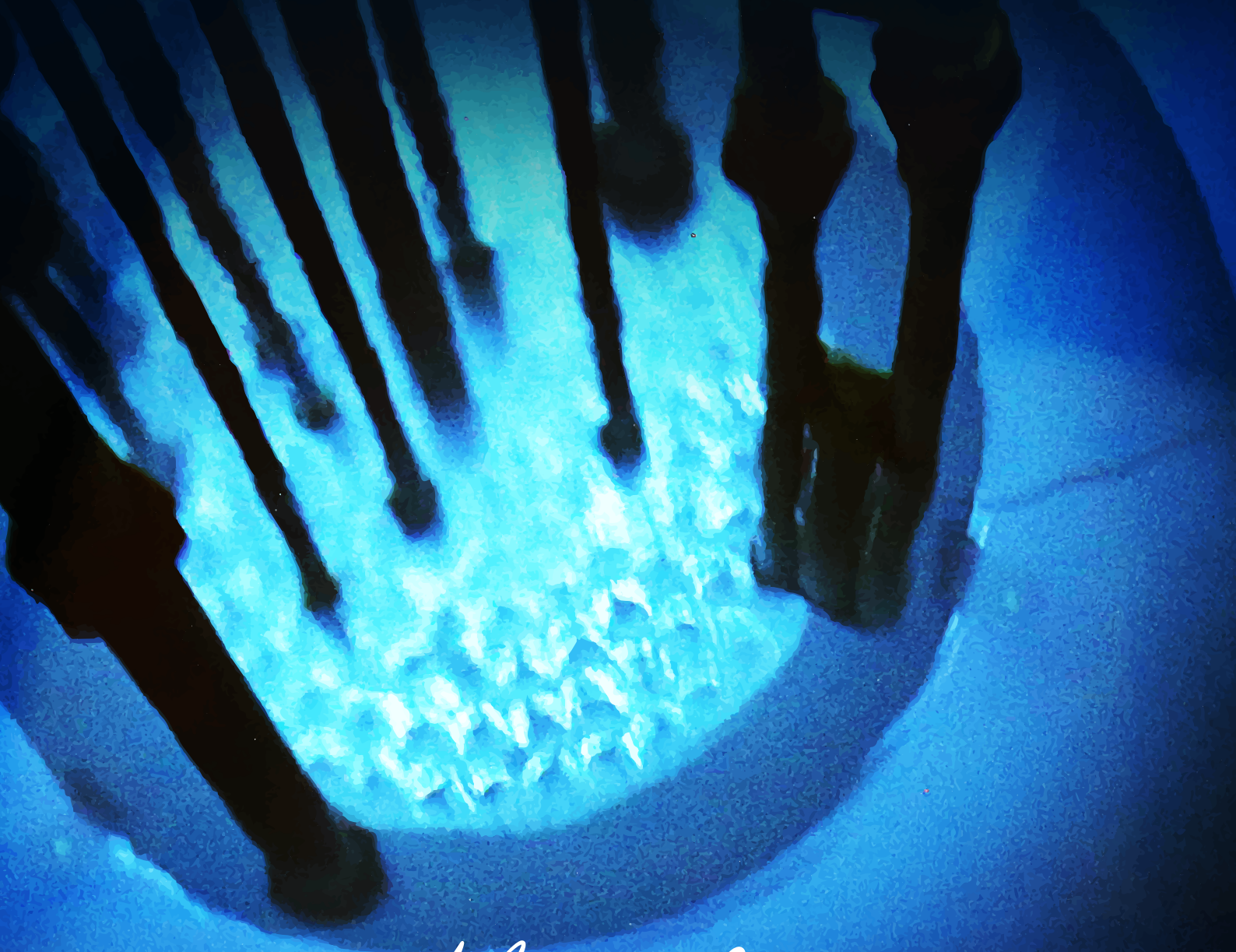


i-NUKLEAR

ILMU . IDEA . INFORMASI



Mengimbangi
INOVASI NUKLEAR
DAN KESELAMATAN REAKTOR

Sejarah

Sejarah agensi bermula pada 11 November 1971 apabila satu jawatankuasa yang dikenali sebagai Pusat Penyelidikan dan Aplikasi Tenaga Nuklear (CRANE) ditubuhkan, bagi mengkaji kemungkinan Malaysia menceburi bidang teknologi nuklear. Usul ini telah diterima dan diluluskan dalam mesyuarat Jemaah Menteri pada 19 September 1972 yang menyokong cadangan terhadap keperluan Malaysia menubuhkan pusat penggunaan dan penyelidikan teknologi nuklear. Pada Ogos 1973, Jawatankuasa Perancangan Pembangunan Negara mencadangkan untuk menamakan pusat ini sebagai Pusat Penyelidikan Atom Tun Ismail (PUSPATI) dan telah diiktiraf sebagai pusat kebangsaan.

PUSPATI telah diletakkan di bawah Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar (MOSTE). Tahun 1983 merupakan detik penting bagi agensi apabila diberikan identiti baru iaitu Unit Tenaga Nuklear (UTN). Serentak dengan itu, UTN telah dipindahkan dari MOSTE ke Jabatan Perdana Menteri (JPM). Ini memberi impak yang besar kepada peranan agensi kerana buat pertama kalinya aktiviti nuklear yang melibatkan perancangan polisi negara dan kegiatan operasi nuklear disatukan di bawah naungan JPM. Namun pada 27 Oktober 1990, UTN telah dipindahkan semula ke MOSTE. Jemaah Menteri dalam mesyuaratnya pada 10 Ogos 1994, telah meluluskan pertukaran nama UTN kepada Institut Penyelidikan Teknologi Nuklear Malaysia (MINT).

Logo baru juga telah diperkenalkan pada 22 Oktober 1994 ketika Hari Pelanggan MINT, yang juga julung kali diadakan. Bagi memberi arah hala yang lebih jelas, visi MINT diperkemas kepada mempertingkatkan pembangunan dan daya saing ekonomi negara melalui kecemerlangan dalam teknologi nuklear. Pada 13 April 2005 sekali lagi agensi mengalami perubahan entiti apabila digazet dengan nama baru iaitu Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia). Kini Nuklear Malaysia terus melebarkan sayap dalam mengembangkan R, D & C bagi menyokong aspirasi negara.

Peranan

Nuklear Malaysia adalah sebuah agensi di bawah Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI). Nuklear Malaysia juga adalah agensi peneraju penyelidikan dan pembangunan (R&D) sains dan teknologi nuklear bagi pembangunan sosioekonomi negara. Semenjak penubuhannya, Nuklear Malaysia telah diamanahkan dengan tanggungjawab untuk memperkenalkan dan mempromosi sains dan teknologi nuklear kepada masyarakat, sekaligus menyemai minat dan menyedarkan orang awam akan kepentingan teknologi nuklear dalam kehidupan. Hingga ke hari ini, Nuklear Malaysia kekal penting sebagai sebuah organisasi yang mantap dalam bidang saintifik, teknologi dan inovasi.

Pencapaian cemerlang Nuklear Malaysia adalah bersandarkan pengalaman 52 tahun dalam pelbagai pembangunan S&T nuklear, serta 42 tahun dalam pengendalian reaktor penyelidikan yang bebas kemalangan radiologi dan bersih alam sekitar. Selain itu, hasil R&D yang berpotensi turut diketengahkan ke pasaran sebagai usaha memanfaatkan penemuan inovasi saintifik kepada rakyat dan ekonomi Malaysia. Nuklear Malaysia juga sentiasa memastikan perkhidmatan yang diberikan adalah berkualiti dan bertaraf antarabangsa dalam kelasnya. Kemampuan ini adalah berdasarkan latihan dan disiplin tenaga kerja profesional, infrastruktur, kejuruteraan serta makmal penyelidikan yang lengkap.

Posisi Nuklear Malaysia sebagai pusat penyelidikan unggul telah diiktiraf dan dicontohi oleh agensi-agensi nuklear dari negara-negara jiran, malahan dijadikan model dalam merangka pelan pelaksanaan pembangunan S&T nuklear masing-masing, terutamanya aspek pemindahan dan pengkomersilan teknologi.

Hak cipta terpelihara

Mana-mana bahagian penerbitan ini tidak boleh dikeluarkan ulang, disimpan dalam sistem dapat kembali, atau disiarkan dalam apa-apa jua cara, sama ada secara elektronik, fotokopi, mekanik, rakaman atau lain-lain, sebelum mendapat izin bertulis daripada Penerbit. Sidang Editor berhak melakukan penyuntingan ke atas tulisan yang diterima selagi tidak mengubah isinya. Karya yang disiarkan tidak semestinya mencerminkan pendapat dan pendirian Agensi Nuklear Malaysia.

isikandungan

Tinta Ketua Pengarah **iv**
& Dari Meja Editor

Aplikasi Reaktor **2**
TRIGA PUSPATI

Kawal Selia Bahan Nuklear **8**

Sekuriti Nuklear **12**

Program Pengurusan **16**
Penuaan Reaktor TRIGA
PUSPATI (RTP)

Penyahtauliahahan Loji Nuklear: **22**
Penamatan Pengoperasian
dengan Selamat untuk
Jaminan Masa Depan

Penerokaan Teknologi *Small* **25**
Modular Reactors (SMR)
Terhadap Penjanaan Tenaga
Elektrik di Malaysia

PENAUNG

Dr. Rosli bin Darmawan

EDITOR JEMPUTAN

Dr. Muhammad Rawi bin Mohamed Zin

EDITOR KANAN

Habibah binti Adnan

EDITOR

Normazlin binti Ismail

PENYELARAS

Dr. Haizum Ruzanna binti Sahar

PENULIS

Dr. Norfarizan binti Mohd Said

Mohd Fairus bin Abdul Farid

Dr. Mazleha binti Maskin

Dr. Phongsakorn Praktom

Muhammad Khairul Ariff bin Mustafa

Dr. Julia binti Abdul Karim

PEREKA GRAFIK

Norhidayah binti Jait

JURUFOTO

Nor Hasimah binti Hashim

Zulhilmy bin Mohamad Latif

DITERBITKAN OLEH:

Unit Penerbitan

Bahagian Pengurusan Maklumat

Agensi Nuklear Malaysia

Bangi, 43000 Kajang,

Selangor Darul Ehsan.

Editorial

Tinta Ketua Pengarah

Dalam kita mengejar kemajuan dan pembangunan khususnya dalam teknologi reaktor, keseimbangan antara inovasi nuklear dan keselamatan reaktor perlu menjadi keutamaan. Inovasi dan aktiviti pembangunan serta penyelidikan yang dilaksanakan perlu sentiasa dipantau dengan teliti melalui pelaksanaan piawaian keselamatan antarabangsa yang ketat. Di samping itu, pendidikan dan latihan yang berterusan bagi para pengendali reaktor juga penting untuk memastikan keselamatan sentiasa diutamakan.

Nuklear Malaysia amat menitikberatkan aspek keselamatan reaktor. Hal ini dibuktikan dengan rekod sifar kemalangan yang dicatatkan oleh Reaktor TRIGA PUSPATI sejak mencapai tahap kritikaliti pertamanya pada 28 Jun 1982. Agensi ini sentiasa memegang prinsip, hanya dengan menggabungkan inovasi teknologi dengan keutamaan keselamatan, tenaga nuklear dapat memberi manfaat yang berkelanjutan tanpa mengabaikan keselamatan dan kesihatan masyarakat.

