

SENSITIVITAS PENGAYAAN URANIUM DAN FRAKSI *PACKING* (3Th,U)O₂ TERHADAP k_{∞} SEBAGAI DASAR DESAIN KONSEPTUAL RGTT200K

Sudarmono, Suwoto, Hery Adrial

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

aksel@batan.go.id

(Naskah diterima: 7 Desember 2012, disetujui: 23 Januari 2013)

ABSTRAK

SENSITIVITAS PENGAYAAN URANIUM DAN FRAKSI *PACKING* PARTIKEL TRISO DALAM BAHAN BAKAR *PEBBLE* TERHADAP k_{∞} SEBAGAI DASAR DESAIN KONSEPTUAL RGTT200K. Desain RGTT200K merupakan pengembangan desain konseptual reaktor kogenerasi dengan tingkat daya menengah yang berpendingin gas helium. Sensitivitas pengayaan uranium dan fraksi *packing* partikel *TRISO* berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar *pebble* terhadap faktor perlipatan tak hingga (k_{∞}) merupakan tahap awal yang harus dilakukan untuk pengembangan desain konseptual teras RGTT200K. Hal ini dilakukan dengan pemodelan *simple cubic* (SC), *face centered cubic* (FCC) dan *body centered cubic* (BCC) menggunakan perangkat lunak program *transport Monte Carlo MCNPX* pada berbagai pengayaan uranium dan fraksi *packing* partikel *TRISO* berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar *pebble* dengan input data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI. Hasil perhitungan nilai k_{∞} partikel *TRISO* dengan model kisi SC, FCC dan BCC memberikan nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai dengan pengkayaan di atas 8% dengan fraksi *packing* 5% hingga 15%. Model SC merupakan model yang relatif terbaik dari ketiga model kisi. Hasil perhitungan nilai k_{∞} bahan bakar *pebble* dengan model SC, FCC dan BCC memberikan hasil yang konsisten dengan partikel *TRISO*. Nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai dengan fraksi *packing* yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan model partikel *TRISO*.

Kata kunci: sensitivitas, pengayaan, fraksi *packing*, k_{∞} , *triso*, *pebble*, MCNPX.

ABSTRACT

SENSITIVITY OF (3Th,U)O₂ URANIUM ENRICHMENT AND PACKING FRACTION DUE TO k_{∞} AS BASED ON RGTT200K CONCEPTUAL DESIGN. RGTT200K design is a development of conceptual cogeneration reactor with medium power level that cooled by helium gas. Sensitivity of fuel element (3Th,U)O₂ uranium enrichment and packing fraction due to infinite multiplication factor (k_{∞}) is a beginning phase that must be done for RGTT200K conceptual design of reactor core. Those analysis was done by simple cubic (SC), face centered cubic (FCC) and body centered cubic (BCC) modeling by using Monte Carlo MCNPX software, on various uranium enriched and packing fraction of TRISO and pebble fuel element, with continue energy nuclear data input of ENDF/B-VI. The calculation results of TRISO under SC, FCC and BCC models show

that $k_{\infty} > 1$ reached up 8% enrichment with packing fraction from 5% to 15%. SC model that obtain lowest $k_{\infty} > 1$, is the best model comparing with the others. The k_{∞} calculation results of pebble fuel under SSC, FCC and BCC models show there is consistency between TRISO and Pebble fuel. Pebble fuel reached higher packing fraction of $k_{\infty} > 1$, comparing with TRISO.

Keywords: sensitivity, enrichment, packing fraction, k_{∞} , triso, pebble, MCNPX.

PENDAHULUAN

Desain konseptual teras RGTT200K adalah desain konseptual teras reaktor gas temperatur tinggi dengan daya 200 MW termal untuk kogenerasi. RGTT200K didesain sedemikian rupa agar dapat menghasilkan temperatur keluaran pendingin gas helium setinggi 950°C. Luaran temperatur pendingin gas helium yang sangat tinggi ini akan dapat digunakan untuk memasok energi termal kepada unit produksi hidrogen atau unit industri proses lainnya secara kogeneratif^[1].

RGTT200K didesain sebagai pemasok energi baru dan terbarukan, yaitu energi yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global seperti pada sumber-sumber energi tradisional lain. RGTT200K menggunakan partikel TRISO berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar pebble. Kernel tersebut merupakan komposisi gabungan nuklida (U²³⁵, U²³⁸, Th²³², O¹⁶, B¹⁰ dan B¹¹) berlapis TRISO (TRIStructural-ISotropic material), yang selanjutnya disebut dengan partikel TRISO. Desain konseptual teras merupakan tahap awal yang harus dilakukan untuk pengembangan desain teras RGTT200K yang lebih rinci. Bidang Pengembangan Reaktor di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) mempunyai tugas pokok melaksanakan Kegiatan litbang desain konseptual teras RGTT200K menggunakan bahan bakar berbasis UO₂, PuO₂, dan partikel TRISO berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar pebble^[2]. Pada riset sebelumnya telah dilakukan desain konseptual teras

RGTT200K berbahan bakar UO₂ dan PuO₂ melalui perhitungan nilai kritikalitas (Suwoto,Zuhair). Pada kegiatan ini akan diperoleh desain konseptual teras RGTT200K untuk partikel TRISO berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar pebble melalui perhitungan sensitivitas pengayaan uranium dan fraksi packing terhadap faktor perlipatan tak hingga (k_{∞}).

Berdasarkan peraturan IAEA yang hanya mengizinkan penggunaan uranium dengan tingkat pengayaan maksimum 20%^[3], maka dalam penelitian ini dilakukan perhitungan dan analisis menggunakan pengayaan U²³⁵ pada rentang 2% s/d 20%, meskipun pada umumnya penggunaan pengayaan uranium yang sering digunakan dalam HTGR adalah pada rentang 7%-17% (Tabel 1)^[4]. Fraksi packing masing-masing kisi di lakukan pada rentang 5% - 40%, hal ini untuk memperoleh faktor perlipatan tak hingga (k_{∞}) yang optimal karena adanya batasan perbandingan antara volume partikel TRISO dalam matrik grafit dan volume masing-masing kisi kubik dengan nilai maksimum 52,36%^[9].

