti Sains Malaysia (USM).

Perisian ini mampu membuat pengiraan nilai eigen teras, pengurusan pembakaran bahan api, ketumpatan kuasa secara tiga dimensi dan jangkaan fluks neutron. TRIMON juga berupaya mempercepat simulasi sebanyak tiga kali ganda daripada pengiraan konvensional.

Inovasi ini telah memenangi Pingat Emas di *International Invention, Innovation & Technology Exhibition* (ITEX), Malaysia pada tahun 2019.



Muka depan kod TRIMON



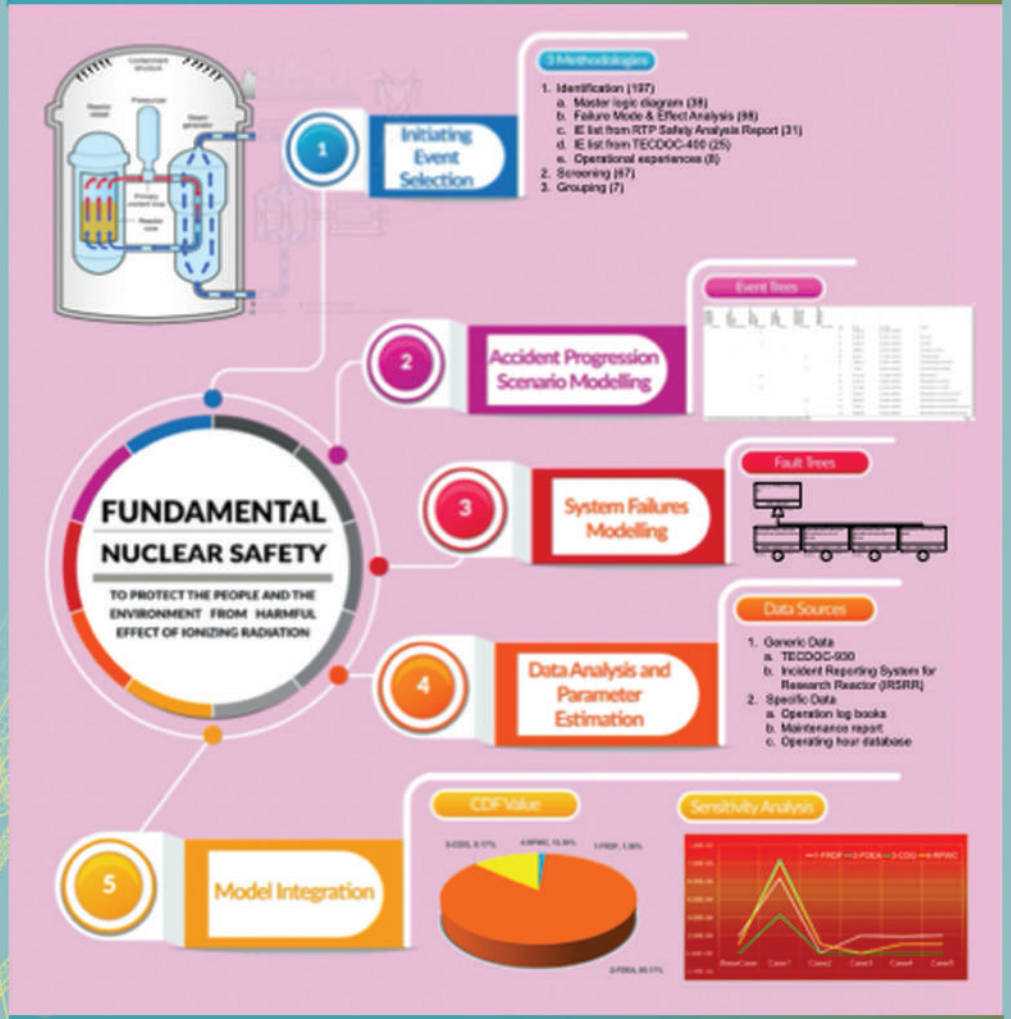
Antara muka grafik analisis kod TRIMON

93 COMPASS-M

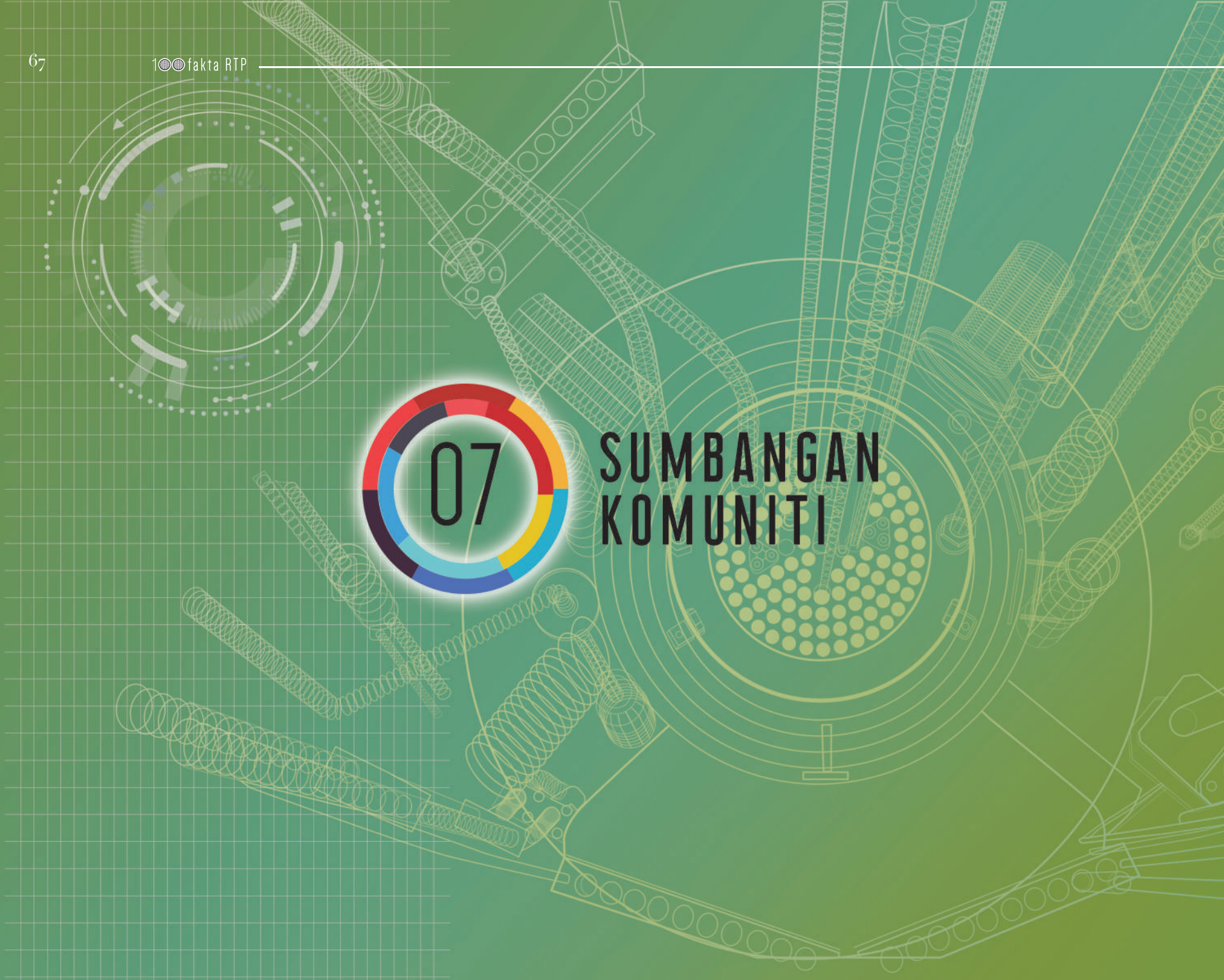
Penilaian keselamatan perlu dijalankan secara berterusan bagi memastikan RTP beroperasi pada tahap paling optimum. Sehubungan itu, inovasi ***COMpetence*** for ***Probabilistic ASsessment of Safety in Malaysia*** *(COMPASS-M)* telah dibangunkan pada tahun 2012 bersama LPTA, IAEA, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dan Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM).

COMPASS-M adalah satu kaedah penilaian keselamatan yang menggambarkan urutan kemalangan yang berpotensi berlaku di dalam reaktor dengan menggunakan kronologi peristiwa, dan menggabungkan kebarangkalian kejayaan dan kegagalan komponen sistem RTP.