Dr. Rosli bin Darmawan
Ketua Pengarah
Agensi Nuklear Malaysia



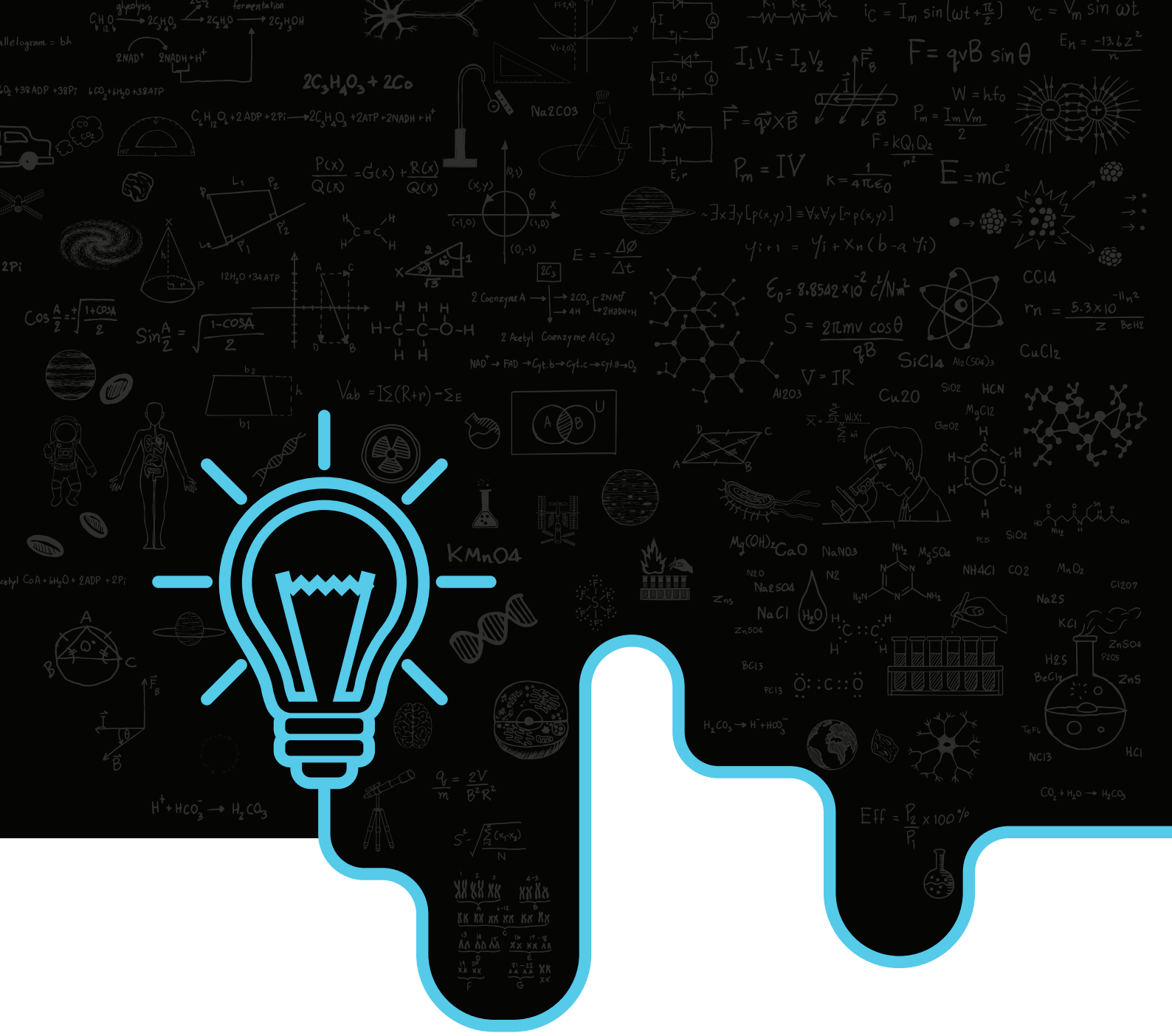
Dari meja e d i t o r



I-Nuklear kali ini membawakan tema *Mengimbangi Inovasi Nuklear dan Keselamatan Reaktor*. Umum mengetahui bahawa Malaysia mempunyai Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP), reaktor penyelidikan yang kini menginjak ke usia empat puluhan. Seperti juga manusia, umur sebegini sudah mula menampakkan kesan penuaan. Maka program pengurusan penuaan RTP telah diaktifkan bagi memastikan keselamatan, kebolehpercayaan dan kecekapan reaktor. Disamping itu, pelan penyahtauliah juga turut diwujudkan supaya pematuhan terhadap protokol keselamatan serta pengurusan bahan radioaktif dapat dilaksanakan dengan teratur untuk penamatan operasi setelah RTP tidak lagi ekonomik untuk diteruskan. Seterusnya artikel teknologi Small Modular Reactors (SMR) turut dikongsikan supaya pembaca mengetahui perkembangan teknologi reaktor nuklear terkini. Sifat SMR yang fleksibel dan lebih mampan dalam menjana elektrik, telah membuka ruang untuk inovasi tenaga efisien dan mesra alam.

Diharap menerusi fakta dan penerangan yang diberikan dalam setiap artikel yang dipaparkan, pembaca mendapat gambaran jelas tentang keupayaan, kepakaran dan pengalaman Agensi Nuklear Malaysia mengendalikan reaktor penyelidikan secara selamat sejak tahun 1982. Pasti, mereka juga bersedia mengemblem tenaga dan menyahut cabaran sekiranya Malaysia berhasrat mengembangkan teknologi reaktor nuklear untuk tenaga masa depan!

Habibah binti Adnan
Pengarah
Bahagian Pengurusan Maklumat
Agensi Nuklear Malaysia



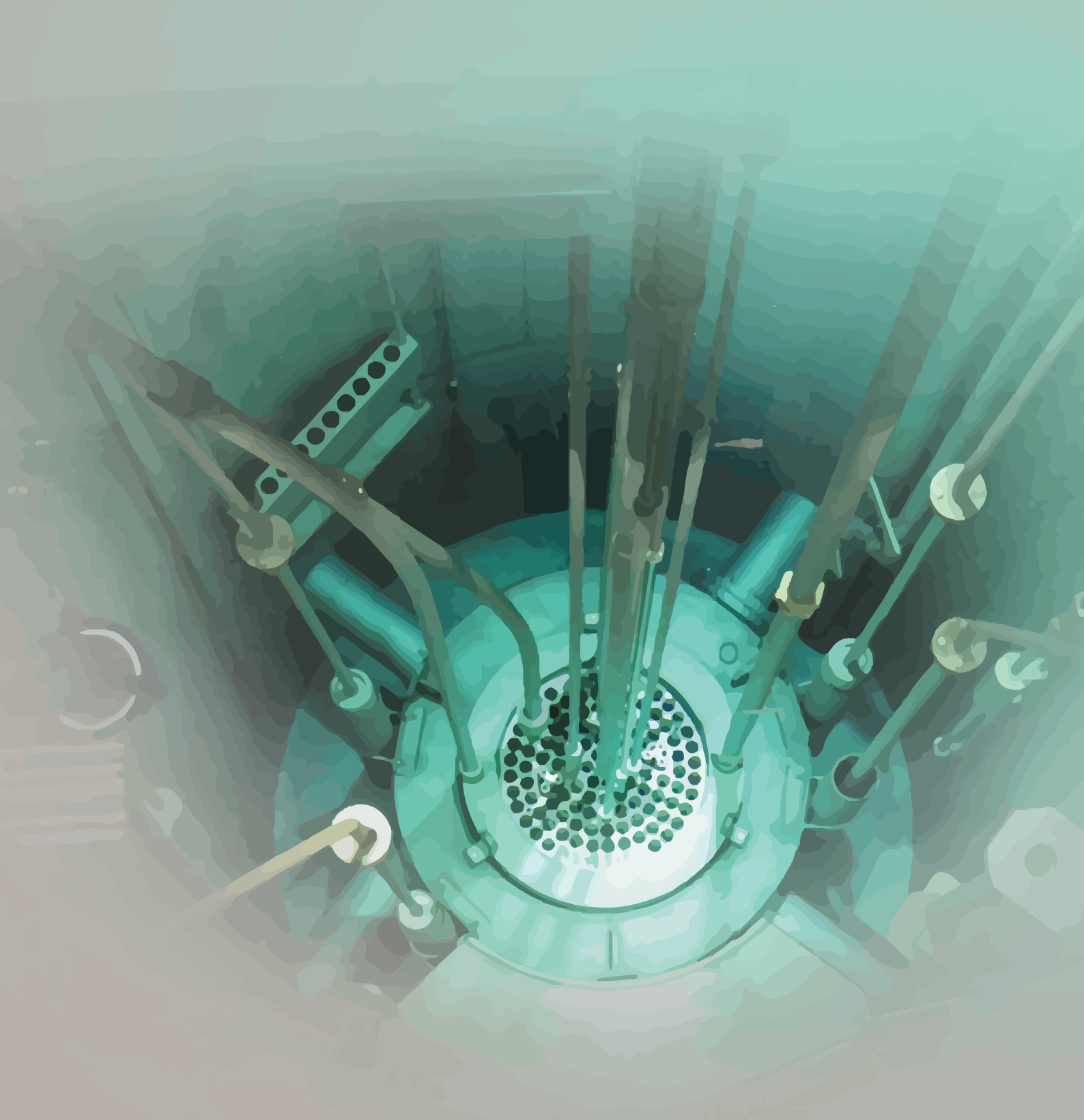
Sains

hari ini adalah

teknologi

di masa depan

-Edward Teller



Aplikasi **Reaktor TRIGA PUSPATI**

Oleh : Norfarizan Mohd Said, PhD

Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) adalah fasiliti sumber neutron statik yang tunggal di Malaysia. RTP mencapai kegentingan pertama (*first criticality*) pada 28 Jun 1982. TRIGA bermaksud *Training, Research, Isotope Production* dan *General Atomic*. RTP dilengkapi instrumen penyinaran khusus bagi menggunakan sumber neutron dalam aplikasi pembangunan sains dan teknologi nuklear untuk memberi manfaat kepada masyarakat dan negara.

Sejak tahun 1982, ratusan ribu sampel telah disinarkan dengan neutron dihasilkan RTP. Sampel yang disinarkan merangkumi kategori makanan, alam sekitar, pertanian, arkeologi, industri, bahan, perubatan dan sebagainya. Madu, sarang burung, kitosan, padi adalah contoh kategori makanan. Sampel kategori arkeologi yang disinarkan seperti artifak warisan sejarah lebih 100 tahun, tembikar seramik yang dijumpai bersama kapal yang tenggelam di Laut China Selatan dan Piala Bola Sepak HMS Malaya.

Pengguna RTP terdiri daripada individu atau kumpulan penyelidik daripada universiti, industri, syarikat swasta dan agensi kerajaan. Setiap pengguna perlu menghantar permohonan penyinaran kepada Pusat Teknologi Reaktor (PTR). Pengendali PTR berlesen bertanggungjawab sepenuhnya dalam khidmat penyinaran neutron kepada semua pengguna. Nama bahan, jenis unsur dan berat setiap unsur atau berat pukal sampel perlu dikemukakan dalam borang permohonan penyinaran untuk disemak dan dinilai oleh penilai sampel. Sampel yang hendak disinari juga mesti disertakan bersama borang permohonan penyinaran.

Penilaian sampel dilakukan oleh penyelidik yang mempunyai lesen pengendali reaktor bagi kelulusan sebelum sampel dibenar untuk disinarkan di RTP. Proses penilaian sebagai langkah yang penting dan wajib dilakukan demi memastikan kuasa dan tempoh masa operasi reaktor menepati keperluan penyinaran dan memastikan tiada gangguan kepada operasi dan sistem keselamatan reaktor. Analisis penghasilan radioisotop serta aktiviti, gas dan wap diteliti bagi mengelak sebarang pelanggaran had operasi reaktor seterusnya menjamin keselamatan operasi reaktor sepanjang proses penyinaran.