Sensitivitas pengayaan uranium dan fraksi packing partikel TRISO terhadap k_{∞} dan bahan bakar pebble dilakukan dengan menggunakan program *transport Monte Carlo MCNPX*, yang dioperasikan dengan menggunakan input data nuklir energi kontinyu ENDF/B-VI^[10]. Sebanyak 5000 histori neutron persiklus dengan total 100 siklus aktif di gunakan untuk menghasilkan simpangan baku lebih kecil dari 0,004%. *Skipping* setiap 10 siklus di kerjakan untuk menghindari konvergensi sumber. Sensitivitas pengayaan uranium dan fraksi

packing partikel TRISO dan bahan bakar pebble terhadap k_{∞} diperoleh melalui: (i) pemodelan dalam kisi SC, (ii) pemodelan

dalam kisi BCC dan (iii) pemodelan dalam kisi FCC.

Tabel 1. Data hasil analisis spesifikasi dimensi data bahan bakar berlapis partikel TRISO yang di gunakan dalam perhitungan.

Parameter	RGTT200K ^[56,7,8] D_FCP =0,092 (3Th,U)O ₂	HTR-10 ^[7] D_FCP=0,091 UO ₂	FRG ^[8] D_FCP=0,09 UO ₂
Kernel			
Pengayaan ²³⁵ U (%)	10	17 +/- 0,1	9,6 -10
Densitas Kernel (g/cm ³)	10,4	10,4	10,4
Diameter Kernel (μm)	500	500	500
Densitas Buffer (g/cm ³)	1,05	1,05	1,05
Tebal buffer (μm)	95,0	90	90
Diameter luar buffer (μm)	690	680	680
Densitas IPyC (g/cm ³)	1,90	1,99	1,99
Tebal IPyC (μm)	40,0	40,0	40,0
Diameter luar IPyC (μm)	770	760	760
Densitas OPyC (g/cm ³)	1,90	1,90	1,90
Tebal OPyC (μm)	40,0	35,0	35,0
Diameter luar OPyC (μm)	920	910	900
IPyC/ OPyC BAFO	1,058	1,08	1,08
Kekuatan IPyC/ OPyC (MPa m)	23,6	27,8	27,8
Modulus Weibul β IPyC/ OPyC	9,5	9,5	9,5
Tebal SiC (μm)	36,0	25,0	25,0
Densitas SiC (g/cm ³)	3,18	3,18	3,18
Kekuatan SiC (MPa m)	9,64	9,64	9,64
Modulus Weibul β SiC	6,0	6,0	6,0

Kritikalitas

Pengertian kritikalitas adalah suatu keadaan pada bahan fisil (bahan dapat belah) di mana neutron yang dihasilkan dalam reaksi pembelahan berada dalam jumlah yang cukup untuk mempertahankan reaksi rantai secara terus menerus. Dalam teori reaktor, selain faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) ada juga faktor multiplikasi tak hingga (kekritisitas tak hingga, k_{∞}). Hal yang membedakan faktor multiplikasi tak hingga dibandingkan dengan faktor multiplikasi efektif, adalah pada faktor multiplikasi tak hingga (k_{∞}) tidak terjadi kebocoran neutron. Penghitungan k_{eff} mencakup perhitungan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan dalam suatu generasi untuk tiap-tiap sumber neutron fisi. Satu generasi adalah masa hidup neutron dari saat ia dilahirkan dari hasil fisi sampai hilang karena lolos dari sistem, tangkapan parasitik, atau absorpsi

yang akan menimbulkan fisi berikutnya^[11]. k_{eff} dihitung pada geometri dengan dimensi (ukuran) terbatas tertentu, sedangkan untuk k_{∞} dihitung untuk geometri (ukuran) yang tidak terbatas (berhingga). Dalam perhitungan faktor multiplikasi, nilai $k_{\infty} \gg k_{eff}$.

Di dalam program Monte Carlo (MCNPX), perhitungan "faktor multiplikasi" ditentukan dengan 3 estimator yaitu tumbukan (*collision*), serapan (*absorption*) dan panjang jejak (*track length*). Hasil akhir dari perhitungan "faktor multiplikasi" oleh program Monte Carlo (MCNPX) merupakan kombinasi dari ketiga estimator tersebut (seperti dijelaskan pada persamaan 1, 2, dan 3).

Untuk desain partikel TRISO berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar pebble RGTT200K, perhitungan k_{∞}

dilakukan untuk geometri yang tidak berhingga. Untuk perhitungan k_{∞} (partikel TRISO belum dimasukkan/didispersikan ke dalam bahan bakar *pebble*), sedangkan untuk perhitungan k_{∞} pada *pebble* (bahan bakar *pebble* belum dimasukkan ke dalam teras reaktor).

Program transport *Monte Carlo* menggunakan 3 estimator nilai faktor multiplikasi neutron (k), pada sistem yang dianggap tidak ada kebocoran neutron (dimensi tak hingga) yang disebut k_{∞} , yaitu:

1. Estimator tumbukan (k_{∞}^c) adalah jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses *fisi* dalam tumbukan, atau merupakan jumlah rata-rata neutron *fisi* yang dihasilkan tiap siklus melalui proses tumbukan. Estimator tumbukan ditulis dalam persamaan:

$$k_{\infty}^c = \frac{1}{N} \sum_i W_i \left[\frac{\sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{fk}}{\sum_k f_k \sigma_{Tk}} \right] \quad (1)$$

Untuk bahan non fisil

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_a + \sigma_s \\ \sigma_s &= \sigma_{s\text{-elas}} + \sigma_{s\text{-inelas}} \end{aligned}$$

Untuk bahan fisil

$$\begin{aligned} \sigma_{TK} &= \sigma_a + \sigma_s \\ \sigma_a &= \sigma_{capture} + \sigma_{fisi} \\ \sigma_{TK} &= \sigma_{capture} + \sigma_{fisi} + \sigma_s \end{aligned}$$

dengan :

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \text{tampang lintang mikroskopis serapan (absorbsi)} \\ \sigma_s &= \text{tampang lintang mikroskopis hamburan (scattering)} \\ \sigma_{s\text{-elas}} &= \text{tampang lintang mikroskopis hamburan elastis} \\ \sigma_{s\text{-inelas}} &= \text{tampang lintang mikroskopis hamburan tidak elastis} \\ \sigma_{capture} &= \text{tampang lintang mikroskopis tangkapan} \\ \sigma_{fisi} &= \text{tampang lintang mikroskopis fisi} \\ i &= \text{jumlah tumbukan dalam satu siklus} \\ k &= \text{jumlah nuklida} \\ \sigma_{Tk} &= \text{total tampang lintang mikroskopis} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{fk} &= \text{tampang lintang fisi mikroskopis} \\ \bar{v}_k &= \text{jumlah rata-rata neutron hasil fisi} \\ f_k &= \text{fraksi atom} \\ W_i &= \text{berat partikel} \end{aligned}$$

Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} yang terbaik untuk sistem yang sangat besar.