Inovasi ini telah memenangi Pingat Emas di *International Research Innovation, Invention & Solution Exposition* (iRISE) pada tahun 2018 dan Pingat Perak di *International Invention, Innovation & Technology Exhibition* (ITEX) Malaysia pada tahun 2019.



Ilustrasi aliran kerja COMPASS-M

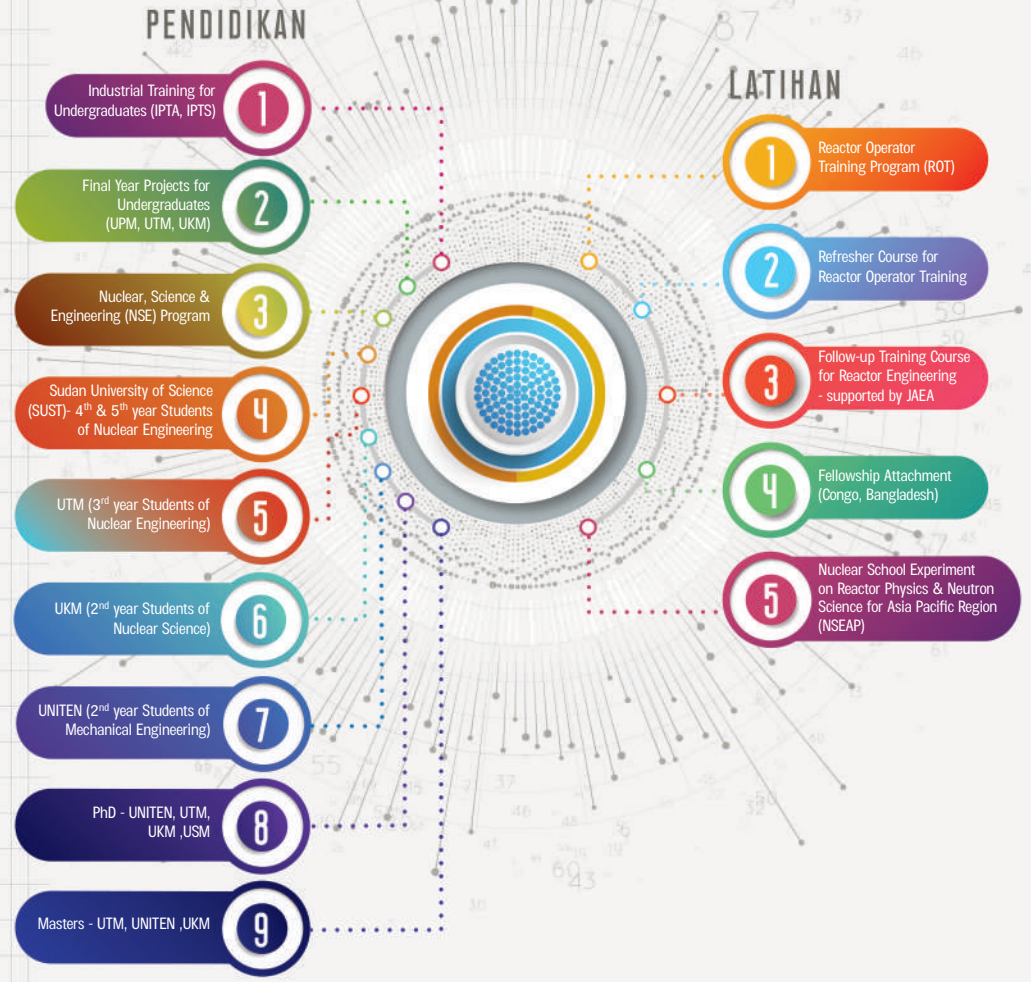


07 SUMBANGAN KOMUNITI

94 Pendidikan dan Latihan Berasaskan Reaktor Nuklear

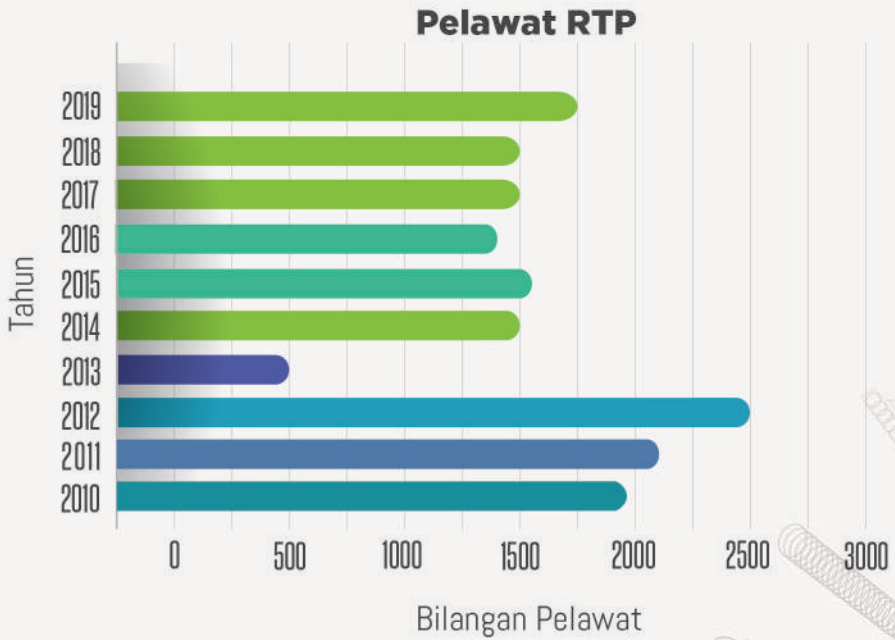
RTP telah menyumbang dalam pelbagai aktiviti pendidikan dan latihan berasaskan reaktor nuklear di peringkat kebangsaan dan antarabangsa. Latihan yang ditawarkan adalah berkaitan dengan fizik reaktor, hidraulik terma, perlindungan sinaran, instrumentasi dan kawalan. Peningkatan minat terhadap reaktor nuklear dapat dilihat daripada penambahan bilangan pelajar universiti, projek penyelidikan dan latihan sangkutan dalam dan luar negara di RTP. Aktiviti pendidikan dan latihan yang dianjurkan:

Aktiviti latihan dan pendidikan berasaskan reaktor nuklear



95 | Pelawat RTP

Sebagai satu-satunya reaktor penyelidikan nuklear di Malaysia, RTP sering menjadi tumpuan pelawat. Bagi memupuk kesedaran dan penerimaan masyarakat terhadap sains dan teknologi nuklear di Malaysia, RTP dibuka untuk lawatan umum. Secara purata, RTP menerima lebih kurang 1500 orang pelawat setahun dari pelbagai kementerian, agensi, institusi, industri, komuniti dan lain-lain.



