PENGEMBANGAN SISTEM ANALISIS NUKLIR TERINTEGRASI UNTUK PEMANTAUAN RADIASI LINGKUNGAN DAN REAKTOR NUKLIR TINGKAT LANJUT DI INDONESIA

Program Talenta Unggul 3P

Cici Wulandari[1,2], Marisa Variastuti[1], Ismail Humolungo[1]

[1]Program Studi Doktor Rekayasa Nuklir, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

[2]Pusat Sains, Teknologi, dan Inovasi Nuklir, Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi strategi manajemen bahan bakar pada *Molten Salt Reactor* (MSR) spektrum termal 450 MWth (4 *region*) selama 8.000 hari dan *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR) 3.200 MWth selama 3.200 EFPD menggunakan kode SRAC2006 serta memetakan radiasi alam Jawa-Bali untuk mendukung PLTN Generasi IV di Indonesia. Pada MSR termal, skenario *fuel feeding* per 200 hari dan *chemical processing* per 2.000 hari menunjukan kondisi paling optimal menjaga kekritisan hingga 8.000 hari (keff EOL 1,01414 dan CR 1,01896), mereduksi akumulasi limbah aktinida minor (Np, Am, Cm), serta menstabilkan distribusi temperatur teras. Pada MSFR spektrum cepat, penggunaan garam klorida menghasilkan spektrum neutron yang jauh lebih keras (puncak 302–388 keV) dibandingkan fluorida (31,8–40,9 keV), sehingga mengurangi kebutuhan massa awal Pu fisil hingga 50% dan efektif membakar aktinida minor hingga 328,6–1.161,3 kg selama 3.200 EFPD. Konsentrasi Kalium (0,08–3,07%) dan laju dosis radiasi (0,16–0,24 µSv/jam) tertinggi ditemukan di Jepara (kode M3), sejalan dengan karakter magma potasik busur Sunda bagian utara. Seluruh lokasi memiliki estimasi dosis tahunan luar ruang di bawah 1 mSv/tahun, sehingga radiasi alamiah terestrial bukan kendala radiologis pada tahap awal pertimbangan perkembangan PLTN di Indonesia. Data ini berfungsi sebagai data awal radiasi lingkungan sebagai pemantauan radiasi lingkungan untuk mendukung pengembangan PLTN di Indonesia.

Kata Kunci: *Chemical Processing, Feeding Fuel,* MSR, MSFR, Radiasi, Radionuklida.

Pendahuluan



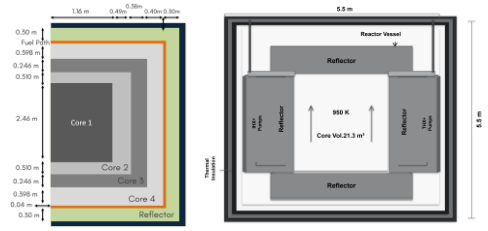
Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Generasi IV di Indonesia guna mendukung target *Net Zero Emission* 2060 membutuhkan integrasi antara desain sistem manajemen bahan bakar reaktor yang efisien serta ketersediaan data lingkungan radiasi alam yang andal.

Molten Salt Reactor (MSR) → **Generation 4 Nuclear Reactor**



Gambar 1. Peta Jalur Penelitian Radiasi di Pulau Jawa dan Pulau Bali

Metode Penelitian



(a) (b)

Gambar 2. Konfigurasi teras (a) MSR Thermal dan (b) MSFR

Tabel 1. Manajemen bahan bakar

Skenario	Deskripsi
Skenario 1 (S1)	once-through fuel cycle (siklus bahan bakar sekali pakai)
Skenario 2 (S2)	Proses penambahan bahan bakar (feeding fuel)
Skenario 3 (S3)	Proses penambahan bahan bakar dan pemrosesan kimia (chemical processing)

Evaluasi dilakukan pada desain MSR termal empat region (450 MWth) selama 8.000 hari dan MSFR spektrum cepat (3.200 MWth) selama 3.200 EFPD dengan enam kombinasi bahan bakar (TRU, RGr-Pu, MOX-Pu) dalam garam fluorida dan klorida.



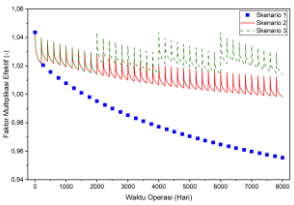
a b c

Gambar 3. a) Detektor GMC 500+, b) Detektor Pocket geiger Type6, c) GPS Garmin eTrex 10

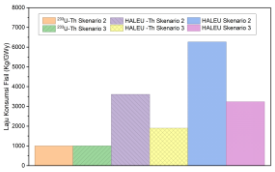
Metode pengukuran radiasi menggunakan detektor *Geiger Muller Counter* (GMC) 500+ dikombinasikan dengan GPS Garmin eTrex 10. Dan perangkat detektor gamma Pocket Geiger Type6.