2. Estimator serapan (k_{eff}^A) adalah estimator yang dihitung setiap kali terjadi interaksi antar neutron dengan inti bahan dapat belah. Estimator serapan ditulis dalam bentuk persamaan:

$$k_{\infty}^A = \frac{1}{N} \sum W_i' \bar{v}_k \frac{\sigma_{fk}}{\sigma_{ck} + \sigma_{fk}} \quad (2)$$

dengan:

$$W_i' = W_i \frac{\sigma_{ck} + \sigma_{fk}}{\sigma_{fk}}$$

Estimator ini memberikan estimasi harga k_{eff} dengan kesalahan terkecil pada sistem reaktor termal.

3. Estimator panjang jejak (k_{eff}^{TL}) adalah estimator yang dihitung setiap kali neutron berpindah tempat di dalam bahan dapat belah pada suatu jarak tertentu. Estimator panjang jejak dapat ditulis dalam persamaan:

$$k_{\infty}^{TL} = \frac{1}{N} \sum W_i \rho d \sum f_k \bar{v}_k \sigma_{fk} \quad (3)$$

dengan:

$$\begin{aligned} i &: \text{jumlah lintasan neutron} \\ \rho &: \text{densitas atom} \\ d &: \text{panjang jejak lintasan} \end{aligned}$$

Perhitungan k_{∞} dengan Program *Monte Carlo MCNPX* dilakukan dengan merata-ratakan kombinasi dari ketiga estimator tersebut.

Korelasi-korelasi yang digunakan

Penentuan massa atom, densitas material dan densitas atom pada partikel

TRISO berbasis kernel (3Th,U)O₂ dalam bahan bakar *pebble* menggunakan korelasi-korelasi sebagai berikut [12]:

a. korelasi massa atom Uranium

$$M_U = \frac{1}{\frac{(1-Imp)Enrh}{M_{U235}} + \frac{(1-Imp)(1-Enrh)}{M_{U238}} + \frac{(Imp \times 19,9\%)}{M_{B10}} + \frac{Imp \times 80,1\%}{M_{B11}}} \quad (4)$$

b. korelasi masa M_{ThUO₂}

$$M_{ThUO_2} = \frac{3}{4}M_{Th} + \frac{1}{4}M_U + 2M_O \quad (5)$$

c. densitas material Uranium

$$\rho_U = \frac{\frac{1}{4}M_U}{M_{ThUO_2}} \times \rho_{ThUO_2} \quad (6)$$

d. densitas Thorium

$$\rho_{Th} = \frac{\frac{3}{4}M_{Th}}{M_{ThUO_2}} \times \rho_{ThUO_2} \quad (7)$$

e. densitas Oksigen

$$\rho_O = \frac{2M_O}{M_{ThUO_2}} \quad (8)$$

f. densitas atom U²³⁵

$$N_{U235} = \frac{(1-Imp) \times Enrch \times \rho_U \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_{U235}} \quad (9)$$

g. densitas atom U²³⁸

$$N_{U238} = \frac{(1-Imp) \times (1-Enrch) \times \rho_U \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_{U238}} \quad (10)$$

h. densitas atom Th²³²

$$N_{Th} = \frac{\rho_{Th} \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_{Th}} \quad (11)$$

i. densitas atom O¹⁶

$$N_O = \frac{\rho_O \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_O} \quad (12)$$

j. densitas atom B¹⁰

$$N_{B10} = \frac{Imp \times 19,9\% \times \rho_U \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_{B10}} \quad (13)$$

k. densitas atom B¹¹

$$N_{B11} = \frac{Imp \times 80,1\% \times \rho_U \times N_{AV} \times 10^{-24}}{M_{B11}} \quad (14)$$

dengan:

M_U = massa atom uranium

M_{U²³⁵} = massa atom uranium - 235

M_{U²³⁸} = massa atom uranium- 238

M_{B¹⁰} = massa boron – 10

M_{B¹¹} = massa boron – 11

M_{Th} = massa thorium

M_O = massa oksigen

M_{ThUO₂} = massa Th UO₂

N_{U²³⁵} = massa U235

N_{U²³⁸} = massa U238

N_{Th} = massa thorium

N_O = jumlah atom oksigen

N_{B¹⁰} = jumlah atom boron-10

$N_{B^{11}}$ = jumlah atom boron-11
 ρ_{ThUO_2} = densitas-ThUO₂
 ρ_{Th} = densitas-thorium
 ρ_o = densitas oksigen

Imp = impuritas
 Enrh = pengkayaan
 $N_{AV} \times 10^{-24}$ = bilangan avogadro

Fraksi *packing* partikel *TRISO* dalam bahan bakar *pebble*

Fraksi *packing* partikel *TRISO* dalam bahan bakar *pebble* merupakan salah satu parameter kunci yang esensial dan harus dipertimbangkan dalam desain reaktor gas temperatur tinggi. Partikel *TRISO* mengisi volume bola yang berkorespondensi pada zona bahan bakar *pebble*. Jumlah inventori bahan bakar proporsional dengan fraksi *packing* bahan bakar kernel berlapis partikel *TRISO* yang didefinisikan sebagai rasio volume partikel *TRISO* total dengan volume kisi kubik dimana partikel *TRISO* terkandung didalamnya. Pemilihan jumlah Partikel *TRISO* dalam gram yang digambarkan oleh fraksi *packing* menjadi penting untuk mendapatkan faktor multiplikasi infinit yang spesifik.

Jumlah partikel *TRISO* dalam setiap bahan bakar *pebble* dapat diderivasi dari fraksi *packing* partikel *TRISO* yang dipilih. Fraksi *packing* partikel *TRISO* sendiri didefinisikan sebagai rasio volume partikel *TRISO* (V_{TRISO}) dalam matriks grafit dan volume kisi kubik (V_{KISI}) dimana partikel *TRISO* terkandung di dalamnya. Fraksi *packing* partikel *TRISO* (f) dinyatakan dalam persamaan,

$$f = \frac{\sqrt{V_{TRISO}}}{\sqrt{V_{KISI}}} \quad (15)$$

Jumlah partikel *TRISO* dalam kisi ditentukan dari jenis kisi regular yang diinginkan. Dalam studi ini, empat tipe kisi regular^[13,14,15] untuk distribusi partikel *TRISO* dalam 3-D, kisi SC, BCC, dan FCC.