Penilai sampel bertanggungjawab mengenalpasti tindak balas unsur dalam sampel dengan neutron dan persekitaran ketika disinari di reaktor. Bahan yang mengganggu dan mengancam integriti air dalam kolam reaktor dan struktur reaktor mesti dielak dan tidak boleh disinarkan dengan neutron. Plastik yang membebaskan klorin dan tembaga yang boleh mempercepatkan proses pengaratan aluminium apabila disinarkan dengan neutron adalah contoh tipikal yang perlu dielakkan. Sampel tidak boleh mengandungi bahan cecair hidrogen, metana dan karbon disulfida kerana bahan tersebut boleh mengakibatkan letupan dan kebakaran. Bahan yang mempunyai kesan kepada kadar reaktiviti teras reaktor juga tidak dibenarkan untuk disinari. Selain itu, penilai sampel turut melakukan pengiraan jangkaan dedahan dos daripada sampel yang disinarkan untuk mencadangkan instrumen penyinaran, tempoh penyinaran dan kendalian sampel yang bersesuaian.

Sampel pengguna disinarkan di fasiliti penyinaran neutron yang berada di dalam dan luar teras reaktor. Setiap fasiliti penyinaran mempunyai nilai fluks dan keamatan neutron berbeza. Perbezaan ini membenarkan proses penyinaran dijalankan mengikut pilihan pengguna berdasarkan aspek penyelidikan yang diterokai, tertakluk kepada hasil penilaian sampel yang telah dilakukan.

Radioisotop Perubatan dan Industri

Kemudahan Penyinaran neutron Jidal Tengah (CT) adalah berada di tengah teras bahan api. Kawasan berkenaan mempunyai nilai fluks yang tinggi berbanding di tempat lain di dalam teras. Kemudahan CT digunakan bagi penghasilan radioisotop perubatan sama ada penyinaran dilakukan di dalam keadaan basah atau kering. Radioisotop berjangka hayat rendah untuk perubatan, pertanian dan industri dilaksanakan menggunakan penyinaran di dalam tiub kering (DT). Kemudahan penyinaran DT yang terletak di dalam teras reaktor boleh juga digunakan untuk sampel flora, fauna, makanan dan air yang memerlukan fluks neutron sederhana tinggi dan berada dalam keadaan kering.

Natrium-24 (Na-24) adalah radioisotop pertama untuk kegunaan pertanian dihasilkan pada 18 Ogos 1984. Penyinaran terus dilakukan sehingga kini, 80% daripada radioisotop yang dikeluarkan oleh RTP hingga 2020 merupakan technetium-99m (Tc-99m). Radioisotop Tc-99m banyak digunakan di hospital kerana penting dalam meningkatkan kemampuan diagnosis perubatan dengan berfungsi sebagai penjejak sel barah yang membenarkan penentuan rawatan awal yang bersesuaian. Radioisotop ini juga boleh digunakan dalam penyelidikan bioperubatan, seperti kajian tentang perubahan fisiologi atau metabolisme dalam tubuh manusia. RTP mengeluarkan radioisotop iodin-131, samarium-153, lutetium-177 dan holmium-166, isotop berkenaan mempunyai keupayaan mensasar dan membunuh sel barah tanpa merosakkan sel normal pesakit.



Produk radioisotop Samarium-153 sedia dibekalkan ke hospital untuk rawatan paliatif pesakit

Selain untuk tujuan perubatan, RTP pernah menghasilkan radioisotop aurum-198, iridium-192, bromin-82, ferum-59, zink-65 dan tritium-3 bagi kegunaan industri. Fosforus-32 sebagai radioisotop penyurih (*radiotracer*) pertama dihasilkan oleh RTP pada tahun 1985 untuk aktiviti hidrologi bagi mengesan pergerakan air bawah tanah. Aktiviti pengeluaran radioisotop dilaksanakan berdasarkan permintaan pengguna. Namun, aktiviti bahan radioisotop adalah terhad dengan mengambil kira faktor usia dan baki bahan api bagi kesinambungan operasi RTP.

Analisis Komposisi Bahan

Kebanyakan Reaktor TRIGA di dunia adalah sumber neutron yang digunakan dalam kajian komposisi unsur sesuatu bahan menggunakan teknik analisis pengaktifan neutron (NAA). Melalui penyinaran RTP, penentuan komposisi unsur di dalam sesuatu bahan menggunakan teknik NAA adalah lebih mudah, tepat dan jitu berbanding kaedah lain. Sampel bahan alam sekitar, makanan, objek sejarah arkeologi seperti artifak kapal karam, fosil, pinggan mangkuk porselin dan pasu pernah disinarkan di RTP bagi menganalisis komposisi unsur bahan yang terkandung di dalamnya. Komposisi unsur memberikan maklumat mengenai keselamatan dan ketulian sesuatu objek. Keyakinan terhadap keselamatan makanan dapat ditingkatkan melalui data NAA.

Kebanyakan penyinaran sampel bagi tujuan kajian analisis komposisi unsur bahan dilaksanakan di fasiliti rak berputar (RR) yang berada di dalam pembalik grafit di sekeliling teras reaktor. Tempoh penyinaran dari beberapa minit hingga ke beberapa jam dengan maksima 79 sampel boleh dijalankan secara serentak di RR. Objek yang hendak disinari dimasukkan ke dalam bekas sampel yang bertutup kedap sebelum diisi ke dalam tiub penyinaran RR.



Rak yang mengandungi 40 tiub penyinaran akan berputar dengan perlahan dan berterusan sepanjang tempoh dedahan menggunakan sama ada dial secara manual atau motor elektrik dengan kelajuan seminit untuk setiap pusingan bagi membolehkan pendedahan neutron yang seragam. Setelah penyinaran selesai dan tempoh penyejukan tamat, sampel ditarik keluar daripada RR menggunakan pancing yang direka khas. Langkah yang dilaksanakan semasa proses mengeluarkan sampel daripada RR adalah untuk mengekalkan jarak selamat antara pengendali sampel dan sampel tersinar supaya dos dedahan kepada pengendali di tahap minima.

Sampel yang memerlukan tempoh penyinaran singkat pula disinarkan di Sistem Pemindah Pneumatik (PTS). Kemudahan PTS terdiri daripada sistem paip yang menyambungkan bilik pneumatik dengan satu lokasi penyinaran di dalam teras RTP. Penyinaran PTS menggunakan konsep perbezaan tekanan udara dan jangka masa penyinaran boleh ditetapkan dari beberapa saat hingga ke beberapa minit secara manual atau automatik. Sampel penyinaran perlu dimasukkan ke dalam bekas sampel (*vial*) dan ditutup kedap sebelum dimasukkan ke dalam tiub penyinaran PTS. Sampel dikendalikan di dalam bilik pneumatik yang berperanan sebagai stesen penghantar dan penerima sampel. Bilik tersebut dilengkapi dengan kebuk wasap dan bahan perisai.

Sampel yang disinari akan menjadi radioaktif dan menyinaran berbagai jenis sinaran bergantung kepada unsur yang wujud. Sistem pengesan *high purity germanium gamma spectrometer* (HPGe) kemudiannya digunakan untuk menganalisis spektrum gama daripada sampel yang melalui proses pengaktifan neutron bagi menentukan komposisi unsur bahan yang terkandung di dalamnya. Makmal Fizik Neutron di PTR mempunyai kemudahan penyediaan sampel dan turut dilengkapi dengan sistem HPGe yang berkeupayaan untuk mengesan jenis unsur berdasarkan spektrum sinar gama yang boleh digunakan untuk forensik nuklear dan sebagainya.

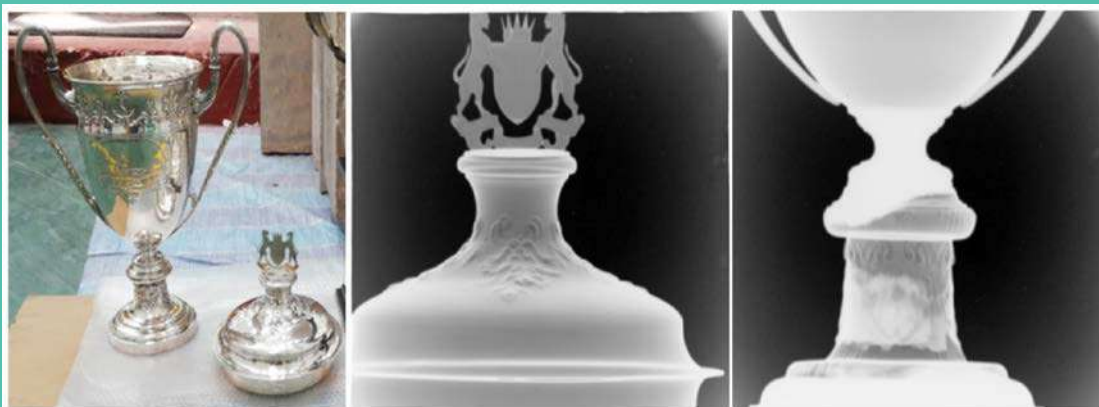
Radiografi Neutron

Teknik radiografi neutron (NR) adalah kaedah ujian tanpa musnah berdasarkan pengimejan struktur keadaan dalaman sesuatu objek. Tujuannya adalah bagi menggambarkan dan mengesan ketakselajaran sesuatu objek atau bahan dengan menggunakan neutron. Neutron mempunyai tenaga serta memiliki sifat yang menyerupai sinar-X iaitu kuasa penembusan yang tinggi. Walau bagaimanapun, neutron memiliki daya tembus yang lebih kuat berbanding sinar-X untuk elemen berat seperti uranium, plumbum, besi keluli dan seumpamanya. Neutron berinteraksi dengan nukleus dalam sesuatu bahan, dan perubahan arah pergerakan atau penyerapan neutron memberikan informasi tentang struktur dalaman bahan tersebut yang mana tidak diperolehi dengan menggunakan sinar-X.

Sistem radiografi neutron pertama yang juga fasiliti perintis di RTP, telah dipasang di fasiliti penyinaran luar teras reaktor *Beam Port 1* (BP1), pada 8 Disember 1983 dan dinamakan NUR. Pada 12 November 1984, fasiliti NUR 2 dibangunkan di lubang alur neutron *Beam Port 3* (BP3) bagi menggantikan NUR dan masih kekal sehingga kini yang dikenali sebagai NURI (*Neutron Radiography and Imaging*). Lubang alur neutron BP3 adalah jenis radial yang membentuk jejari dari bahagian luar pembalik teras reaktor ke permukaan perisai konkrit.

Lubang alur neutron jenis radial menjadi pilihan untuk fasiliti radiografi kerana memiliki neutron yang sekata. Pengkolimat dan bilik dedahan mempunyai ciri fleksibiliti dalam penempatan objek, dan kemampuan untuk mengurangi latar belakang neutron yang tidak diinginkan di dalam ruang eksperimen. Ciri-ciri ini penting untuk menghasilkan imej radiografi neutron yang berkualiti tinggi dan berkesan. Seiring dengan perkembangan teknologi, sistem NURI telah ditambahbaik dengan penggunaan kamera jenis *Coupled-Charged Device* (CCD) dan sistem manipulator, masing-masing bagi membenarkan teknik pengimejan digital dilakukan dan unjuran imej keratan rentas dua dimensi dihasilkan melalui teknik tomografi.

Fasiliti radiografi neutron di RTP telah digunakan untuk mengesan kakisan dan kelembapan pada komponen komposit kapal terbang, pengesanan nodul akar dalam penyelidikan mutasi biak baka, pemeriksaan komponen elektronik untuk mengenalpasti kecacatan komponen bagi kawalan mutu pembuatan, dan analisis sampel biologi bagi membezakan bunga tiruan dan asli.