Hasil & Pembahasan

MSR Termal 450 MWth



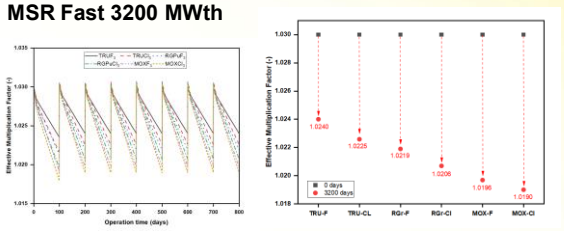
Gambar 4. Evolusi keff MSR untuk tiga skenario



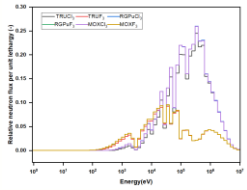
Gambar 5. Laju konsumsi

Skenario 2 hanya mampu mempertahankan kekritisan hingga hari ke-6.980 dan berakhir subkritis di keff = 0,99816 (turun 4,35%), sedangkan Skenario 1 (*once-through*) menurun paling tajam hingga keff = 0,95539 (kehilangan reaktivitas 8,45%). Sedangkan, Skenario 3 yang mampu menjaga reaktor tetap kritis hingga 8.000 hari dengan keff akhir 1,01414 (penurunan reaktivitas 2,82%). ^{233}U-Th memiliki efisiensi tertinggi dengan laju konsumsi fisil terendah sebesar 997,07 kg/Gwy.

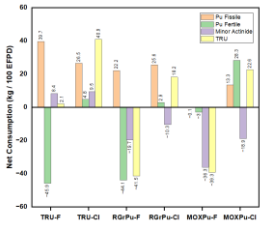
MSR Fast 3200 MWth



Gambar 6. Evolusi keff MSFR untuk variasi bahan bakar dan garam cair.



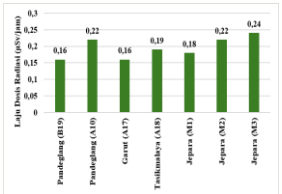
Gambar 7. Fluks neutron relatif



Gambar 8. *Net consumption*

Penurunan keff terbesar terjadi pada MOX (keff akhir 1,0190 pada klorida dan 1,0196 pada fluorida), diikuti oleh RGr-Pu (1,0206 dan 1,0219), serta penurunan paling kecil pada TRU (1,0225 dan 1,0240) karena transmutasi aktinida minor ikut menopang reaktivitas teras. Garam klorida menghasilkan spektrum neutron yang jauh lebih keras dengan puncak fluks di 302–388 keV. Konfigurasi bahan bakar RGr-Pu dan MOX-Pu efektif sebagai pembakar bersih limbah aktinida minor dengan reduksi kumulatif mencapai 328,6–1.161,3 kg.

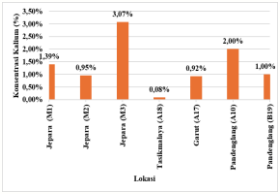
Laju Dosis Radiasi



Gambar 9. Laju Dosis Radiasi

Jepara M3 memiliki konsentrasi Kalium tertinggi yaitu 3,07% sekaligus laju dosis tertinggi yaitu 0,24 µSv/jam. Pandeglang A10 nilai Kalium 2,00% dan laju dosis 0,22 µSv/jam dibandingkan Pandeglang B19 nilai Kalium yaitu 1,00% dan laju dosis radiasi 0,16 µSv/jam.

Konsentrasi Kalium



Gambar 10. Konsentrasi Kalium (%)

Jepara M2 nilai laju dosis 0,22 µSv/jam lebih tinggi dari Jepara M1 dan laju dosis radiasi 0,18 µSv/jam tapi nilai Kaliumnya lebih rendah yaitu 0,95% dan 1,39%. Tasikmalaya A18 nilai Kalium 0,08% tetapi laju dosisnya 0,19 µSv/jam lebih tinggi daripada Jepara M1 dan Garut A17 yang memiliki nilai Kalium 1,39% dan 0,92% dan laju dosis 0,18 µSv/jam dan 0,16 µSv/jam.

Kesimpulan

Strategi manajemen bahan bakar melalui *fuel feeding* dan *chemical processing* menunjukan dapat menjaga stabilitas neutronik dan termal pada operasi MSR jangka panjang, dengan siklus ^{233}U–Th memberikan efisiensi pemanfaatan bahan bakar terbaik pada spektrum termal. Sementara itu, pada MSFR spektrum cepat, transisi dari garam fluorida ke klorida secara signifikan memperkeras spektrum neutron, memangkas kebutuhan massa fisil awal hingga separuhnya, serta mengoptimalkan pembakaran bersih limbah aktinida minor pada konfigurasi RGr-Pu dan MOX-Pu. Jepara M3 memiliki nilai Kalium tertinggi yaitu 3,07% dan laju dosis tertinggi yaitu 0,24 µSv/jam. Pandeglang A10 nilai Kalium 2,00% dan laju dosis tinggi yaitu 0,22 µSv/jam. Pandeglang B19 nilai Kalium yaitu 1,00% dan laju dosis radiasi 0,16 µSv/jam.