Ukuran jarak kisi partikel partikel *TRISO* dalam matrik grafit dihitung dari fraksi *packing* (f) yang dispesifikasikan mengikuti persamaan,

$$\rho = rx\sqrt{\frac{16\pi}{3f}} \quad (16)$$

Sedangkan jumlah partikel *TRISO* (N) perbahan bakar *pebble* di tentukan dari rasio radius zona bahan bakar *pebble* (R) dengan radius partikel *TRISO* (r) menurut persamaan,

$$N = f \times \left(\frac{R}{r}\right)^3 \quad (17)$$

Massa partikel *TRISO* per bahan bakar *pebble* (M) diperoleh dari densitas partikel *TRISO* dikalikan volume partikel *TRISO*, yaitu $\frac{4}{3}\pi \times r_o^3$ dimana r_o radius partikel *TRISO* dan jumlah partikel *TRISO* (N).

$$M = \frac{4}{3}xr_o^3 \times \rho \times N \quad (18)$$

Dalam perhitungan ini partikel *TRISO*, bahan bakar *pebble* hingga struktur grafit dimodelkan dengan program *transport Monte Carlo MCNPX*. Proses iteratif yang seksama dari kegiatan pemodelan tersebut akan dapat menghasilkan tipe kisi regular yang dapat di adopsi dalam perhitungan ini karena memiliki jelajah fraksi *packing* yang cukup luas. Selanjutnya secara teknis dapat dipertimbangkan kemungkinan digunakannya partikel *TRISO* dengan jumlah besar dalam bahan bakar *pebble*.

METODOLOGI

Sensitivitas pengayaan uranium dan fraksi *packing* partikel *TRISO* terhadap k_{∞} dilakukan dengan:

Perhitungan kerapatan unsur

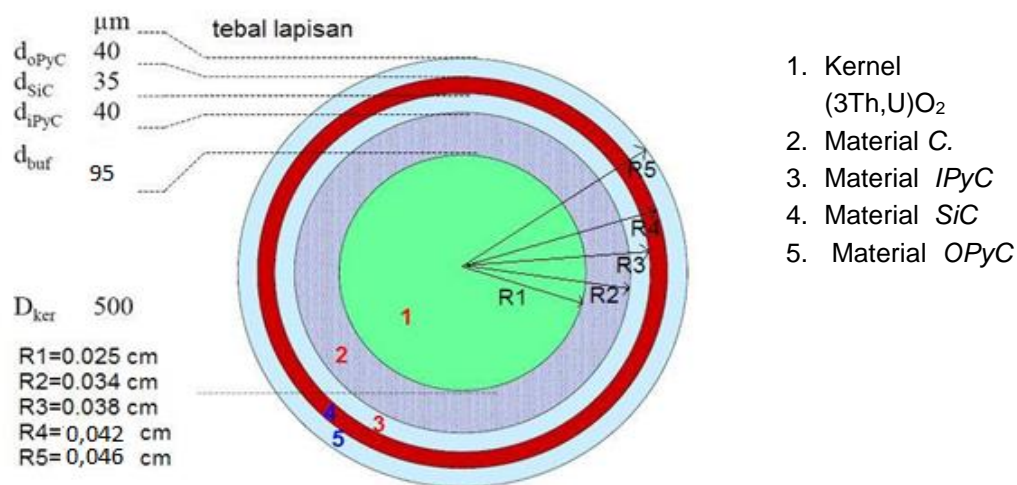
Perhitungan kerapatan unsur $N(3Th,U)O_2$, $N_{U^{235}}$, $N_{U^{238}}$, $N_{Th^{232}}$, dan $N_{O^{16}}$ dilakukan pada

masing-masing pengkayaan 2%, 4%, 6%, 8%, 1%, 12%, 14%, 16%, 18%, dan 20%.

Pemodelan partikel TRISO

Pemodelan partikel TRISO menggunakan bahan bakar kernel $(3\text{Th,U})\text{O}_2$ berdiameter 500 μm memiliki komposisi gabungan nuklida (U^{235} , U^{238} , Th^{232} , O^{16} , B^{10} , B^{11}). Partikel TRISO menggunakan pelapisan *coating* yang memiliki ketebalan 95 μm untuk penyangga karbon (*carbon buffer, C*), 40 μm untuk karbon pirolitik bagian dalam (*inner pyrolytic carbon, IPyC*), dan luar (*outer pyrolytic*

carbon, OPyC), serta 35 μm untuk lapisan silikon karbida (SiC). Setiap lapisan partikel TRISO memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, salah satu diantaranya adalah mencegah kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Skema geometri dan spesifikasi parameter partikel TRISO, ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 2.



Gambar 1. Geometri bahan bakar TRISO^[11,15]

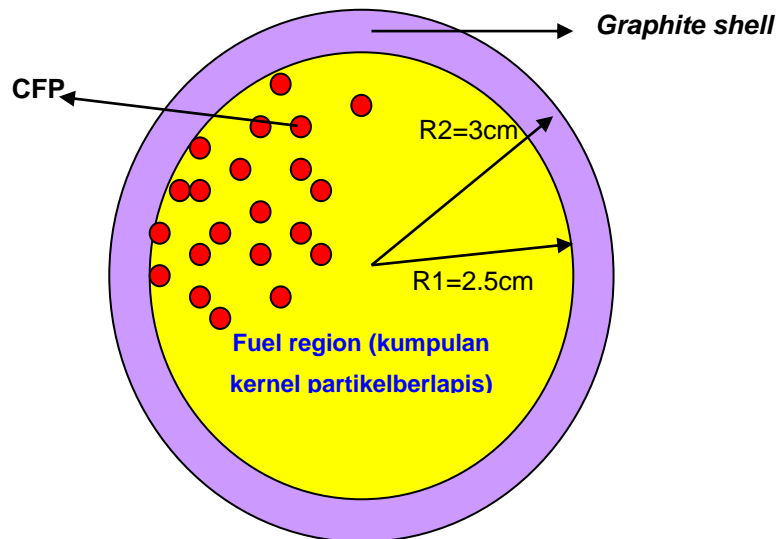
Tabel 2. Spesifikasi parameter partikel TRISO