Pengimejan radiografi neutron Piala HMS Malaya



Aktiviti latihan

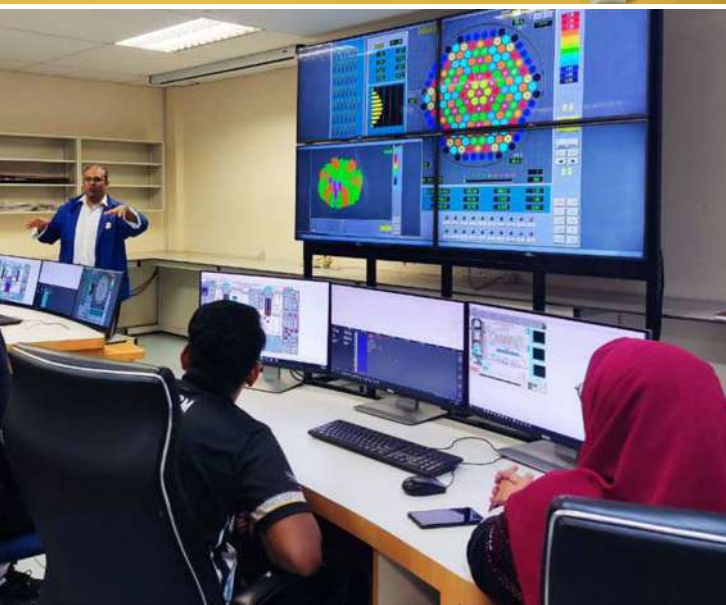


Jabatan Muzium dan Antikuiti turut menjalin kerjasama bagi mendapatkan imej radiografi menggunakan RTP bagi pemeriksaan artifak muzium. Sebagai contoh, Piala HMS Malaya disinarkan menggunakan teknik radiografi bagi menghasilkan imej yang memberi maklumat mengenai pembuatan, struktur dalaman dan mengesan sebarang kecacatan pada piala. Kajian pengimejan radiografi neutron ini dilaksanakan sempena pameran sambutan 100 tahun piala HMS Malaya oleh pihak Jabatan Muzium Malaysia di Muzium Negara, Kuala Lumpur. Piala ini telah digunakan di dalam kejohanan bolasepak di Malaysia semasa era penjajahan British, dinamakan sempena nama kapal perang tentera British, HMS Malaya. Selepas kejohanan tersebut, pertandingan bolasepak diteruskan melalui kejohanan Piala Malaysia hingga kini.

Pendidikan dan Latihan Berasaskan Reaktor Nuklear



RTP menawarkan latihan berkaitan fizik reaktor, hidraulik terma, perlindungan sinaran, dan instrumentasi dan kawalan di peringkat kebangsaan dan antarabangsa. Latihan berbentuk *hands-on experiments* dibuka kepada pelajar universiti, projek penyelidikan dan latihan sangkutan daripada dalam dan luar negara. Makmal Hidraulik Terma, Makmal Simulator Loji Kuasa Nuklear dan Makmal Simulasi Reaktor Penyelidikan yang dikendalikan oleh penyelidik di PTR digunakan bagi aktiviti penyelidikan, pendidikan dan latihan serta pembangunan di RTP.



Penyelidikan dan latihan berasaskan model simulasi berkomputer bagi reka bentuk pembangunan fasiliti penyinaran, pengurusan teras reaktor dan optik neutron turut dijalankan dengan menggunakan perisian berasaskan *Monte Carlo* seperti *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) dan *Monte Carlo Simulation of Triple Axis Spectrometers* (McSTAS). Banyak peluang kerjasama antara penyelidik di PTR dan universiti serta agensi lain dapat dilaksanakan.

RTP juga menjadi tumpuan pelawat daripada pelbagai lapisan masyarakat dan organisasi. Secara purata, lebih 1500 orang pelawat diterima RTP setiap tahun dan penambahan ketara bilangan pelawat setiap tahun membuktikan peningkatan kesedaran, penerimaan dan minat masyarakat terhadap sains dan teknologi nuklear di Malaysia.

dan pendidikan berasaskan reaktor nuklear dan lawatan daripada pelbagai organisasi.



Kawal Selia Bahan Nuklear

Oleh : Mohd Fairus bin Abdul Farid



Penglibatan Malaysia dalam penggunaan teknologi nuklear telah termeterai secara rasmi ketika negara menjadi ahli anggota kepada Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) pada tahun 1969. Agensi Nuklear Malaysia ditubuhkan pada 1972 berperanan sebagai agensi bertanggungjawab ke atas aktiviti-aktiviti penyelidikan dan pembangunan serta pengkomersilan teknologi nuklear.

Penggunaan teknologi nuklear secara selamat adalah asas utama dalam pelaksanaan aktiviti melibatkan nuklear serta menjaga keselamatan orang awam dan juga alam sekitar. Namun begitu, aspek penting yang perlu diberi perhatian adalah kawal selia bahan nuklear. Kawal selia bahan nuklear bertujuan untuk mencegah aktiviti penyalahgunaan bahan nuklear.

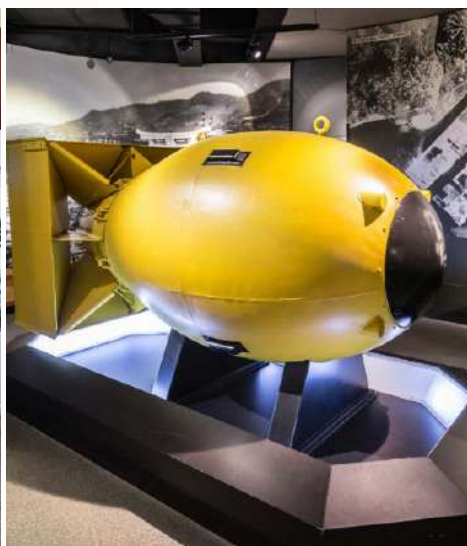
Kawal Selia Bahan Nuklear di Malaysia

Kejayaan ahli fizik terkenal Enrico Fermi bersama pasukannya berjaya menguji proses tindak balas berantai neutron yang menjadi asas proses pembelahan nuklear dalam reaktor tenaga pada tahun 1942 di bangunan stadium *University of Chicago* di Amerika Syarikat.

Namun begitu, Perang Dunia Kedua telah memberi titik hitam kepada penggunaan teknologi nuklear. Pada tarikh 6 Ogos 1945, Amerika Syarikat telah meledakkan bom atom "*Little Boy*" (Rajah 1a) di Hiroshima dan kemudiannya pada tarikh 9 Ogos 1945 "*Fat Man*" (Rajah 1b) bom kedua digugurkan di Nagasaki .



(Rajah 1a) Replika bom atom *little Boy*
Sumber : <https://www.history.navy.mil/>
National museum of the US Navy



(Rajah 1b) Replika bom atom *Fat Man*
Sumber : www.pacificwar.museum.org
National museum of the pacific war

Bertitik tolak daripada pengeboman tersebut, penggunaan teknologi nuklear untuk tujuan persenjataan telah dikekang, sebaliknya penggunaan terhadap aktiviti bukan persenjataan disuburkan untuk keamanan sejagat. Pada tahun 1953, Presiden Amerika Syarikat pada ketika itu, Dwight D. Eisenhower dalam ucapannya berkaitan "Atom for Peace" di Persidangan Pertubuhan Bangsa-bangsa Bersatu (PBB) telah menginspirasi penubuhan Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) pada tahun 1957 bagi mempromosikan penggunaan sains dan teknologi nuklear secara aman.

Antara fungsi IAEA yang termaktub dalam Artikel II Statut IAEA adalah memantau dan menyelia penggunaan teknologi nuklear di sesebuah negara supaya tidak disalahguna bagi tujuan ketenteraan. Selain itu IAEA juga diberi mandat untuk mengawal penggunaan teknologi nuklear oleh negara-negara anggota IAEA untuk tujuan keamanan. Sehubungan itu, pada tahun 1968 PBB telah memperkenalkan perjanjian yang dikenali *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons* (NPT). NPT adalah sebuah perjanjian antarabangsa yang bertujuan untuk mencegah penyebaran senjata nuklear, mempromosikan penggunaan tenaga nuklear secara aman dan akhirnya mencapai pelucutan senjata nuklear secara global.

Malaysia menandatangani NPT pada 1 Julai 1968 dan dikuatkuasa pada 5 Mac 1970. Sehubungan dengan komitmen Malaysia dalam NPT, Malaysia menandatangani *Comprehensive Safeguards Agreement* (CSA) pada 18 Mei 1973. Selepas menandatangani CSA, adalah menjadi obligasi kepada kerajaan Malaysia untuk mewujudkan *State System of Accounting for and Control of Nuclear Material* (SSAC). Elemen asas dalam SSAC ialah badan penguatkuasa negara terhadap pelaksanaan kawal guna, rekod dan laporan perakaunan, undang-undang, peraturan, proses, pentadbiran dan operator fasiliti nuklear.

Maklumat terperinci berkaitan kemudahan nuklear dan laporan perakaunan bahan nuklear, perlu dikemukakan kepada IAEA melalui Jabatan Tenaga Atom (Atom Malaysia) selaku agensi penguatkuasaan nuklear kebangsaan. Malaysia perlu memberi akses kepada pemeriksa IAEA untuk menentusahkan maklumat yang dihantar adalah tepat dan tidak menyimpang daripada penggunaan aman nuklear.

Bahan nuklear dikelaskan kepada dua kategori iaitu bahan nuklear dan bahan boleh belah. Jadual di bawah menjelaskan kategori bahan nuklear tersebut.

Bahan Nuklear

Uranium (*natural* dan *depleted*) dan Thorium dalam bentuk logam, aloi, sebatian kimia, atau kepekatan

Apa-apa bahan lain yang mengandungi satu atau lebih daripada yang tersebut di atas dalam kepekatan yang ditentukan oleh IAEA.

Bahan Boleh Belah

Plutonium-239, Uranium-233, Uranium yang diperkaya dalam 235 atau 233

Sesuatu bahan yang mengandungi satu atau lebih daripada elemen di atas.

Lain-lain bahan boleh belah yang ditentukan oleh IAEA seperti Thorium.



Rajah 2 : Depleted uranium dalam alat gamma projector
Sumber : www.ndt.com.au, NDT equipment sales



Rajah 3 : Himpunan bahan api nuklear yang mengandungi uranium yang diperkaya
Sumber : www.oecd-nea.org, Nuclear Energy Agency



Rajah 5 : Pemeriksa kawal





Rajah 4 Bahan api RTP

Terdapat dua lokasi kemudahan nuklear di Malaysia didaftarkan di bawah kawal selia IAEA, iaitu Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) dan juga *Location Outside Facility* (LOF). LOF bermaksud sebarang lokasi bukan kemudahan nuklear yang menggunakan bahan nuklear kurang daripada 1kg. Fasiliti LOF adalah di bawah seliaan Atom Malaysia, manakala fasiliti RTP di bawah tanggungjawab Nuklear Malaysia.

Sebanyak 129 bahan nuklear (bahan api: Rajah 4) termasuklah rod kawalan yang digunakan dalam fasiliti nuklear RTP, justeru bermaksud Malaysia terikat dengan CSA ataupun kawal selia bahan nuklear untuk tujuan keamanan.