Pelawat RTP 2010–2019

Lawatan dari pelbagai institusi pendidikan

Lawatan dari pelbagai kementerian, agensi dan orang awam

96 Program Kesedaran Awam RTP

RTP terlibat secara aktif dalam program kesedaran awam melalui pelbagai pendekatan, seperti siri ceramah di universiti tempatan, seminar awam, ekspo dan pameran. Melalui program ini, orang awam didedahkan dengan teknologi nuklear reaktor (loji kuasa dan reaktor penyelidikan), penggunaan tenaga, keselamatan sinaran, dan khidmat yang ditawarkan di RTP.

Pelbagai aktiviti kesedaran awam RTP

97 Alam Sekitar

Kemudahan RTP menyumbang khidmat penyinaran untuk kajian alam sekitar. Kaedah pengaktifan neutron digunakan untuk pencirian, pangkalan data, nisbah sumber pencemaran, kandungan kimia, pencemaran sedimen marin yang disebabkan oleh aktiviti antropogenik di dalam sampel kualiti udara dan air, flora fauna, tanah, enap cemar, sumber marin dan lain- lain berkaitan.

91. Pensampelan sedimen marin

98 Agroteknologi

Kemudahan RTP menyumbang khidmat penyinaran kepada produk agro seperti padi, sarang burung walit dan madu. Kaedah pengaktifan neutron digunakan untuk pencirian profil elemen habitat asal dan mengesahkan keaslian produk melalui tandaan geokimia. Proses ini membantu Kementerian Kesihatan dan Jabatan Veterinar dalam penguatkuasaan serta kawalan terhadap agro makanan di Malaysia.