Parameter	Nilai
Ketebalan lapisan material C, (cm)	0,0095
Ketebalan lapisan material IPyC, (cm)	0,0040
Ketebalan lapisan material SiC, (cm)	0,0035
Ketebalan lapisan material OPyC, (cm)	0,0040
Densitas lapisan <i>carbon buffer</i> , (g/cm^3)	1,0500
Densitas lapisan IPyC, (g/cm^3)	1,9000
Densitas lapisan SiC, (g/cm^3)	3,1800
Densitas lapisan <i>outer pyrolytic carbon OPyC</i> , (g/cm^3)	1,9000
Material kernel	$(3\text{Th,U})\text{O}_2$
Radius bahan bakar kernel, (cm)	0,0250
<i>Impurity</i> boron alam dalam kernel, (ppm)	0,5000
Densitas bahan bakar kernel, (g/cm^3)	9,6400

Pemodelan bahan bakar *pebble*

Partikel berlapis tersebar dalam matrik grafit dan terdistribusi secara acak dalam sel bahan bakar *pebble*. Setiap bahan bakar *pebble* mengandung ratusan ribu partikel *TRISO* dengan diameter 0,092 cm yang terdispersi dalam matriks grafit

berdiameter 5 cm untuk membentuk zona bahan bakar dan *shell* grafit dengan ketebalan 0,5 cm. Skema geometri dan spesifikasi parameter bahan bakar *pebble*, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 3.



Gambar 2. Geometri bahan bakar *pebble*^[6,8].

Tabel 3. Material dan parameter bahan bakar *pebble*

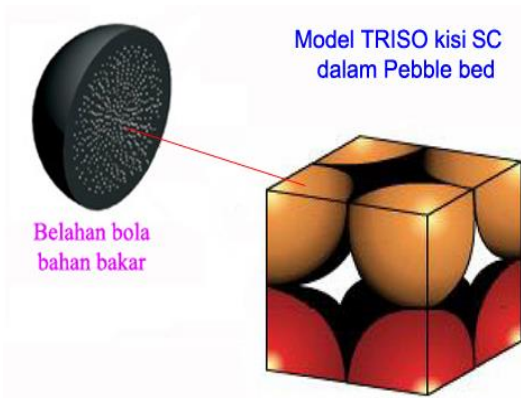
Parameter	Nilai
Diameter bahan bakar bola, (cm)	6,00
Diameter zona berbahan bakar, (cm)	5,00
Ketebalan <i>shell</i> grafit, (cm)	0,50
Densitas <i>shell</i> grafit, (cm)	1,75
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit, (ppm)	0,50
Fraksi <i>filling</i> volumetrik <i>pebble</i> di teras	61%
Pengotor Boron-10 dalam bahan bakar & Carbon/Grafit	20%

Perhitungan volume partikel *TRISO* dan bahan bakar *pebble*.

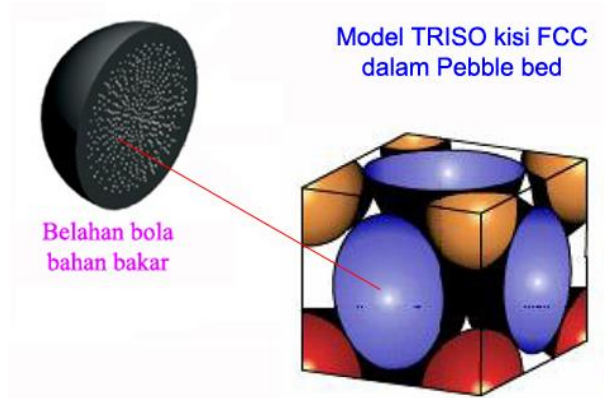
Volume partikel *TRISO* dalam *pebble* serta rusuk kubus pada fraksi *packing* 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% dan 40 %, dihitung untuk masing-masing kisi SC, BCC dan FCC.

Pemodelan bahan bakar

Pemodelan seluruh partikel *TRISO* dalam bahan bakar *pebble* serta struktur grafit secara radial dan eksplisit dengan memanfaatkan program *transport Monte Carlo MCNPX*. Pemodelan dilakukan dalam kisi-kisi: (i) SC, (ii) BCC dan (iii) FCC. Pemodelan masing-masing kisi ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5.



Gambar 3. Hasil pemodelan bentuk kisi SC^[13]



Gambar 5. Hasil pemodelan bentuk kisi FCC^[15].



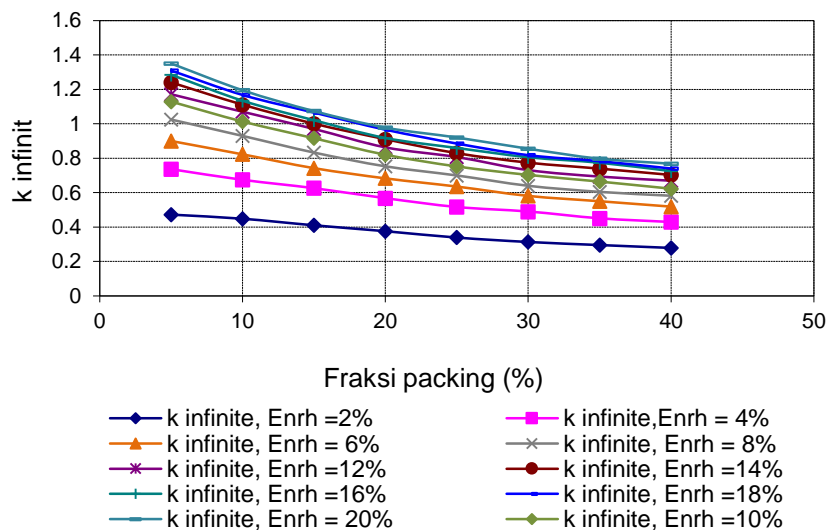
Gambar 4. Hasil pemodelan bentuk kisi BCC^[14]

Perhitungan faktor perlipatan tak hingga (k_{∞})^[11]

Perhitungan k_{∞} partikel *TRISO* dalam bahan bakar *pebble* ke dalam masing-masing kisi *SC, BCC* dan *FCC* sebagai fungsi pengayaan pada rentang 2%-20% dan fraksi *packing* 5%-40%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

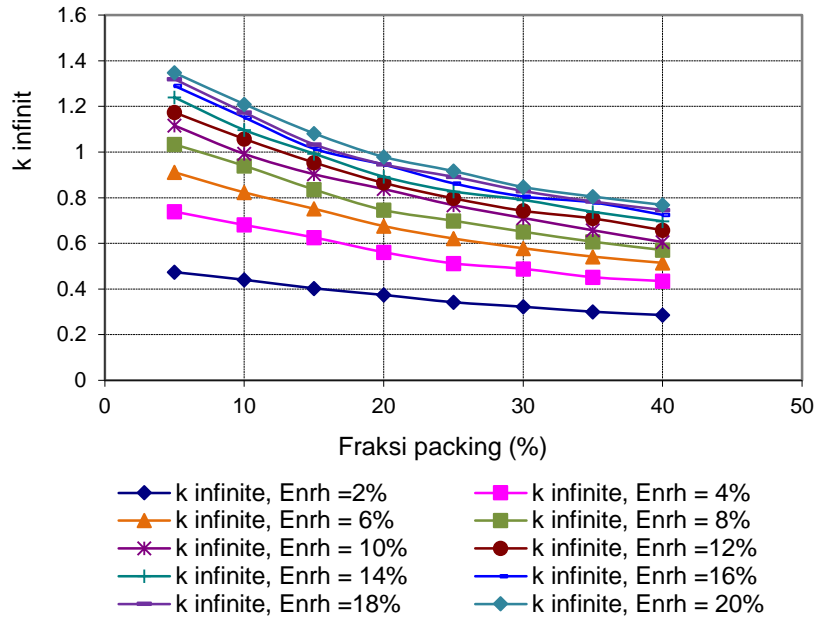
Hasil perhitungan k_{∞} partikel *TRISO* dengan pemodelan *SC, FCC* dan *BCC* ditunjukkan pada Gambar 6, 7 dan 8.



Gambar 6. Hasil perhitungan k_{∞} model SC partikel *TRISO*.

Pada hasil perhitungan k_{∞} partikel *TRISO* ke dalam kisi *SC* terlihat bahwa nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai mulai pengayaan 8% hingga 20%, nilai ini meningkat secara konsisten.

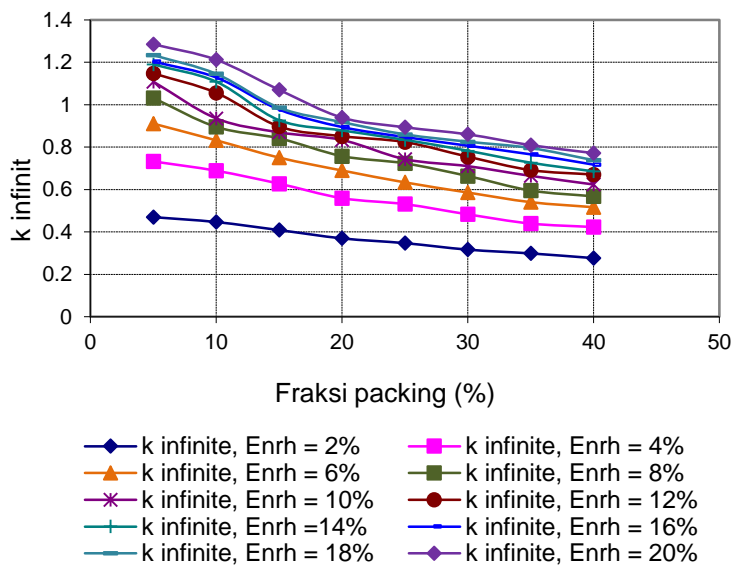
Nilai k_{∞} menurun dengan bertambahnya fraksi *packing* mulai dari 5 hingga 15%, lebih dari itu maka nilai $k_{\infty} > 1$ tidak tercapai.



Gambar 7. Hasil perhitungan k_{∞} model *FCC* partikel *TRISO*

Pada hasil perhitungan k_{∞} partikel *TRISO* ke dalam kisi *FCC*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai mulai pengayaan 8% meningkat secara linier hingga pengayaan 20%, dan

menurun secara linier pula sebagai fungsi penambahan fraksi *packing* partikel *TRISO*, batas tercapainya $k_{\infty} > 1$ pada model ini adalah fraksi *packing* 15%, lebih dari itu nilai $k_{\infty} > 1$ tidak tercapai.

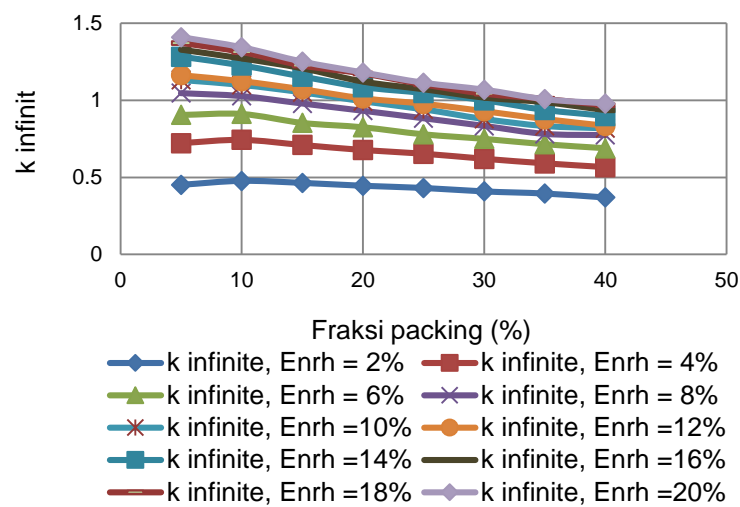


Gambar 8. Hasil perhitungan k_{∞} model *BCC* partikel *TRISO*

Pada hasil perhitungan k_∞ partikel TRISO ke dalam kisi BCC, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, terlihat bahwa nilai k_∞ >1 meningkat sebagai fungsi pengayaan mulai 5% hingga 16%, untuk pengayaan 20% terjadi inkonsistensi dimana nilai ini justru menurun meskipun masih memenuhi k_∞ >1. Pada model ini, nilai k_∞ >1 menurun sebagai fungsi fraksi packing, nilai k_∞ >1 baru tercapai mulai pengayaan 8%. Komparasi hasil perhitungan k_∞ partikel

TRISO, baik ke dalam kisi SC, FCC dan BCC, seperti pada ketiga gambar di atas menunjukkan bahwa dengan menggunakan kisi SC memberikan hasil k_∞ >1 yang lebih konsisten dibandingkan dengan kisi FCC dan BCC.