Sistem pengurusan perakaunan bahan nuklear di RTP merangkumi tiga aktiviti iaitu *Physical Inventory Taking* (PIT), *Physical Inventory Listing* (PIL) dan *Material Balance Report* (MBR). Manakala aktiviti *Physical Inventory Verification* (PIV) dilakukan oleh pemeriksa kawal selia IAEA di RTP untuk verifikasi laporan perakaunan (PIL, MBR, dan lain-lain) yang telah dihantar. Rajah 5 menunjukkan pemeriksa kawal selia IAEA bersama pegawai Nuklear Malaysia dan Atom Malaysia manakala Rajah 6 menunjukkan aktiviti-aktiviti PIV yang sedang dijalankan di RTP.

Melalui proses verifikasi oleh pihak IAEA, ini menunjukkan komitmen tinggi negara terhadap pengawalseliaan bahan nuklear dan pematuhan NPT di Malaysia.



Kawal selia IAEA bersama pegawai dari Nuklear Malaysia dan Atom Malaysia



Rajah 6 : Aktiviti-aktiviti PIV di RTP

Pengenalan Sekuriti Nuklear

Sekuriti nuklear adalah konsep dan prosedur yang dilaksanakan untuk mencegah, mengesan dan bertindak balas terhadap pemerolehan, pemilikan atau penyebaran bahan, kemudahan dan teknologi nuklear tanpa kebenaran untuk tujuan jahat. Sekuriti nuklear agak kritikal ke atas keselamatan global disebabkan potensinya yang boleh mengakibatkan bencana akibat daripada keganasan manusia.

Tanggungjawab dan tugas sekuriti nuklear merangkumi penglibatan pelbagai pihak berkuasa dalam sesebuah negara dan mempunyai pelan penggunaan dan pencegahan yang komprehensif. Komponen sekuriti nuklear adalah;



Contoh komponen keselamatan fizikal yang digunakan oleh fasiliti nuklear

Sumber : Texas A&M University College of Engineering &
<https://www.belfercenter.org/publication/revitalizing-nuclear-security-era-uncertainty>

Keselamatan fizikal

Komponen ini ialah infrastruktur kekuatan fizikal untuk melindungi bahan, peralatan dan kemudahan nuklear daripada akses tanpa kebenaran, kecurian, sabotaj atau usaha pelencongan terhadap kawalan bahan tersebut. Secara asasnya fasiliti nuklear mesti dilengkapi dengan prasarana sistem keselamatan seperti kawalan akses, pengawasan fasiliti serta pegawai keselamatan yang berada dalam keadaan siap siaga.



Aktiviti perakaunan bahan nuklear sedang dilakukan

Sumber : <https://www.un.org/en/file/146096>

Kawalan dan perakaunan bahan nuklear

Komponen ini merangkumi sistem inventori yang digunakan bagi menjejaki pergerakan dan penggunaan bahan nuklear dalam sesebuah fasiliti seperti RTP. Perkara ini dilakukan untuk mengelakkan kehilangan bahan nuklear dan mengenal pasti bahan nuklear yang dijana daripada sesuatu operasi. Perakaunan dilakukan secara kuantitatif. Pemeriksaan berdasarkan protokol yang ketat digunakan semasa mengendalikan bahan nuklear.

Sekuriti NUKLEAR

Oleh : Mohd Fairus bin Abdul Farid



Pemeriksaan dan pemantauan berkala dilakukan pada kakitangan bagi kebenaran bekerja di fasiliti nuklear

Kebolehppercayaan kakitangan

Kakitangan yang mempunyai akses di sesebuah fasiliti nuklear mesti melalui proses pemeriksaan latar belakang peribadi yang ketat oleh pihak bertanggungjawab. Penilaian psikologi dan pemantauan peribadi secara berterusan direkod dari semasa ke semasa.



Pegawai penguatkuasa sedang memeriksa dokumen berkaitan agar tidak berlaku pelanggaran syarat lesen oleh fasiliti nuklear

Penyeliaan oleh pihak penguatkuasa

Pihak penguatkuasa seperti Lembaga Pelesenan Tenaga Atom (LPTA), Polis Diraja Malaysia (PDRM), Jabatan Kastam Diraja Malaysia (JKDM) dan sebagainya mempunyai tugas masing-masing bagi memastikan fasiliti nuklear beroperasi dengan selamat dan teratur. Pemeriksaan dan penguatkuasaan peraturan dan undang-undang membolehkan sebarang aktiviti yang salah dapat dikenakan hukuman yang setimpal.



Kerjasama antara badan pemantauan atau penguatkuasa antarabangsa membolehkan aktiviti penyalahgunaan bahan nuklear dapat dikekang

Kerjasama antarabangsa

Risiko jenayah rentas sempadan ke atas bahan nuklear agak tinggi memandangkan ancaman nuklear adalah bersifat global. Maka kerjasama antarabangsa dalam sekuriti nuklear adalah penting. Perkongsian maklumat, amalan terbaik dan teknologi dapat mengukuhkan langkah keselamatan bagi memerangi penyelewengan bahan nuklear di peringkat serantau dan global.



Contoh pemeriksaan dan pemantauan bahan radiologi di pintu masuk negara

Pemantauan dan pengesanan radiologi

Komponen ini merangkumi sistem untuk mengesan dan menghalang pergerakan atau penggunaan bahan nuklear secara haram. Pemantauan dan pengesanan sinaran dilakukan di pintu masuk/keluar sempadan, pelabuhan dan lokasi yang berpotensi berlakunya aktiviti penyeludupan.



Keselamatan siber menghalang ancaman digital kepada fasiliti nuklear

Keselamatan siber

Bertitik tolak dengan penggunaan teknologi digital secara meluas pada ketika ini, fasiliti nuklear semakin bergantung pada sistem digital untuk operasi dan kawalan. Keselamatan siber adalah penting untuk perlindungan fasiliti nuklear daripada ancaman siber seperti aktiviti sabotaj dan juga kemalangan nuklear.



Pemantauan dedahan kepada pasukan penyelamat semasa kecemasan

Tindak balas kecemasan

Komponen ini mempunyai pelan mitigasi sekiranya berlaku sebarang insiden nuklear. Kesediaan dan keupayaan pihak bertanggungjawab dalam memberi tindak balas kecemasan dapat mengurangkan kesan insiden melalui latihan dan komunikasi dan penyelarasan yang sistematik.



Perlaksanaan sekuriti nuklear boleh menghalang penggunaan bahan nuklear sebagai senjata pemusnah

Ketidakcambahan nuklear (Nuclear nonproliferation)

Usaha diplomatik yang berterusan dalam mencegah penyebaran senjata dan bahan nuklear adalah penting dalam keselamatan nuklear. Perjanjian kerjasama dalam kawalan eksport bahan nuklear bertujuan untuk menghalang akses teknologi ke atas bahan sensitif kepada pihak yang tidak sepatutnya. Impaknya membolehkan teknologi atau bahan nuklear dapat digunakan untuk aktiviti keamanan sejagat sahaja.

Secara keseluruhannya, sekuriti nuklear yang berkesan memerlukan pendekatan pelbagai yang menggabungkan langkah teknikal dan kepakaran, pengawasan kawalselia pihak bertanggungjawab, kerjasama antarabangsa dan diplomasi strategik. Pendekatan begini dapat mengurangkan risiko percambahan nuklear secara haram. Sesungguhnya, teknologi nuklear sangat berfaedah kepada manusia sejagat. Pemantauan, penguatkuasaan secara berterusan membolehkan stigma nuklear boleh disalahgunakan dapat dipadam terutama bagi rakyat Malaysia.

Pusat Teknologi Reaktor (PTR) telah mengendalikan Reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) berkuasa 1000 kW sejak tahun 1982. RTP menyediakan latihan dan perkhidmatan kepada syarikat swasta serta institusi awam, selain terlibat dalam beberapa projek penyelidikan yang dijalankan oleh universiti dan kumpulan penyelidikan lain. Sebagai sebuah kemudahan yang berusia lebih empat puluh tahun, isu penuaan merupakan aspek penting dalam keselamatan reaktor ini. Atas sebab ini, untuk mengurangkan kesan penuaan, RTP terpaksa menangani isu kemerosotan struktur, sistem dan komponennya (SSC) yang bergantung kepada masa. Sehubungan itu, satu Program Pengurusan Penuaan (AMP) RTP telah dibangunkan.

Program Pengurusan Penuaan (AMP) untuk reaktor TRIGA PUSPATI (RTP) adalah pendekatan berstruktur untuk memastikan bahawa reaktor beroperasi dengan selamat dan cekap sepanjang hayat operasinya, walaupun terdapat kesan penuaan terhadap komponen dan sistemnya. Perincian bagaimana AMP dikendalikan ada dinyatakan di dalam buku panduan *International Atomic Energy Agency (IAEA), Ageing Management for Research Reactors (IAEA Safety Standards Series No. SSG-10 (Rev. 1))* terbitan tahun 2023.

Takrif Penuaan

Penuaan dalam reaktor nuklear merupakan proses umum di mana sistem, struktur dan komponen (SSC) secara beransur-ansur mengalami kemerosotan (berubah ciri dan sifat) mengikut masa atau penggunaan. SSC reaktor terdedah kepada keadaan ekstrem, antaranya radiasi, suhu, dan tekanan yang tinggi menyebabkan bahan seperti logam, konkrit, dan elektronik menjadi lemah atau rosak seiring waktu. Jika tidak dipantau dan diselenggara dengan betul, kemerosotan ini boleh menyebabkan kepada kegagalan peralatan, risiko keselamatan atau mengurangkan prestasi reaktor.

PROG Penu TRIG



RAM PENGURUSAN dan Reaktor A PUSPATI (RTP)

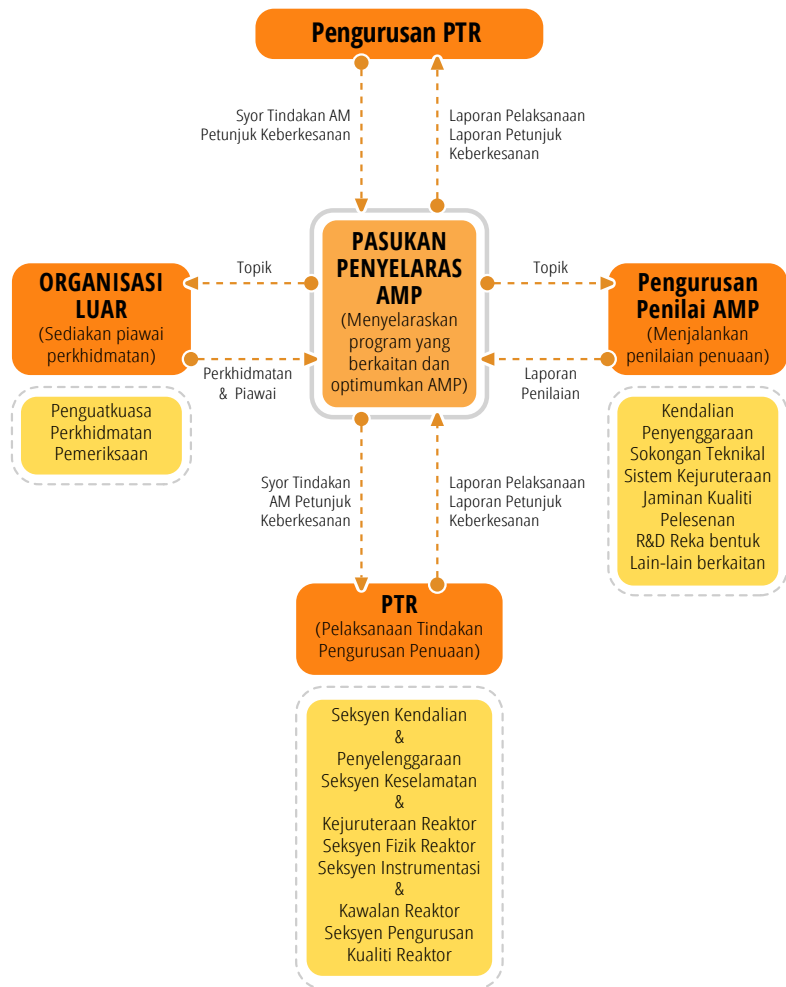
Oleh : Mazleha Maskin, PhD & Phongsakorn Praktom, PhD



Tujuan AMP dibangunkan adalah untuk menilai risiko-risiko ini dan melaksanakan strategi bagi memanjangkan jangka hayat operasi reaktor sambil memastikan ia terus beroperasi dengan selamat. Umumnya reaktor nuklear mengalami dua jenis perubahan bergantung masa, iaitu:

1. Degradasi (penuaan fizikal); kemerosotan ciri fizikal secara beransur-ansur.
2. Usang (penuaan bukan fizikal); teknologi lama berbanding dengan pengetahuan, peraturan, kod dan piawaian serta teknologi semasa.