Padi bukit

Sarang burung walit

Madu

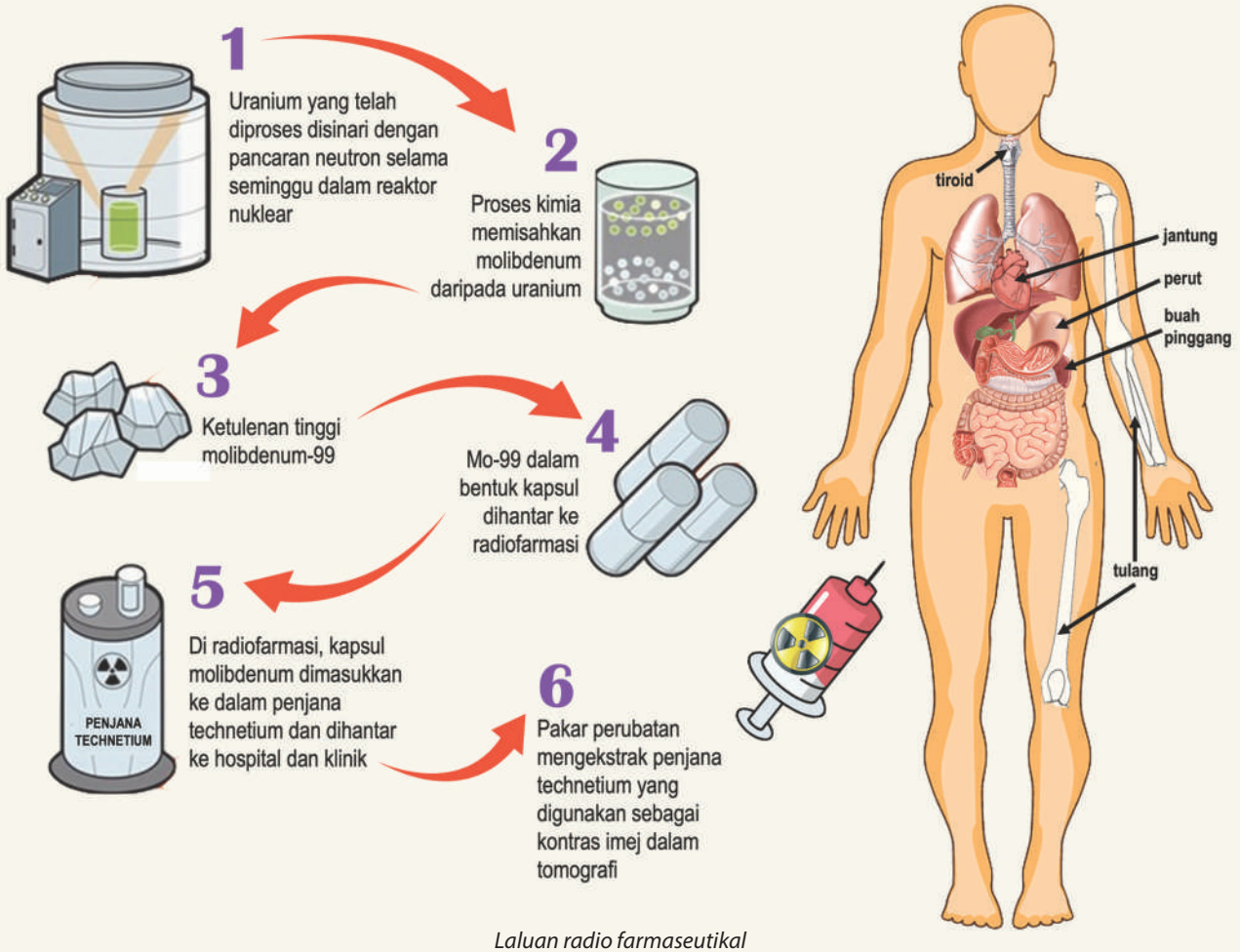
99 | Industri

Radioisotop penyurih mempunyai aplikasi yang luas dalam bidang R&D terutamanya hidrologi dan industri. Kemudahan RTP menyumbang dalam penghasilan radioisotop penyurih seperti technitium-99, bromin-82, aurum-198, tritium-3, iridium-192, bagi menentukan aliran sungai, irigasi terusan dan kawasan tadahan. Selain itu, radioisotop penyurih cecair buatan digunakan dalam industri minyak dan gas bagi mengesan kebocoran jaringan paip.