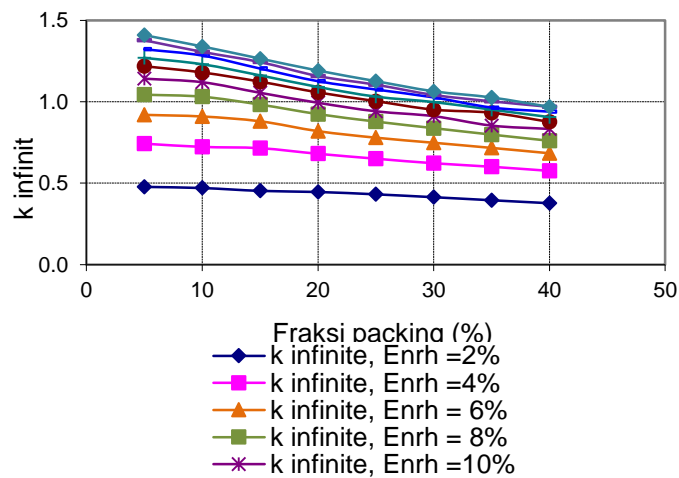
Hasil perhitungan k_∞ bahan bakar pebble dengan pemodelan SC, FCC dan BCC ditunjukkan pada Gambar 9, 10 dan 11.



Gambar 9. Hasil perhitungan k_∞ model SC bahan bakar pebble.

Hasil perhitungan k_∞ bahan bakar pebble kedalam kisi SC, ditampilkan pada Gambar 9, terlihat bahwa nilai k_∞ >1 tercapai mulai pengayaan 8% hingga 20% dengan fraksi packing 5% dan nilai tersebut

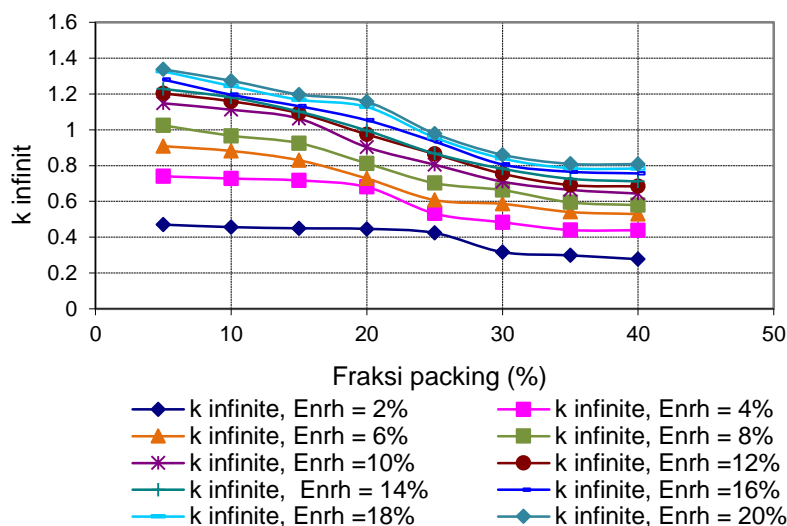
meningkat secara linier. Nilai ini menurun sebagai fungsi bertambahnya fraksi packing, tampak bahwa nilai k_∞ >1 masih tercapai pada kombinasi pengayaan 20% dan fraksi packing 35%.



Gambar 10. Hasil perhitungan k_∞ model FCC bahan bakar pebble.

Hasil perhitungan k_{∞} bahan bakar *pebble* sebagai fungsi fraksi *packing* kedalam kisi, *FCC*, ditunjukkan pada Gambar 10. Pada gambar tersebut terlihat bahwa nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai mulai pengayaan

8% dan fraksi *packing* 5%, dan menurun secara linier sebagai fungsi pertambahan prosentasi fraksi *packing*. Nilai $k_{\infty} > 1$ minimum masih tercapai pada kombinasi fraksi *packing* 35% dengan pengayaan 20%.



Gambar 11. Hasil perhitungan k_{∞} model *BCC* bahan bakar *pebble*

Hasil perhitungan k_{∞} bahan bakar *pebble* sebagai fungsi fraksi *packing* kedalam kisi *BCC*, ditunjukkan pada Gambar 11. Nilai $k_{\infty} > 1$ mulai tercapai pada pengayaan 8% hingga 16% dengan fraksi *packing* 5%, nilai ini meningkat secara linier. Nilai tersebut masih tercapai pada kombinasi pengayaan 20% dan fraksi *packing* 5% akan tetapi peningkatan tidak konsisten. Nilai $k_{\infty} > 1$ menurun sebagai fungsi bertambahnya prosentase fraksi *packing*. Nilai fraksi *packing* minimum tercapai pada kombinasi pengayaan 20% dengan fraksi *packing* 20%, dimana penurunan nilai $k_{\infty} > 1$ juga tampak tidak konsisten.

Hasil perhitungan nilai k_{∞} *pebble* baik dengan model *SC*, *BCC* maupun *FCC*, memiliki komposisi grafit yang lebih banyak yang terdapat pada lapisan-lapisan bahan bakar partikel *TRISO* juga pada grafit matrik dan *shell outer* pelapis yang membungkus bahan bakar *pebble* sehingga membentuk bola besar berdiameter 6 cm.

Untuk k_{∞} pada partikel *TRISO* (baik *SC*, *BCC* maupun *FCC*) memiliki komposisi grafit

yang lebih sedikit (grafit terdapat pada lapisan penyangga karbon berpori dan lapisan piro karbon bagian dalam dan bagian luar) sehingga menghasilkan k_{∞} kernel yang relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan k_{∞} bahan bakar *pebble*.

Nilai k_{∞} pada bahan bakar *pebble* (baik *SC*, *BCC* maupun *FCC*) memiliki komposisi grafit yang lebih banyak. Disamping pada lapisan-lapisan bahan bakar partikel *TRISO*, juga pada grafit matrik dan *shell outer* pelapis yang membungkus bahan bakar *pebble* sehingga membentuk bola bahan bakar menjadi diameter 6 cm. Sebagai dampaknya maka nilai $k_{\infty} > 1$ tercapai dengan fraksi *packing* yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan model bahan bakar partikel *TRISO*.