Mengikut garis panduan IAEA, pengurusan penuaan memerlukan sistem pentadbiran yang mantap. Sehubungan itu, satu organisasi (Rajah 1) telah diwujudkan di dalam pentadbiran Pusat Teknologi Reaktor (PTR) yang menggariskan fungsi dan tanggungjawab, serta penentuan tahap kuasa dalam menyelia pengurusan penuaan RTP. Pendekatan ini memastikan kualiti yang diperlukan dalam membangunkan program,



Rajah 1. Carta organisasi AMP RTP



Rajah 2. Pelaksanaan proses pengurusan penuaan RTP

prosedur dan aktiviti pengurusan penuaan, sekaligus mengekalkan piawaian yang mantap sepanjang proses AMP RTP dijalankan.

AMP-RTP dibangunkan secara sistematik bagi menyediakan rangka kerja bersepadu untuk menyelaraskan semua program dan aktiviti sokongan yang berkaitan dengan pemahaman, kawalan, pemantauan dan pengurangan kesan penuaan di RTP. Rajah 2 menggambarkan pendekatan yang digunakan di RTP.

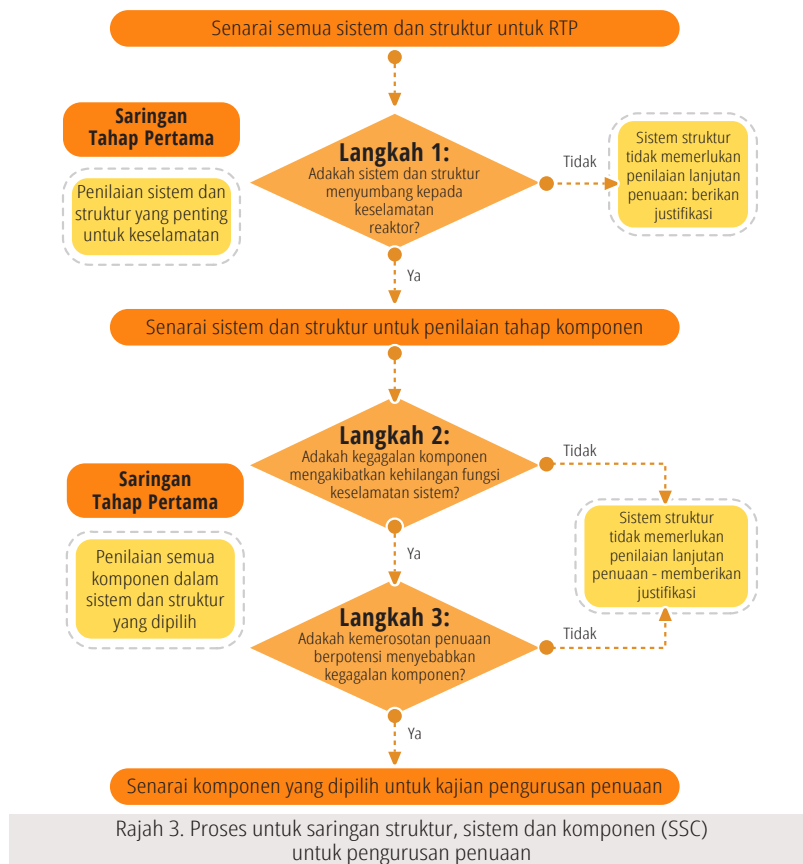
AMP-RTP terdiri daripada lapan (9) elemen berikut:

- i. Proses saringan SSC;
- ii. Pengenalpastian dan pemahaman mekanisme degradasi;
- iii. Meminimumkan kesan penuaan;
- iv. Pengesanan, pemantauan dan pengenalpastian trend dalam kesan penuaan;
- v. Pengurangan kesan penuaan;

- vi. Kriteria penerimaan;
- vii. Tindakan pembetulan;
- viii. Semakan dan penambahbaikan program pengurusan penuaan; dan
- ix. Penyimpanan rekod.

Proses Saringan SSC

Melaksanakan proses saringan SSC melibatkan kerja untuk menilai penuaan komponen kritikal. Aspek penilaian akan mengambil kira ketersediaan berterusan fungsi keselamatan yang diperlukan sepanjang hayat operasi reaktor, dengan mengesan perubahan yang berlaku dengan masa dan penggunaan. Proses saringan digambarkan dalam Rajah 3.



Untuk saringan pertama, pengenalpastian kepentingan SSC diklasifikasikan berdasarkan fungsi asas keselamatan kemudahan reaktor penyelidikan iaitu “3C” seperti berikut:

1. *(Control)* Mengawal kereaktifan;
2. *(Cooling)* Penyingkiran (penyejukan) haba daripada reaktor; dan
3. *(Containment)* Pembendungan bahan radioaktif, melindungi daripada sinaran dan mengawal pelepasan radioaktif yang dirancang, serta menghadkan pelepasan radioaktif yang tidak disengajakan.

Kriteria klasifikasi 3C adalah berdasarkan kemungkinan akibat kegagalan SSC, boleh membawa, secara langsung atau tidak langsung, akan mengakibatkan kehilangan atau kemerosotan fungsi keselamatan SSC. Jadual 1 merupakan dapatan secara kolektif pengenalpastian SSC menggunakan klasifikasi 3C.

Dalam saringan tahap kedua, tumpuan adalah untuk mengenal pasti kepentingan kegagalan komponen yang boleh mengakibatkan kemerosotan penuaan. Komponen disaring jika ia tidak menyumbang kepada prestasi fungsi keselamatan, termasuk komponen yang kegagalannya boleh menghalang SSC lain daripada melaksanakan fungsi yang dimaksudkan. Penilaian ini mempertimbangkan risiko setiap komponen terhadap isu berkaitan penuaan berdasarkan mekanisme yang diketahui dan sejarah operasi untuk memastikan fungsi keselamatan dikekalkan dengan berkesan.

Mengenalpasti dan Memahami Mekanisme Degradasi

Kemerosotan penuaan dalam reaktor penyelidikan nuklear adalah pertimbangan kritikal ke atas jangka hayat operasi yang panjang dengan potensi implikasi keselamatan yang rendah. Ia boleh menjejaskan pelbagai komponen reaktor, termasuk bahan struktur, komponen teras reaktor, dan sistem instrumentasi. Oleh itu, memahami dan mengurus degradasi penuaan adalah penting untuk memastikan reaktor penyelidikan dikendalikan dengan selamat dan cekap sepanjang hayat sebelum dinyah tauliah.

Bagi memahami kemerosotan penuaan SSC RTP, pengenalpastian dan pemahaman mekanisme degradasi adalah perlu. Beberapa mekanisme degradasi penuaan yang dijangkakan untuk keadaan perkhidmatan adalah berbeza. Mekanisme degradasi penuaan utama yang dikenal pasti untuk RTP terdiri daripada dua kategori: keadaan fizikal dan keadaan bukan fizikal. Proses yang merendahkan

Jadual 1. Pengenalpastian SSC

Bil	Sistem	Ya	Tidak	Mungkin
1	Sistem Penyejukan Utama	C1, C2, C3		
2	Sistem Penyejukan Sekunder	C1, C2, C3		
3	Sistem Penyulingan Air	C3		
4	Instrumentasi & Kawalan Reaktor	C1, C2, C3		
5	Sistem Pemantauan Sinaran			/
6	Sistem Perlindungan Kebakaran			/
7	Sistem Bekalan Kuasa Tidak Terganggu			/
12	Sistem Elektrikal	C1, C2, C3		
13	Sistem Sekuriti		/	
14	Teknologi Maklumat (IT) / Telekomunikasi		/	
15	Bangunan (Blok 20) • Teras Reaktor • Beamport	C1, C2, C3		
16	Rawatan Sisa		/	
17	Fasiliti Reaktor • Sistem Pneumatik		/	
19	Kolam Bahan Api Terpakai		/	
20	Sistem Pemonitoran Cerobong • Sistem Pengudaraan Aktif			C3

Nota:

C1: Mengawal; C2: Penyejukan; C3: Membendung

ciri fizikal SSC secara beransur-ansur boleh menyebabkan SSC tidak lagi memenuhi keperluan reka bentuknya. Mekanisme kemerosotan penuaan utama yang mempengaruhi keadaan fizikal SSC RTP adalah seperti kerosakan kesan sinaran, penuaan terma, rayapan kekaratan dan lain-lain. Perubahan dalam keadaan bukan fizikal juga boleh menjejaskan prestasi SSC yang diuruskan. Mekanisme kemerosotan penuaan utama yang dipengaruhi oleh keadaan bukan fizikal RTP SSC adalah seperti perubahan teknologi, alat ganti, perubahan peraturan dan keusangan dokumentasi.

Meminimumkan Kesan Penuaan

Tindakan pencegahan dan mitigasi diambil untuk meminimumkan atau menghehadkan kesan penuaan di RTP. Tindakan penambahbaikan perlu dengan mengambil kira pengalaman operasi dan hasil penyelidikan yang berkaitan. Tindakan meminimumkan kesan penuaan adalah seperti:

- Menilai keberkesanan kaedah dan amalan penyelenggaraan dan baik pulih semasa adalah penting untuk mengawal penuaan SSC.
- Program penyelenggaraan menjalani semakan berkala untuk

memastikan kaitan dan kecekapannya. Mewujudkan parameter operasi optimum dan mengamalkan amalan untuk mengurangkan kemerosotan SSC.

- Melaksanakan pelarasan dalam reka bentuk, bahan atau keadaan persekitaran, seperti yang diperlukan, untuk mengurangkan penuaan SSC.

Mitigasi dan Tindakan Pembetulan untuk Kesan Penuaan

Melibatkan gabungan strategi penyelenggaraan proaktif, sistem pemantauan dan penilaian berkala.

Tindakan pembetulan untuk program pengurusan penuaan reaktor penyelidikan biasanya melibatkan pendekatan sistematik untuk menangani isu yang dikenalpasti semasa penilaian atau pemeriksaan yang bertujuan untuk menguruskan kesan penuaan.

Semakan dan Penambahbaikan Program Pengurusan Penuaan RTP

Keberkesanan program pengurusan penuaan dinilai secara berkala berdasarkan pengetahuan semasa dan maklum balas daripada program dan penunjuk prestasi, dan harus dikemaskini dan diselaraskan mengikut kesesuaian.

Semakan mendalam harus menunjukkan bahawa kesan penuaan akan terus dikenal pasti dan diuruskan dengan berkesan untuk setiap struktur atau komponen sepanjang tempoh operasi reaktor. Keperluan untuk pengubahsuaian program berkaitan keselamatan sedia ada atau pembangunan mana-mana program baharu hendaklah dinyatakan dan digunakan. Keputusan semakan



mendalam ini harus didokumentasikan dan penemuan, termasuk sebarang tindakan pembetulan dan bidang untuk penambahbaikan, harus ditangani tepat pada masanya.

Pelaksanaan Program Pemantauan

Program pemantauan dibangunkan untuk menilai keadaan komponen dan sistem penting secara berterusan. Proses ini melibatkan pemeriksaan rutin, pengujian, dan analisis untuk mengesan sebarang tanda-tanda penguraian atau kemerosotan awal.

Penyimpanan Rekod

Semua aktiviti yang berkaitan dengan program pengurusan penuaan, termasuk penilaian, pemeriksaan, aktiviti penyelenggaraan, dan pengubahsuaian, didokumentasikan dan dilaporkan mengikut keperluan peraturan. Ini membantu dalam mengekalkan rekod aktiviti pengurusan penuaan RTP dan menunjukkan pematuan terhadap standard keselamatan.

Kesimpulan

Secara keseluruhan, program pengurusan penuaan adalah aspek penting untuk memastikan keselamatan, kebolehpercayaan dan kecekapan reaktor nuklear, terutamanya apabila ia semakin tua. Berpandukan garis panduan IAEA yang menyediakan rangka kerja tersusun dalam menilai, memantau, serta mengurangkan kesan penuaan, pihak pengurusan reaktor dapat memastikan reaktor terus beroperasi dengan selamat dan berkesan, memanjangkan jangka hayat operasi serta memenuhi piawaian keselamatan dan peraturan yang ketat.

Penyahtauliah Loji Nuklear:

Penamatan Pengoperasian dengan Selamat untuk Jaminan Masa Depan

Oleh : Muhammad Khairul Ariff Mustafa

Pengenalan

Setiap loji nuklear yang dibangunkan samada untuk penyelidikan atau penjanaan elektrik mempunyai ciri hayat operasi yang tertentu. Biasanya, sekitar antara 30 hingga 60 tahun, bergantung kepada kebenaran pihak berkuasa. Komponen kejuruteraan seperti tangki kolam teras bahan api reaktor, penukar haba dalam sistem penyejukan dan pengesan neutron dalam sistem kawalan akan mengalami penuaan. Komponen lama ada yang tidak ekonomik untuk diganti dan tidak selamat jika terus digunakan. Keadaan ini memerlukan penyelenggaraan yang berkuatli dan jika masih tidak selamat maka pertimbangan untuk dinyahtauliah perlu diteliti dengan bijak oleh pihak yang bertanggungjawab. Nyahhtauliah merujuk kepada tindakan pentadbiran, perundangan dan teknikal yang diambil oleh pihak bertanggungjawab untuk membebaskan kuasa kawalan pihak kawal selia nuklear ke atas tapak loji.

Penyahtauliah

Nyahhtauliah loji nuklear adalah proses untuk menamatkan kebenaran operasi dan dalam masa yang sama memastikan keadaannya selamat dan terjamin. Pelan nyahtauliah yang teliti perlu diwujudkan supaya pematuhan terhadap protokol keselamatan serta pengurusan bahan radioaktif dapat dilaksanakan dengan teratur.

Pelan nyahtauliah merangkumi pelaksanaan aktiviti seperti perancangan, pencirian fizikal dan radiologi, penyahcemaran fasiliti dan tapak, pembongkaran, dan pengurusan sisa radioaktif dan bahan api.



Sumber: <https://www.iaea.org>

Proses Penyahतालiah

Penyahतालiah sesuatu loji nuklear akan melibatkan beberapa peringkat. Peringkat yang kritikal bermula dari membuat keputusan untuk menamatkan secara kekal operasi loji sehinggalah kelulusan membenarkan kawasan loji dinyahतालiah dapat digunakan semula.

Peringkat 1 : Pemberhentian operasi secara kekal dan pengeluaran bahan api nuklear dari teras loji nuklear

Peringkat menamatkan operasi loji secara kekal dan mengeluarkan bahan api nuklear dari teras loji nuklear dan disimpan di dalam storan bahan api terpakai. Bahan api terpakai akan dikeluarkan dengan teliti dan disimpan dalam kolam penyimpanan bahan api bagi tujuan nyahhaba.

Peringkat 2 : Penjagaan dan Pemantauan

Setelah bahan api dikeluarkan, loji akan dipantau dengan teliti untuk tempoh tertentu. Keradioaktifan ke atas sistem, struktur dan komponen akan mulai menurun. Tempoh yang mencukupi diperlukan untuk memastikan proses penyahतालiah menjadi lebih selamat dan lebih mudah diurus. Pemantauan berterusan juga akan dilakukan untuk memastikan tapak berada dalam keadaan selamat dan mengesan sebarang kebocoran yang boleh menjejaskan alam sekitar.



Penyahतालiah reaktor DRAGON, United Kingdom.
www.gov.uk/government/consultations/nuclear-decommissioning-authority-draft-strategy/nuclear-decommissioning-authority-draft-strategy

Peringkat 3 : Nyahcemaran dan Pembongkaran

Peringkat paling kompleks adalah ketika menentukan tahap cemaran radioaktif dan nuklear bagi semua sistem, struktur dan komponen. Setiap sistem, struktur dan komponen yang tercemar akan dinyahcemar sebelum kerja pembongkaran. Tujuannya untuk memastikan pekerja sepanjang proses pembongkaran berada dalam keadaan selamat. Peralatan dan teknik khusus digunakan untuk mengendalikan dan membuang bahan radioaktif bagi mengurangkan dedahan kepada pekerja dan alam sekitar. Peringkat ini memerlukan perancangan yang teliti supaya keselamatan yang ketat dapat dilaksanakan melalui pematuhan terhadap peraturan yang ditetapkan.

Peringkat 4 : Pelepasan Tapak Akhir

Selepas nyahcemar dan pembongkaran sistem, struktur dan komponen loji selesai, langkah seterusnya adalah melibatkan urusan melepaskan tapak untuk penggunaan umum tanpa sebarang sekatan. Pihak berkuasa akan menjalankan pemeriksaan dan penilaian menyeluruh untuk memastikan semua kriteria keselamatan dipenuhi serta keadaan tapak selamat kepada manusia dan alam sekitar. Setelah pelepasan tapak diluluskan, maka kawasan berkenaan boleh digunakan untuk tujuan lain.

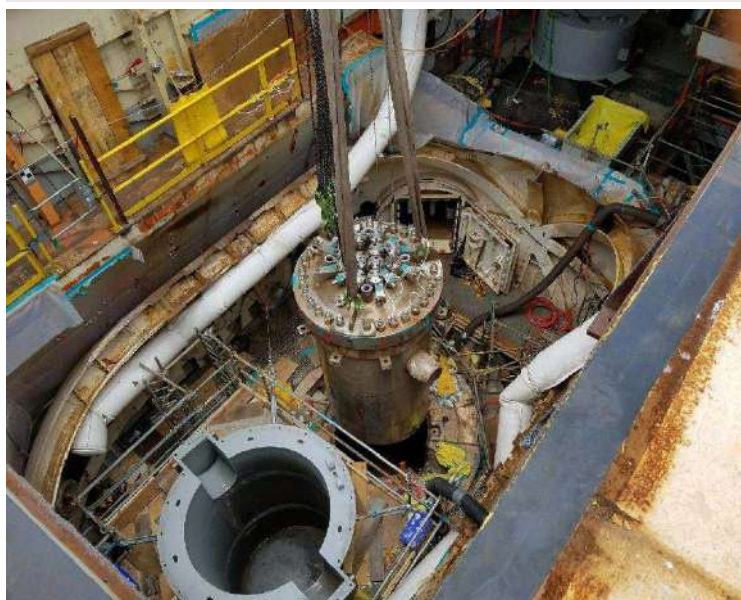
Cabaran dalam Penyahतालiah Loji Nuklear

Penyahतालiah loji nuklear mempunyai beberapa cabaran, terutamanya berkaitan dengan keselamatan, kos, dan persepsi orang awam. Keselamatan menjadi keutamaan sepanjang proses penyahतालiah untuk mengelakkan pendedahan radiasi dan memastikan pemindahan dan pembuangan bahan radioaktif dengan selamat. Penglibatan komuniti juga penting, kerana pihak berkepentingan perlu memahami dan yakin dengan langkah-langkah keselamatan serta perlindungan alam sekitar yang dijalankan oleh pihak bertanggungjawab.



Pembongkaran tangki bertekanan di reaktor terapung, U.S. Army's MH-1A, United States.

Sumber: <https://www.nad.usace.army.mil/Media/News-Stories/Article/1234117/sturgis-decommissioning-hits-major-milestone-with-deactivated-nuclear-reactor-p/>



Pembongkaran konkrit reaktor DRAGON, United Kingdom

Sumber: <http://www.bdnuclear.co.uk/projects/projectdetails.aspx?pname=Dragon-Bio-Shield-Removal&projid=215>



Contoh tapak loji tenaga nuklear setelah mendapat pelepasan tapak akhir

Kepentingan Penyahtauliah

Penamatan operasi dan penyahtauliah loji nuklear adalah satu proses yang penting. Penyahtauliah akan memastikan loji nuklear yang tidak lagi beroperasi tidak membahayakan manusia atau alam sekitar dalam jangka masa panjang. Penyahtauliah secara teratur membolehkan tapak digunakan semula sementara komponen struktur dan bahan yang berharga seperti logam dan konkrit yang tidak bersifat radioaktif dapat digunakan untuk tujuan lain. Kesungguhan dalam mematuhi standard antarabangsa dan amalan terbaik dari negara-negara lain, pihak operator loji nuklear dapat menunjukkan komitmen yang tinggi terhadap keselamatan nuklear dan tanggungjawab terhadap manusia dan alam sekitar.

Kesimpulan

Penamatan operasi dan penyahtauliah loji nuklear adalah proses sistematik dan teratur yang memerlukan perancangan teliti, pematuhan terhadap protokol keselamatan, dan pemantauan alam sekitar yang berterusan. Dengan menamatkan pengoperasian loji nuklear dengan selamat, perlindungan kesihatan pada orang awam dan alam sekitar menjadi keutamaan serta menggalakkan pembangunan loji nuklear dengan lebih bertanggungjawab. Dengan kemajuan teknologi dan kerangka kerja penguatkuasaan yang berkembang, proses penyahtauliah akan terus berkembang, menjadikan pembangunan loji nuklear yang selamat dan berkesan untuk masa depan.

PENEROKAAN TEKNOLOGI SMALL MODULAR REACTORS (SMR) Terhadap Penjanaan Tenaga Elektrik di Malaysia

Oleh : Julia Abdul Karim, D.Eng

Pengenalan

Small Modular Reactors (SMRs) merupakan loji nuklear reka bentuk baharu yang mempunyai ciri-ciri saiz yang kecil, kos yang rendah, dan ciri-ciri keselamatan yang baik. Terdapat beberapa negara sedang membina SMR bagi tujuan demonstrasi di seluruh dunia. Malaysia boleh mempertimbangkan penerokaan teknologi SMR dalam penjanaan tenaga elektrik untuk meningkatkan kestabilan dan kualiti tenaga, mengurangkan kebergantungan kepada bahan api berasaskan karbon demi mencapai matlamat kelestarian alam sekitar. Malaysia menghadapi peningkatan penduduk dan permintaan tenaga yang ketara akibat perkembangan industri. Kelebihan SMR adalah sesuai ditempatkan berhampiran kawasan bandar, industri, kawasan terpencil atau wilayah yang tidak mempunyai akses kepada grid tenaga besar. Sehubungan itu, SMR boleh mengurangkan keperluan untuk penghantaran kuasa jarak jauh dan memberikan penyelesaian tenaga yang stabil.

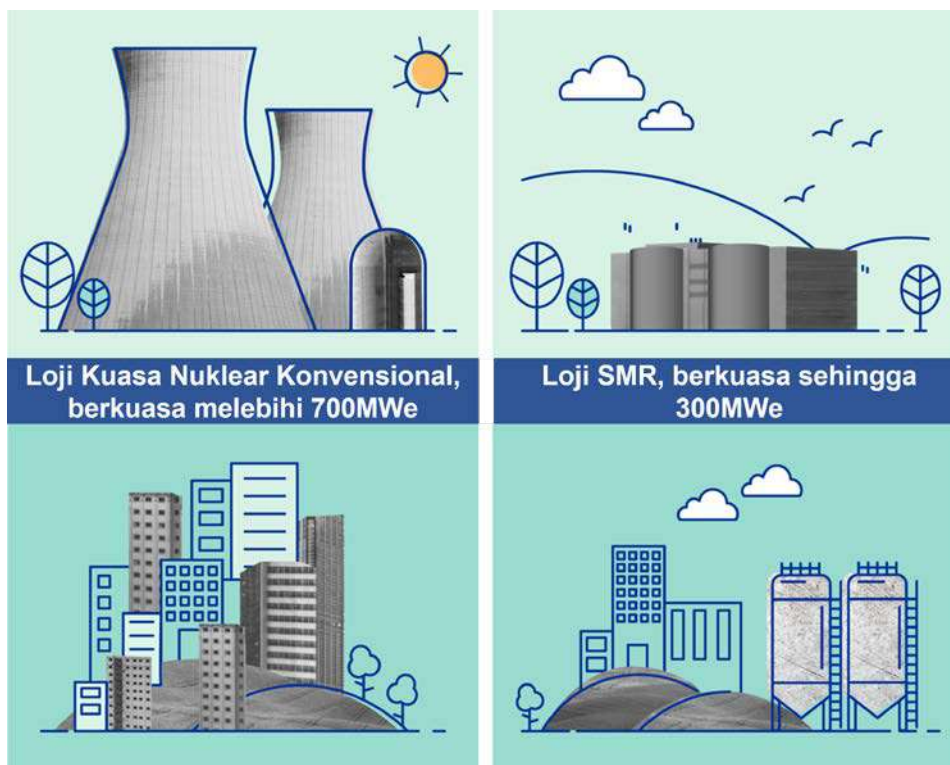
Secara relatifnya, masa yang diperlukan untuk membina SMR adalah lebih singkat, biasanya beberapa tahun berbanding dengan hampir satu dekad untuk reaktor besar. Faktor ini menjadikan SMR lebih menarik kerana risiko kewangan dalam pembangunan tenaga nuklear dapat dikurangkan. Selain itu, ciri-ciri keselamatan yang dipertingkatkan mengurangkan risiko kemalangan nuklear dan meningkatkan tahap keselamatan operasi. Kuasa SMR yang rendah membolehkan teknologi ini diintegrasikan ke dalam sistem tenaga sedia ada tanpa memerlukan infrastruktur yang besar.

SMR melepaskan karbon yang rendah, justeru dapat mengurangkan kesan rumah hijau terhadap alam sekitar. Ini adalah selaras dengan komitmen Kerajaan untuk menggunakan tenaga bersih dan hijau.

Pengintegrasian SMR ke dalam campuran kapasiti penjanaan tenaga sedia ada, Malaysia perlu mengembangkan rangka kerja perundangan dan polisi yang sesuai. Bagi mengintegrasikan SMR ke dalam campuran kapasiti penjanaan tenaga, Malaysia perlu mengembangkan rangka kerja perundangan dan polisi yang sesuai. Penerokaan teknologi ini boleh membuka peluang kerjasama antarabangsa dan meningkatkan reputasi Malaysia dalam bidang tenaga nuklear.

Memahami Teknologi SMR

Secara amnya, SMR mempunyai kapasiti kuasa elektrik antara 10 hingga 300 megawatt (MW), berbanding dengan reaktor nuklear konvensional yang mempunyai kapasiti sekitar 1,000 MW atau lebih (Rajah 1). Jenis reaktor nuklear ini direka bentuk secara modular, yang mana komponen-komponennya dibina di kilang dan dipasang di tapak pembinaan. Menerusi pendekatan ini, kos dan tempoh pembinaan dapat dijimatkan serta kawalan kualiti dapat dipertingkatkan. SMR menggunakan sistem penyejukan yang tidak memerlukan kuasa luaran atau campur tangan manusia untuk berfungsi, justeru, mengurangkan risiko kemalangan. Banyak reaktor SMR direka dengan ciri-ciri keselamatan yang mengurangkan risiko pelepasan radiasi dalam kejadian kecemasan. Contohnya, beberapa rekaan menggunakan komponen bahan api yang lebih tahan panas atau mempunyai struktur yang meminimalkan kemungkinan kebocoran radiasi.



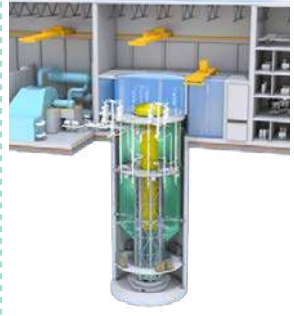
Rajah 1 : Perbezaan antara loji kuasa nuklear konvensional dan SMR

Setiap jenis SMR menggunakan pendekatan yang berbeza dalam rekaan dan operasi untuk mencapai matlamat keselamatan, keberkesanan, dan kelestarian teknologi reaktor sedia ada seperti Reaktor Air Bertekanan (PWR), Teknologi Reaktor Air Didih (BWR), Reaktor Gas Suhu Tinggi (HTGR), Reaktor Natrium Cepat (SFR), Reaktor Garam Cair (MSR) dan Reaktor *Lead-Cooled Fast Reactor* (LFR) telah diadaptasi untuk SMR (Rajah 2).

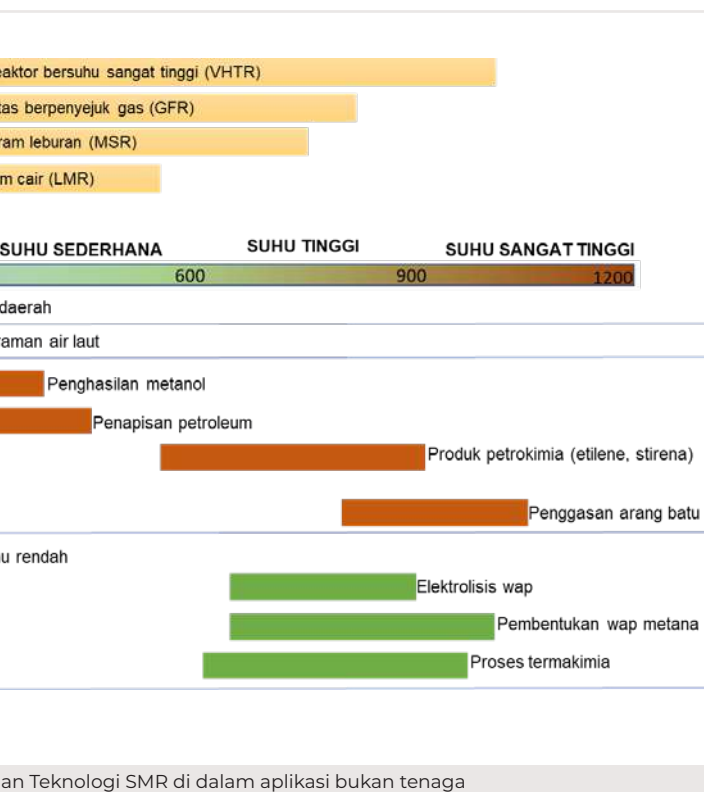
Selain dari penjanaan tenaga, teknologi SMR turut menawarkan penyelesaian inovatif untuk memenuhi penggunaan bukan tenaga seperti keperluan haba industri dan penghasilan hidrogen berdasarkan keupayaan operasi pada pelbagai julat suhu (Rajah 3). SMR dengan suhu operasi rendah hingga sederhana (200–600°C) sesuai untuk aplikasi proses haba industri seperti penyahgaraman, dan pemanasan kawasan, selain menyokong penghasilan metanol dan penapisan petroleum. Pada suhu tinggi (600–900°C), teknologi ini sesuai untuk aplikasi yang lebih intensif seperti penghasilan produk petrokimia (contohnya etilena dan stirena) serta gasifikasi arang batu.



Rajah 3 : Penggunaan

CP 100 NC, China 	NUWARD EDF led Consortium France 	SMART KAERI, Korea dan K.A.CARE, Arab Saudi 	NuScale NuScale Power, LLC, USA 	BWRX-300 GE-Hitachi & Hitachi-GE Nuclear Energy, USA and Japan 
Status Reka bentuk Ma lesen untuk paaan pada Julai penggalan tapak FCD pada 2021	Status Reka bentuk Dalam peringkat reka bentuk konsep; Konsortium dilancarkan pada September 2019	Status Reka bentuk Telah menerima kelulusan standard/ perlesenan reka bentuk (Julai 2012), Kejuruteraan selesai	Status Reka bentuk Kelulusan pensijilan reka bentuk diterima pada September 2020 bagi memulakan pembinaan menjelang 2023	Status Reka bentuk Pra-perlesenan telah dimulakan; Negara UK, Kanada dan AS mensasarkan pembinaan bermula pada 2024 dan beroperasi pada 2027
Spesifikasi Teknikal * Integral PWR * 125MWe * Natural circulation * Core Outlet Temperature : 319.5°C * Enrichment : <4.95% * Refuel interval : 24 months	Spesifikasi Teknikal * Integral PWR * 540MWt x 2/170 MWe x 2 module * Core Outlet Temperature : 307°C * Enrichment : <5% * Refuel interval : 24 months	Spesifikasi Teknikal * Integral PWR * 365MWt /170 MWe per module * Core Outlet Temperature : 322°C * Enrichment : <5% * Refuel interval : 30 months * For cogeneration	Spesifikasi Teknikal * Integral PWR * 200MWt /60 MWe per module x modules * Natural circulation * Core Outlet Temperature : 321°C * Enrichment : <4.95% * Refuel interval : 24 months	Spesifikasi Teknikal * Boiling water reactor (BWR) * 870MWt /290 MWe * Natural circulation * Core Outlet Temperature : 287°C * Enrichment : <4.95% * Refuel interval : 24 months

Rajah 2 : Contoh Teknologi SMR



Pada suhu sangat tinggi (900–1200°C), SMR menjadi medium utama untuk penghasilan hidrogen melalui proses seperti elektrolisis wap, *steam methane reforming*, dan proses termokimia. Contoh teknologi SMR yang beroperasi pada suhu tersebut adalah seperti *Gas-cooled Fast Reactors* (GFR), *Very High Temperature Reactors* (VHTR), dan *Molten Salt Reactors* (MSR) memberikan keupayaan unik untuk memenuhi keperluan industri berat dan aplikasi inovatif dengan kecekapan tinggi. Teknologi ini menyumbang kepada pembangunan mampan dalam sektor industri dan tenaga.

Kesimpulan

Penerokaan teknologi SMR dalam penjanaan tenaga elektrik di Malaysia berpotensi memberikan manfaat yang signifikan dalam memenuhi keperluan tenaga yang semakin meningkat, mengurangkan impak alam sekitar, dan meningkatkan keselamatan tenaga negara. SMR boleh menjadi komponen penting dalam landskap tenaga di Malaysia pada masa hadapan melalui strategi yang tepat, pelaburan berterusan, dan sokongan polisi yang kuat.



i-NUKLEAR

ILMU . IDEA . INFORMASI



AGENSI NUKLEAR MALAYSIA
Bangi, 43000 Kajang, Selangor Darul Ehsan