Mengesan kebocoran menggunakan radioisotop

100 | Perubatan

Radioisotop perubatan dihasilkan berdasarkan permintaan melalui kemudahan RTP semenjak 1990-an. Pelbagai radioisotop dihasilkan bagi kegunaan diagnostik perubatan, penjagaan paliatif dan rawatan pesakit kanser seperti samarium, lutetium, chromium, holmium, technetium dan iodine.



Laluan radio farmaseutikal

KENALI PENULIS

Julia Abdul Karim berkelulusan DEng Kejuruteraan Nuklear dari Tokyo Institute of Technology, Jepun. Beliau memperolehi MSc Fizik Gunaan dan BSc Fizik Komputeran dan Elektronik dari Universiti Malaya. Beliau berasal dari Ipoh, Perak dan merupakan pengurus RTP serta mempunyai pengalaman lebih 20 tahun dalam bidang fizik reaktor dan kejuruteraan nuklear di RTP.

Mazleha Maskin berkelulusan PhD Sains Nuklear dari Universiti Kebangsaan Malaysia, MEng Nuclear and Quantum Engineering dari Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea Selatan dan BSc Statistik dari Universiti Teknologi Mara. Beliau dilahirkan di Muar, Johor dan mempunyai pengalaman lebih 20 tahun dalam bidang keselamatan nuklear (kebarangkalian) dan pembangunan pangkalan data.

Nurhayati Ramli berkelulusan MSc Nuclear Power Plant Engineering dari KEPCO International Nuclear Graduate School (KINGS), Korea Selatan dan BSc Kejuruteraan Elektrik dari Universiti Teknologi Mara. Beliau berasal dari Melaka dan mula berkhidmat sebagai Pegawai Penyelidik di Agensi Nuklear Malaysia sejak 2007. Beliau juga merupakan pengendali reaktor berlesen di RTP dan mempunyai pengalaman lebih 10 tahun dalam kendalian dan pelesenan RTP.

Nurfarhana Ayuni Joha berkelulusan Sarjana Muda (kepujian) Sains Instrumentasi dari Universiti Putra Malaysia. Beliau dilahirkan di Kuala Lumpur dan merupakan pegawai penyelidik di Pusat Teknologi Reaktor, Agensi Nuklear Malaysia yang berpengalaman hampir 12 tahun dalam bidang instrumentasi dan kawalan reaktor. Beliau juga merupakan pengendali reaktor berlesen sejak 2021 sehingga kini.

Norfarizan Mohd Said berkelulusan PhD Teknologi Maklumat dan Sains Kuantitatif dari Universiti Teknologi MARA, Ijazah Sarjana Sains dalam Matematik dan Ijazah Sarjana Muda Sains dalam Matematik Industri dari Universiti Teknologi Malaysia. Beliau dilahirkan di Kota Tinggi, Johor dan berpengalaman sebagai pensyarah selama 6 tahun. Kini bertugas sebagai Pegawai Penyelidik di Nuklear Malaysia dan pengendali reaktor berlesen di RTP. Bidang penyelidikan beliau ialah permodelan matematik dan simulasi komputer.

Zaredah Hashim berkelulusan ijazah kejuruteraan elektrik (M.Eng) dan ijazah sarjana muda kejuruteraan elektrik (B.Eng) dari Universiti Teknologi Malaysia, Johor. Beliau dilahirkan di Johor Bahru dan memulakan kerjaya sebagai Pegawai Penyelidik di Agensi Nuklear Malaysia pada tahun 2009. Sehingga kini, beliau berkhidmat di bawah Pusat Teknologi Reaktor dan merupakan pengendali reaktor berlesen.