Hasil faktor perlipatan tak hingga (k_{∞}) model kisi *SC* lebih besar jika dibandingkan dengan hasil yang diperoleh terhadap model kisi *FCC* dan *BCC*, yaitu 1,3513 dan 1,4104 pada pengayaan 20% dan fraksi *packing* 5%. Sensitivitas

pengayaan uranium dan fraksi *packing* terhadap faktor perlipatan tak hingga k_∞ partikel *TRISO* dan bahan bakar *pebble* memperlihatkan kecenderungan yang serupa. Semakin tinggi pengayaan U^{235} , semakin besar pula nilai faktor perlipatan tak hingga (k_∞) sebagai fungsi pengayaan U^{235} dan perbandingan antara *fraksi packing* partikel *TRISO* dan bahan bakar *pebble* untuk kisi *SC*, *BCC* dan *FCC*. Hal ini disebabkan kandungan U^{235} yang semakin besar menghasilkan proses fisi berantai semakin banyak yang mengakibatkan k_∞ semakin meningkat. Hasil perhitungan memperlihatkan pula bahwa semakin besar nilai perbandingan antara volume partikel *TRISO*/bahan bakar *pebble* dan volume total kisi, diperoleh nilai k_∞ yang semakin rendah. Fraksi *packing* partikel *TRISO* yang semakin besar menyebabkan keberadaan grafit semakin sedikit. Seperti diketahui grafit mempunyai sifat moderasi neutron yang sangat baik, di samping itu karena jumlah karbon di dalam partikel *TRISO* semakin sedikit, maka neutron yang termoderasi akan semakin sedikit, yang mengakibatkan k_∞ menjadi turun. Hasil yang diperoleh menunjukkan pula bahwa kenaikan k_∞ tidak signifikan untuk pengayaan U^{235} dari 10% menjadi 20%. Hal ini disebabkan kemampuan moderasi neutron oleh grafit mengalami kejenuhan.

SIMPULAN.

Hasil perhitungan nilai k_∞ partikel *TRISO* dengan model kisi *SC*, *FCC* dan *BCC* memberikan nilai $k_\infty > 1$ tercapai dengan pengayaan di atas 8% dengan fraksi *packing* 5% hingga 15%. Model *SC* merupakan model yang terbaik dari ketiga model kisi dengan pencapaian nilai $k_\infty > 1$ paling rendah.

Hasil perhitungan nilai k_∞ bahan bakar *pebble* dengan model *SC*, *FCC* dan *BCC* memberikan hasil $k_\infty > 1$ yang konsisten di dibandingkan dengan k_∞ bahan bakar partikel *TRISO*, yaitu untuk fraksi *packing* 5% adalah pada pengayaan di atas 8%.

Pembatasan nilai pengayaan hingga 20% diambil dengan memperhatikan batasan penggunaan bahan bakar LEU (*low enrichment uranium*) sesuai peraturan IAEA, sehingga untuk simulasi sensitivitas pengayaan uranium sampai 20% masih diperbolehkan.

Fraksi *packing* 5% dan pengkayaan 20% dengan pemodelan *SC* dapat digunakan dalam perhitungan desain konseptual teras RGTT200K. Dalam penelitian desain kernel partikel berlapis *TRISO* dalam *pebble* selanjutnya, disarankan perlu untuk mempertimbangkan efek heterogenitas ganda yang terjadi pada bahan bakar agar pemodelan yang dilakukan dapat mendekati nilai yang sebenarnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kami sampaikan kepada Ristek, selaku pemberi dana PI-PKPP 2012. DR. Hendro Tjahjono, DR. Sigit Santosa dan Ir. Tagor Malem Sembiring selaku KPTF dan Kepala Bidang BPR-PTRKN yang telah bersedia untuk mengoreksi dan berdiskusi serta memperkaya makalah ini. Rekan-rekan peneliti Ir. Zuhair.M.Sc dan Drs. Piping Supriatna serta Almarhum Bapak Drs. Maman Mulyaman. M.Sc yang telah membantu dalam penyelesaian penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. WWW.Ristekgo.id/file/upload/referensi/2010/ARN.pdf.
2. Rencana Strategik PTRKN Tahun 2010-2014. (2010). No. Ident: RKN.0.0.0T.01.01.10. Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN.
3. Sun, Y., XU. (2001). *Relevant Safety Issues in Designing the HTR-10*

-
- Reactor Technology*. IAEA-TECDOC-1198. Vienna.
4. IAEA-TECDO-1382. (1996). *High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development*. Proceedings of a Technical Committee Meeting. Johannesburg-South Africa. Purwadi M.D. (2006). Desain konseptual sistem reaktor daya maju kogenerasi berbasis RGTT. Proseding Seminar TKPFN-16, ITS-Surabaya.
 5. Purwadi M.D. (2010). Desain konseptual sistem reaktor daya maju kogenerasi berbasis RGTT. Proseding Seminar TKPFN-16, ITS-Surabaya.
 6. Anonim. (2000). *Reactor Safety Analysis Report of the South-African Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR)*. Rev. E, PBMR Ltd., Centurion, South-Africa.
 7. S. Sen, U.E. Sikik, H. Duikmen, Y. Cecen, O.K. Kadiroglu, U. Colak. (2001). *HTR-10 Core Physics Benchmark Problem Results*. Hacettepe University, Nuclear Engineering Department, Ankara, Turkey.
 8. H. Reutler and G.H. Lohnert. (1982). *Der Modulare HTR – Ein neues Konzept fuer den Kugelhaufenreaktor*. Atomwirtschaft, p. 18-21, Januari.
 9. Mark R. De Guire. (2001). *Principle of Atomic Packing*. Introduction to Materials Science & Engineering, ESME.
 10. M.B. Chadwicks, P.Oblozinsky, et al. (2006). *ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology*”, Nuclear Data Sheets, Vol.107, pp.2931-3060.
 11. J.S.Hendricks, G.W. Mckinney, et al. (2008, April). *MCNPX 2.6.0 Extensions*. LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory.
 12. F.B. Brown, et al. (2003). *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5*. LA-UR-03-1987
 13. Gelder J.I. (1994). *Simple Cubic Structure*. Oklahoma State University. <http://www.okstate.edu/jgelder/sc.gif>.
 14. Gelder J.I. (1994). *Body-Centered Cubic Unit Cell*. Oklahoma State University.<http://www.okstate.edu/jgelder/bcc.gif>.
 15. Gelder J.I. (1994). *Face-Centered Cubic Structure*. Oklahoma State University.<http://www.okstate.edu/jgelde r/fcc.gif>.