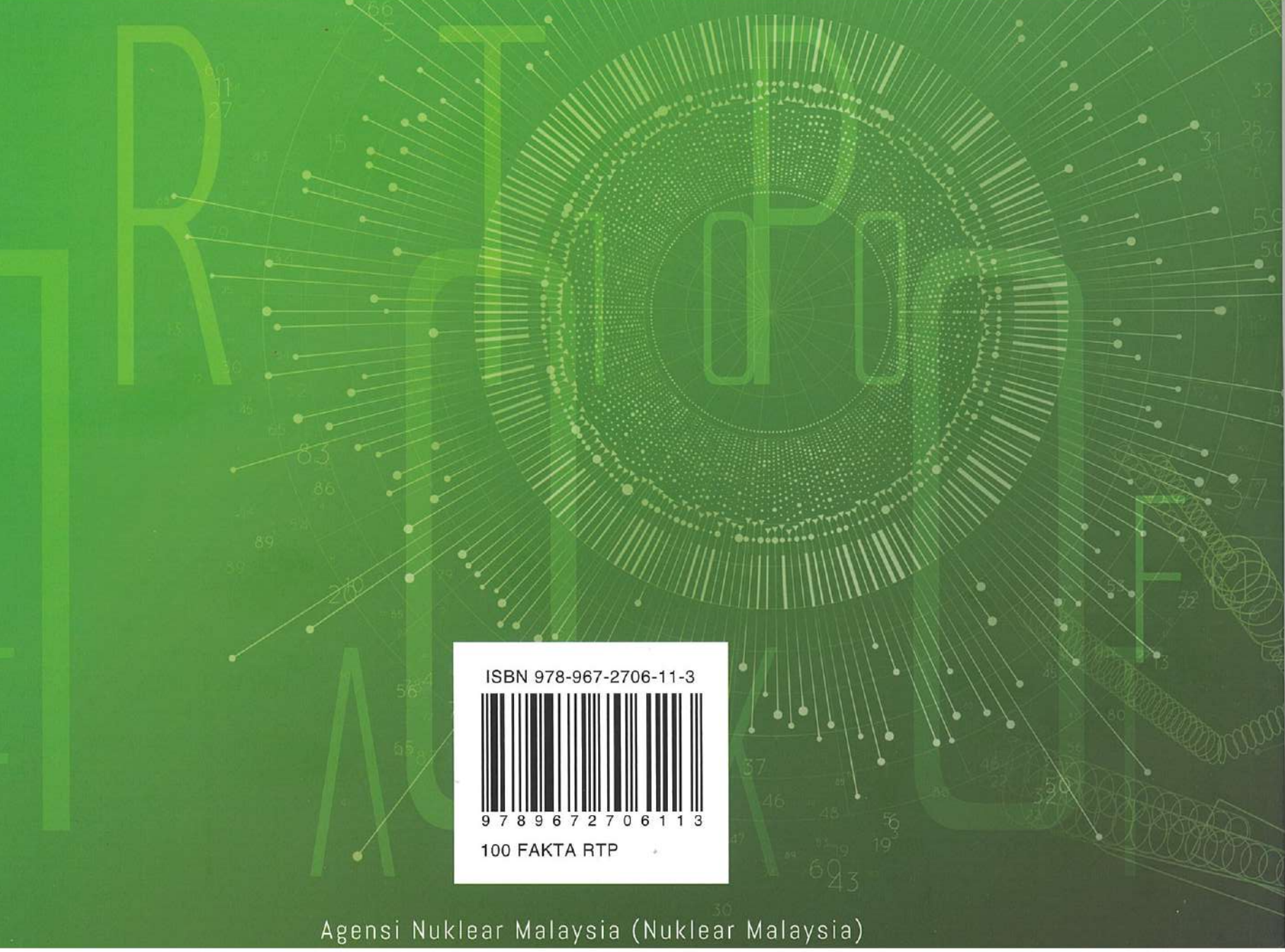
Hasniyati Md Razi berkelulusan PhD dan Master Sains Bahan di Universiti Sains Malaysia dan B.Eng (Hons) Kejuruteraan Bahan dari Universiti Malaysia Perlis. Beliau dilahirkan di Sungai Petani, Kedah dan mula bertugas di Agensi Nuklear Malaysia sebagai Pegawai Penyelidik di Pusat Teknologi Reaktor dari tahun 2016 sehingga kini. Beliau juga merupakan pengendali reaktor berlesen dari tahun 2021 sehingga kini.

Nurfazila Husain berkelulusan Diploma Kejuruteraan Mekanikal di Politeknik Ungku Omar, Ipoh. Beliau dilahirkan di Seri Iskandar, Perak dan mula bertugas di Agensi Nuklear Malaysia sebagai Penolong Jurutera dari tahun 2010 sehingga kini.

NUKLEAR MALAYSIA

Seuntai kasih, setulus penghargaan dan terima kasih di atas sokongan warga Pusat Teknologi Reaktor dan semua yang terlibat di dalam penerbitan buku 100 fakta RTP.

Jurufoto : Nor Hasimah binti Hashim



ISBN 978-967-2706-11-3

9 7 8 9 6 7 2 7 0 6 1 1 3

100 FAKTA RTP

Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia)