

# Studi Efek Geometri Terhadap Performa Bahan Bakar *Pebble Bed Reactor*

Ginancar<sup>1,a)</sup>, M. Nurul Subkhi<sup>2,b)</sup>, Dwi Irwanto<sup>3,c)</sup> dan Topan Setiadipura<sup>3,d)</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratorium Fisika Nuklir dan Energi,  
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir Reaktor,  
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung,  
Jl. AH Nasution no. 105 Bandung, Indonesia, 40614

<sup>3</sup>Laboratorium Fisika Nuklir,  
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>3</sup>Laboratorium Komputasi,  
Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir,  
Badan Tenaga Nuklir Nasional,  
Kawasan Puspiptek, Gedung 80, Tangerang Selatan, Indonesia, 15310

<sup>a)</sup> anjar@student.uinsgd.ac.id

<sup>b)</sup> nsubkhi@gmail.com

<sup>c)</sup> dirwanto@fi.itb.ac.id

<sup>d)</sup> tsdipura@batan.go.id

## Abstrak

*Reaktor nuklir tipe Pebble Bed Reactor (PBR) merupakan salah satu pilihan menarik untuk memenuhi keperluan listrik dan panas yang semakin berkembang. Rilis radioaktif dari PBR ke lingkungan dijamin sangat kecil dalam kondisi apapun, bahkan seandainya terjadi kecelakaan terparah sekalipun. Salah satu faktor penting yang menjamin hal tersebut adalah performa bahan bakar TRISO yang digunakan pada PBR. Studi ini hendak melakukan analisis terhadap efek geometri partikel TRISO terhadap performa bahan bakar PBR. Studi ini menggunakan software TIMCOAT yang mampu memodelkan kondisi teras PBR dan melakukan analisis performa bahan bakar TRISO dimana performa bahan bakar diwakili oleh parameter probabilitas kegagalan partikel TRISO. Berdasarkan hasil yang diperoleh probabilitas kegagalan paling rendah dari masing-masing lapisan adalah 300  $\mu\text{m}$  pada diameter kernel, 70  $\mu\text{m}$  lapisan buffer, 35  $\mu\text{m}$  lapisan IPyC, 36  $\mu\text{m}$  lapisan SiC dan 37  $\mu\text{m}$  pada lapisan OPyC. Hasil ini menunjukkan bahwa bahan bakar PBR memiliki performa yang tetap baik meskipun terjadi perubahan geometri..*

*Kata-kata kunci: Pebble Bed Reactor, TIMCOAT dan TRISO*

## PENDAHULUAN

PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) yang saat ini sedang dikembangkan di dunia adalah HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactor*). HTGR merupakan reaktor dengan temperatur keluaran lebih tinggi dari pada teknologi reaktor air ringan. HTGR didukung dengan teknologi keselamatan pasif sehingga dalam kondisi terparah sekalipun teras tidak akan meleleh dan dapat dibangun pada daerah padat. HTGR memiliki potensi kogenerasi di Indonesia karena Indonesia merupakan negara kepulauan dan berpotensi dalam kontribusi optimalisasi sumber daya alam di Indonesia. Konsep bahan bakar PBR yang dikembangkan adalah

dalam bentuk bola-bola kecil (kernel), dapat berupa kernel uranium/thorium oksida atau campurannya dan uranium karbida, yang dilapisi dengan lapisan pirokarbon dan silikon karbida yang disebut sebagai bahan bakar partikel (*coated particle*), lapisan tersebut diantaranya adalah lapisan penyangga karbon berpori (C) densitas rendah yang paling dekat dengan kernel bahan bakar, lapisan karbon pirolitik bagian dalam (IPyC) densitas tinggi serta lapisan silikon karbida (SiC) dan karbon pirolitik bagian luar (OPyC) [1,2].

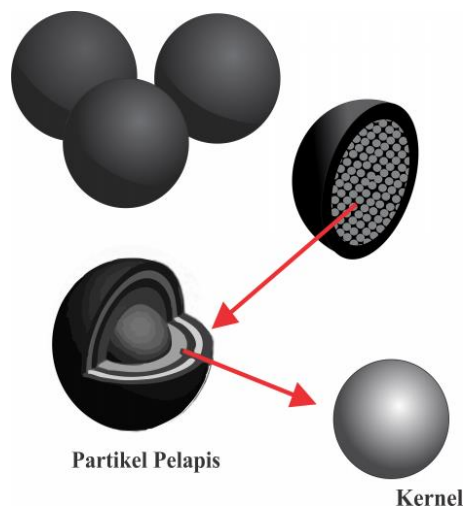
Berdasarkan desain bahan bakar PBR diatas tampak bahwa keselamatan dan kinerja operasi reaktor sangat ditentukan oleh integritas mekanik partikel bahan bakarnya. Untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja operasi reaktor, usaha dasar yang perlu dilakukan adalah mereduksi sekecil mungkin kegagalan bahan bakarnya dan mencegah penambahan kegagalan lapisan pelindung selama iradiasi. Kegagalan lapisan pelindung yang umum terjadi selama iradiasi adalah tipe kegagalan bejana tekan. Kegagalan ini disebabkan oleh tegangan yang timbul pada lapisan pelindung akibat tekanan gas internal dan penyusutan lapisan pelindungnya akibat paparan neutron cepat. Penyebab lain kegagalan adalah, khusus untuk iradiasi pada temperatur tinggi (>1600 °C), efek migrasi kernel (*amoeba effect*) dan korosi lapisan SiC oleh nuklida hasil belah seperti paladium [3,4].

Untuk mengatasi persoalan tersebut, Jing Wang telah melakukan penelitian dengan membuat software TIMCOAT pada tahun 2004 dibawah bimbingan Prof. Ronald Ballinger untuk menyelesaikan disertasinya. Dengan memanfaatkan eksperimental komputasi TIMCOAT, maka dilakukan pengembangan terkait performa bahan bakar TRISO untuk mengetahui probabilitas kegagalan bahan bakar PBR. Selain itu, tujuan dilaksanakannya penelitian ini adalah mempelajari performa bahan bakar PBR pada pengaruh geometri lapisan TRISO terhadap performa bahan bakar dengan menggunakan paket program TIMCOAT. Model dan hasil analisis yang disajikan dalam makalah ini diharapkan bermanfaat dalam pengembangan bahan bakar PBR di Indonesia untuk masa mendatang.

## PARTIKEL PELAPIS BAHAN BAKAR

### Bahan Bakar TRISO

HTGR didesain dengan menggunakan bahan bakar keramik yang di suport oleh *inherent safety* dari HTGR. Bahan bakarnya berbentuk TRISO (*tristructural-isotopic*). TRISO terdiri dari kernel bahan bakar terbentuk dari UOX (Uranium Oxide) di tengah-tengahnya [3].



Gambar 1. Bahan bakar TRISO

Pada umumnya, reaktor yang menggunakan partikel bahan bakar jenis TRISO yang terdiri dari 4 lapisan, mulai dari lapisan yang paling dalam yaitu *pyrolytic carbon* densitas rendah (buffer), *pyrolytic carbon* densitas tinggi pada lapisan kedua (IPyC), *silicon carbide* (SiC) dan *pyrolytic carbon* densitas tinggi lapisan terluar (OPyC). Dari keempat lapisan tersebut, SiC dipandang memiliki peranan yang sangat penting untuk mempertahankan integritas mekanik bahan bakar dan menahan hasil belah yang bersifat logam.

### Mekanisme Kegagalan Partikel Pelapis

Apabila efek amuba dan penipisan lapisan SiC akibat korosi oleh nuklida hasil belah paladium diabaikan maka penyebab utama kegagalan lapisan pelindung selama iradiasi adalah tegangan yang timbul di masing-

masing lapisan pelindung akibat tekanan gas internal dan penyusutan lapisan PyC. Berdasarkan asumsi tersebut, untuk mengevaluasi performa lapisan pelindung perlu dihitung terlebih dulu besar tegangan maksimum dan probabilitas kegagalan masing-masing lapisan pelindung. lapisan pelindung dimodelkan sebagai bejana tekan bentuk bola berdinding tebal (*thick-walled spherical pressure vessel*) maka besar tegangan tarik maksimum yang timbul di masing-masing lapisan pelindung akibat tekanan gas internal adalah

$$\sigma_{1,i} = \frac{t_i^3 + 3r_i t_i^2 + 3r_i^2 t_i + 3r_i^3}{2t_i(t_i^2 + 3r_i t_i + 3r_i^2)} \cdot P \quad (1)$$

Dimana  $\sigma_{1,i}$  tegangan tarik maksimum yang timbul di lapisan pelindung ke-i (MPa),  $t_i$  adalah tebal lapisan ke-i,  $r_i$  adalah jari-jari dalam lapisan ke-i, dan  $P$  adalah tekanan gas internal (MPa).

Untuk partikel yang berisi kernel bahan bakar UO<sub>2</sub> maka gas internal yang dipertimbangkan dalam perhitungan meliputi gas hasil belah (Xe dan Kr) yang terlepas dari kernel bahan bakar dan gas CO<sub>2</sub> yang terbentuk dari hasil reaksi antara lapisan *buffer* PyC dengan oksigen berlebih (akibat reaksi pembelahan UO<sub>2</sub>) yang terlepas dari kernel bahan bakar. Jika diasumsikan bahwa gas-gas tersebut berkelakuan seperti gas ideal maka besar tekanan gas internal  $P$  (MPa) dapat ditentukan, yaitu :

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (2)$$

$$n = n_{fp} + n_{CO}$$

$n$  adalah total gas (gr-mol),  $R$  adalah konstanta gas ideal (8,317 MPa cm<sup>3</sup>/gr-mol K),  $T$  adalah temperatur (K),  $V$  adalah volume ruang kosong yang terdapat di dalam lapisan *buffer* PyC pada saat  $t$  (cm<sup>3</sup>),  $n_{fp}$  dan  $n_{CO}$  adalah jumlah gas hasil belah yang terlepas dari kernel bahan bakar dan gas CO yang terbentuk (gr-mol).

Jumlah gr-mol gas hasil belah yang terlepas dari kernel bahan bakar,  $n_{fp}$  dihitung dengan persamaan berikut (diasumsikan bahwa *yield* gas hasil belah yang terbentuk dari setiap reaksi pembelahan adalah 31%)

$$n_{fp} = \frac{0,31 \times F \times FR}{N_A} \quad (3)$$

$F$  adalah jumlah reaksi pembelahan,  $FR$  adalah fraksi gas hasil belah yang terlepas dari kernel bahan bakar dan  $N_A$  adalah bilangan avogadro (6,02217x10<sup>23</sup> mol/gr-mol).

Volume ruang kosong yang terdapat di dalam lapisan *buffer* PyC sebagai fungsi waktu,  $V$  (cm<sup>3</sup>) ditentukan berdasarkan perbandingan densitas fabrikasi lapisan *buffer* PyC ( $\rho_{buffer}$ ) dengan densitas teoritis PyC ( $\rho_{PyC}$ ). Oleh karena kernel bahan bakar juga mengalami *swelling* (ekspansi volume) akibat penumpukan nuklida hasil belah di dalam matrik bahan bakar (padat dan gas) maka volume ruang kosong tersebut perlu dikoreksi dengan penambahan volume kernel bahan bakar akibat *swelling*.

$$V = \frac{\rho_{buffer}}{\rho_{PyC}} V_{buffer} \quad (4)$$

$V_{buffer}$  adalah volume lapisan *buffer* (cm<sup>3</sup>).

Hubungan antara tegangan tarik yang timbul dengan perubahan dimensi dan peristiwa mulur yang terjadi pada lapisan IPyC dan OpyC dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{2j} = \frac{2}{3C} \cdot \frac{(W_j - 1)(S_r + 2S_t) + 3G_j(S_r - S_t)}{2W_j(2v - 1) - (1 + v)} \quad (5)$$

Dimana  $W_j = \left(\frac{r_{2j}}{r_{1j}}\right)^3$  dan  $G_j = \left(\frac{r_{1j}}{r_{2j}}\right)$ .

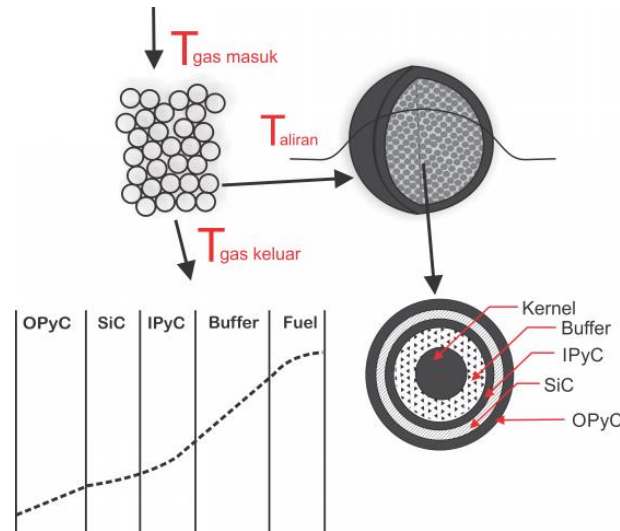
Probabilitas kegagalan dari masing-masing lapisan (IPyC, SiC dan OPyC) akibat tegangan yang ditimbulkan adalah :

$$f_i = 1 - \exp\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,i}}\right)^{m_i} \quad (6)$$

Dimana  $\sigma_i$  adalah tegangan maksimum yang timbul pada lapisan ke-i (MPa),  $\sigma_{0,i}$  adalah kekuatan lapisan pelindung ke-i, dan  $m_i$  adalah Weibull modulus lapisan ke-I [1,2,3,4,5].

### Distribusi Suhu Gas dan Distribusi Suhu Luar *Pebble*

Bahan bakar PBR diteras disusun secara acak sehingga suhu tidak dapat diketahui dalam waktu tertentu sampai bahan bakar masuk kebagian atas teras [5].



Gambar 2. Skema Analisis Termal untuk Sistem PBR

Suhu gas terdapat pada setiap lokasi teras, persamaannya dapat diketahui dari turunan suhu panas gas *inlet*. Untuk menghubungkan suhu helium dengan suhu permukaan *pebble*, yaitu dengan memasukkan nilai energi yang dihasilkan oleh permukaan luar *pebble*. Seperti yang telah dijelaskan oleh Jing Wang sebelumnya, suhu permukaan *pebble* diperoleh dari hubungan kondisi panas dan energi yang dihasilkan oleh *pebble*. Maka persamaan suhu pada luar *pebble* adalah sebagai berikut :

$$T_{pbs} = \frac{q'''_{peb} r_{fz}^3}{3 r_{ps}^2 h_{He}} + T_{He,bulk}(z) \quad (7)$$

- $T_{pbs}$  = suhu permukaan *pebble* (°C)
- $q'''_{peb}$  = nilai panas rata-rata yang dihasilkan *pebble* (W/m<sup>3</sup>)
- $r_{fz}$  = ruang bahan bakar pada radius *pebble* (m)
- $r_{ps}$  = radius *pebble* (m)
- $h_{He}$  = koefisien transfer panas helium (W/m<sup>2</sup>-°C)
- $T_{He}$  = suhu helium (°C)

**Distribusi Suhu *Pebble* dan Distribusi Suhu Partikel**

Setiap bahan bakar PBR terdiri dari sebuah ruang bebas bahan bakar yang tipis. Keadaan suhu pada bahan bakar PBR dapat kita ketahui melalui partikel bahan bakar yang dikalkulasi pada sebuah partikel dengan distribusi suhunya. Suhu bahan bakar PBR pada setiap keadaan memenuhi persamaan sebagai berikut :

$$T_{peb}(r) = T_{pbs} + \frac{q'''_{peb} r_{fz}^3}{3} \left[ \frac{1}{k_{nfz}} \left( \frac{1}{r_{fz}} - \frac{1}{r_{ps}} \right) + \frac{1}{2k_{fz}} \left( \frac{1}{r_{fz}} - \frac{r^2}{r_{fz}^3} \right) \right] \quad (8)$$

Untuk  $0 \leq r \leq r_{fz}$

$$T_{peb}(r) = T_{pbs} + \frac{q'''_{peb} r_{fz}^3}{3} \left[ \frac{1}{k_{nfz}} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_{ps}} \right) \right] \quad (9)$$

Untuk  $r_{fz} \leq r \leq r_{ps}$ , dimana :

- $T_{pbs}$  = suhu *pebble* (°C)
- $r_{fz}$  = radius ruang bahan bakar pada *pebble* (m)
- $r_{ps}$  = radius *pebble* (m)
- $k_{nfz}$  = konduktivitas rata-rata tanpa ruang bahan bakar pada *pebble* (W/m-°C)
- $k_{fz}$  = konduktivitas rata-rata ruang bahan bakar pada *pebble* (W/m-°C)

Sehingga konduktivitas rata-rata dari ruang bahan bakar pada *pebble* memenuhi persamaan sebagai berikut :

$$k_{fz} = \frac{1}{V_{fz}} (V_f k_f + V_b k_b + V_g k_g + V_1 k_1 + V_s k_s + V_0 k_0 + V_{fzm} k_{fzm}) \quad (10)$$

$V_f, V_b, V_g, V_1, V_s, V_0$  dan  $V_{fzm}$  merupakan volume bahan bakar, *buffer*, celah gas pada setiap partikel bahan bakar selama iradiasi berlangsung, IPyC, SiC (ZrC), OPyC dan setiap sel grafit yang berada di zona bahan bakar *pebble*. Selain itu  $k_f, k_b, k_g, k_1, k_s, k_0$  dan  $k_{fzm}$  merupakan sebuah fungsi konduktivitas suhu, hasil

*burnup* tiap celah gas saat dalam keadaan *buffer* selama menyusut dan tidak.  $k_{nfz}$  konduktivitas rata-rata lapisan grafit terluar tanpa bahan bakar [5].

**Parameter Input**

Input yang digunakan yaitu dengan memanfaatkan kode TIMCOAT. Dengan memanfaatkan kode TIMCOAT ini, kita masukan beberapa nilai parameter reaktor dan teras yang akan digunakan. Nilai parameter reaktor dan teras yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter Reaktor dan Teras

| <b>Parameter reaktor</b>             |        |
|--------------------------------------|--------|
| Daya MWth                            | 300    |
| Temperatur <i>inlet</i> teras (°C)   | 250    |
| Temperatur <i>outlet</i> teras (°C)  | 750    |
| Aliran massa pendingin (kg/s)        | 118    |
| <b>Parameter teras</b>               |        |
| Tinggi teras (m)                     | 10     |
| Radius teras (m)                     | 1,75   |
| Jumlah <i>pebble</i> /m <sup>3</sup> | 11000  |
| Jumlah <i>pebble</i> dalam teras     | 360000 |

Pada penelitian ini, ukuran bahan bakar PBR divariasikan dari ukuran 300 µm sampai dengan 600 µm. Ukuran tersebut merupakan ukuran yang paling ideal digunakan pada umumnya. Selain bahan bakar, setiap lapisan yang digunakan pun divariasikan, variasi ini dilakukan dengan harapan diperoleh satu set parameter input yang baik dan dapat digunakan sebagai acuan di masa mendatang. Lapisan yang divariasikan adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Variasi Diameter Kernel

| <b>Variasi diameter kernel</b> |
|--------------------------------|
| 300 µm                         |
| 400 µm                         |
| 500 µm                         |
| 600 µm                         |

Tabel 3. Variasi lapisan buffer

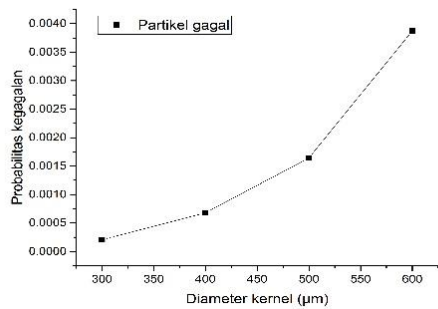
| <b>Variasi lapisan buffer</b> |
|-------------------------------|
| 50 µm                         |
| 60 µm                         |
| 70 µm                         |
| 80 µm                         |
| 90 µm                         |

Tabel 4. Variasi lapisan IPyC, SiC dan OPyC

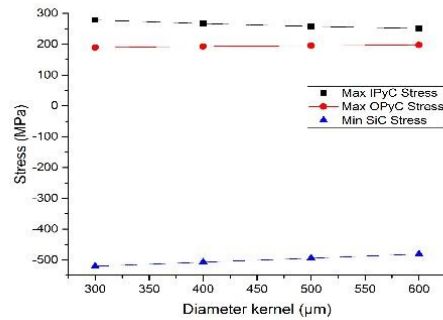
|                                      |       |                            |       |
|--------------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| <b>Variasi lapisan IPyC dan OPyC</b> | 35 µm | <b>Variasi lapisan SiC</b> | 36 µm |
|                                      | 36 µm |                            | 37 µm |
|                                      | 37 µm |                            | 38 µm |
|                                      | 38 µm |                            | 39 µm |
|                                      | 39 µm |                            | 40 µm |

**HASIL DAN DISKUSI**

Bahan bakar PBR didesain dengan memvariasikan ukuran bahan bakar dan memvariasikan setiap lapisannya. Parameter reaktor yang digunakan adalah reaktor dengan daya 300 MWth. Berdasarkan desain bahan bakar PBR di atas tampak bahwa keselamatan dan kinerja operasi reaktor sangat ditentukan oleh integritas mekanik partikel bahan bakarnya. Untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja operasi reaktor, usaha dasar yang diperlukan adalah mereduksi sekecil mungkin fraksi kegagalan lapisan pelindung hasil fabrikasi dan mencegah penambahan kegagalan lapisan pelindung yang signifikan selama iradiasi.



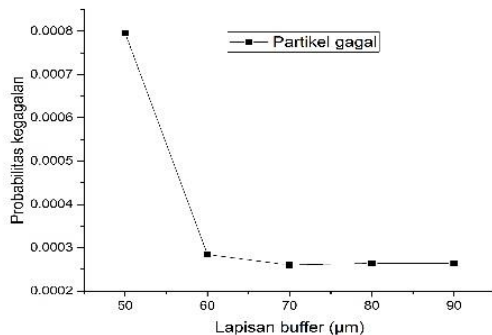
(a)



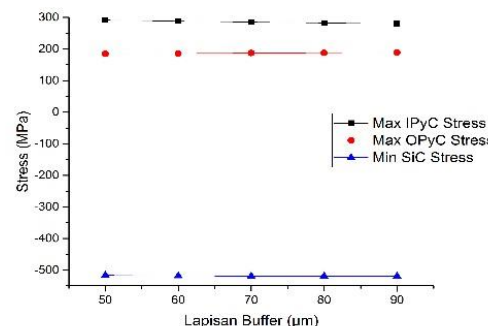
(b)

Gambar 3. Grafik Probabilitas kegagalan bahan bakar terhadap diameter kernel (a), Grafik Keadaan *stress* lapisan terhadap bahan bakar kernel (b)

Dari hasil yang diperoleh dapat kita lihat bahwa probabilitas yang paling rendah ditunjukkan pada kernel dengan diameter 300 µm yang memiliki nilai probabilitas sebesar  $0.2040 \times 10^{-3}$ . Hal ini dikarenakan selama proses fisi nuklir kernel menghasilkan isotop produk fisi berupa gas yang menyebabkan tekanan pada lapisan, jadi semakin besar diameter kernel yang digunakan maka isotop gas hasil produk fisi yang dihasilkan selama proses fisi nuklir akan semakin banyak dan begitupun sebaliknya. Selain itu, kita dapat lihat dari tingkat *stress* lapisan IPyC, SiC dan OPyC terhadap diameter kernel. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jika ditinjau dari tingkat *stress* dari pelapisannya pada lapisan IPyC terjadi penurunan karena kita tahu bahwa IPyC merupakan pelapis pertama yang menghalangi gas hasil fisi dari kernel sehingga semakin meningkat diameter kernel maka semakin banyak isotop gas fisi yang dihasilkan sehingga menghasilkan tekanan yang lebih tinggi pada IPyC dan SiC.



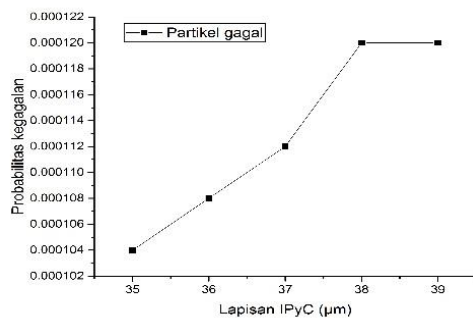
(c)



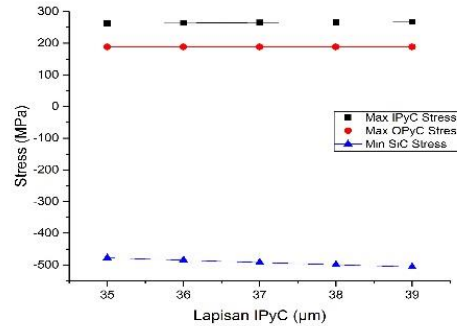
(d)

Gambar 4. Grafik Probabilitas kegagalan bahan bakar terhadap lapisan *buffer* (c), Grafik Keadaan *stress* lapisan terhadap lapisan *buffer* (d)

Probabilitas kegagalan paling rendah pada variasi lapisan *buffer* ditunjukkan pada lapisan 70 µm, nilai probabilitas kegagalannya  $0,2600 \times 10^{-3}$ . Pada lapisan 50 µm ke lapisan 60 µm terjadi penurunan probabilitas kegagalan, hal ini dikarenakan gas hasil belah yang terlepas dari kernel bahan bakar serta gas CO yang terbentuk dari hasil reaksi lapisan *buffer* dengan oksigen berlebih akibat pembelahan  $UO_2$  akan mengisi ruang kosong yang terdapat didalam lapisan *buffer*. Sehingga pada lapisan 50 µm ini volume ruang kosong yang terdapat didalam lapisan *buffer* berkurang tidak sebanding dengan dengan penambahan volume kernel, jumlah gas hasil belah yang terlepas maupun gas CO yang terbentuk akan bertambah banyak dan pengurangan volume ruang kosong didalam lapisan *buffer* akan semakin besar. Dengan demikian performa terbaik lapisan *buffer* diperoleh pada lapisan 70 µm karena pada keadaan ini peningkatan lapisan pada *buffer* hanya sedikit pengaruhnya pada IPyC dan OPyC, itu dikarenakan *buffer* ini berpori sehingga gas hasil belah ditampung dan memberikan ruang bebas untuk produk fisi yang dihasilkan ketika kernel membengkak. Selama iradiasi, *buffer* akan terus menerus menampung isotop-isotop baru yang lahir dari hasil reaksi fisi sehingga pengaruhnya ketika ketebalan *buffer* ditingkatkan maka gangguan pada IPyC, SiC dan OPyC semakin kecil.



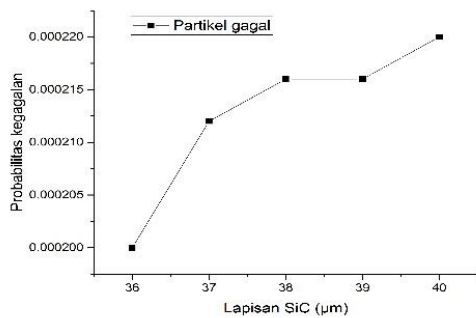
(e)



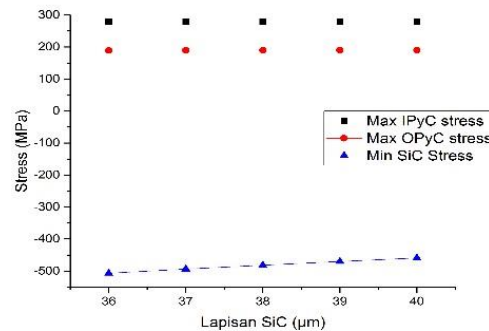
(f)

Gambar 5. Grafik Probabilitas kegagalan bahan bakar terhadap lapisan IPyC (e), Grafik Keadaan *stress* lapisan terhadap lapisan IPyC (f)

Pada lapisan IPyC probabilitas kegagalan paling rendah ditunjukkan pada lapisan 35 µm, peningkatan ketebalan lapisan IPyC jika ditinjau dari grafik menunjukkan bahwa semakin tebal lapisannya menyebabkan peningkatan probabilitas kegagalannya, hal ini disebabkan karena pengaruh *stress* pada IPyC yang meningkat pula sehingga lapisan IPyC membutuhkan kinerja lebih untuk menahan tekanan yang dihasilkan oleh lapisan IPyC sendiri dan tekanan yang dihasilkan dari lapisan lainnya karena lapisan IPyC berfungsi sebagai penghalang pelepasan isotop produk fisi yang berupa gas dari kernel.



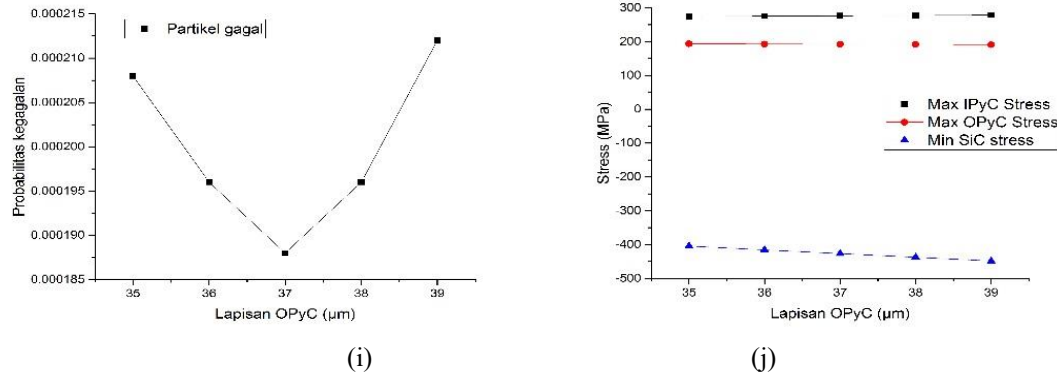
(g)



(h)

Gambar 5. Grafik Probabilitas kegagalan bahan bakar terhadap lapisan SiC (g), Grafik Keadaan *stress* lapisan terhadap lapisan SiC (h)

Untuk lapisan SiC, probabilitas kegagalan terendah diperoleh pada lapisan 36 µm dengan probabilitas kegagalan  $0.2000 \times 10^{-3}$ . SiC merupakan lapisan terkuat karena dapat mempertahankan integritas mekanik yang tinggi dan dapat menstabilkan kinerja setiap lapisan bahan bakar dari produk fisi yang bersifat logam karena SiC memiliki peranan penting bagi pertahanan utama bahan bakar TRISO. *Stress* yang timbul pada lapisan SiC jauh lebih besar dari pada lapisan IPyC dan OPyC, hal ini dikarenakan tekanan yang bekerja pada lapisan IPyC akan ditahan oleh lapisan SiC, berdasarkan hal tersebut dapat dikatakan bahwa tekanannya hanya timbul pada lapisan SiC. Maka oleh sebab itu, SiC akan lebih tahan terhadap perubahan *pyrocarbon* sehingga akan menimbulkan *stress* yang tinggi terhadap SiC sendiri dan gangguan tersebut pengaruhnya kecil pada lapisan IPyC dan OPyC.



Gambar 6. Grafik Probabilitas kegagalan bahan bakar terhadap lapisan OPyC (i), Grafik Keadaan *stress* lapisan terhadap lapisan OPyC (j)

Probabilitas kegagalan dari lapisan OPyC yang paling rendah diperoleh pada ketebalan 37 μm dengan nilai probabilitas  $0.1880 \times 10^{-3}$ . Probabilitas kegagalan pada variasi lapisan OPyC cenderung meningkat dan menurun hal ini disebabkan karena lapisan OPyC secara mekanik berfungsi sebagai pelindung lapisan SiC agar tidak rusak. Selain itu, pada penelitian ini saat lapisan OPyC divariasikan lapisan IPyC pun divariasikan karena kedua lapisan ini pada dasarnya memiliki fungsi yang sama. Penebalan lapisan OPyC ini berbeda karena lapisan ini merupakan lapisan terluar dan permukaannya dianggap sebagai ruang bebas. Semakin tebal lapisan OPyC maka pengaruh tekanan pada lapisan SiC semakin kuat namun penebalan lapisan OPyC tidak memiliki banyak pengaruh terhadap lapisan IPyC karena lapisan ini melindungi lapisan SiC.

## KESIMPULAN

Dari hasil studi dan simulasi menggunakan TIMCOAT ini diperoleh satu set parameter yang baik yaitu, probabilitas kegagalan bahan bakar terendah pada setiap lapisan pada nilai diameter kernel 300 μm dengan probabilitas kegagalan sebesar  $0.2040 \times 10^{-3}$ , lapisan buffer 70 μm dengan probabilitas kegagalan  $0.2600 \times 10^{-3}$ , lapisan IPyC 35 μm dengan probabilitas kegagalan  $0.1040 \times 10^{-3}$ , lapisan SiC 36 μm dengan probabilitas kegagalan  $0.2000 \times 10^{-3}$  dan pada lapisan OPyC 37 μm dengan probabilitas kegagalan  $0.1880 \times 10^{-3}$ . Setiap lapisan yang digunakan sangat berpengaruh terhadap performa bahan bakar PBR dan geometri lapisan TRISO, karena masing-masing lapisan memiliki peranan penting untuk mencegah banyaknya kegagalan bahan bakar.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung dan Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir BATAN serta pihak-pihak lainnya yang telah membantu dalam penulisan dan mendanai makalah ini.

## REFERENSI

1. A. G. Abdullah, "Peningkatan Kinerja Sistem Keselamatan Pasif Pada Reaktor Nuklir Dengan Penambahan Komponen RVACS," *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, vol. 2, no. 10, pp. 168-177, 2014.
2. Zuhair, "Investigasi Kritikalitas HTR (High Temperature Reactor) Pebble Bed Sebagai Fungsi Radius dan Pengkayaan Bahan Bakar Kernel," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 2, no. 2, pp. 146-156, 2012.
3. R. D. Syarifah, "Perhitungan Neutronik Teras Homogen dari High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) dengan Bahan Bakar Uranium Nitrida," *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 41-44, 2015.
4. B. Herutomo, "Analisis Keandalan Bahan Bakar Reaktor Temperatur Tinggi," *Prosiding Seminar Reaktor Temperatur Tinggi*, vol. 5, pp. 117-131, 2000.
5. Wang, J. (2012). An Integrated Performance Model for High Temperature Gas Cooled Reactor Coated Particle Fuel.

6. Wang, J., Ballinger, R. G., Maclean, H. J., & Diecker, J. T. (2004). TIMCOAT: an Integrated Fuel Performance Model for Coated Particle Fuel. *Nuclear Technology*, 148 (1), 68–96.
7. Stawicki, M. a., Ballinger, R. G., Supervisor, T., Kadak, A. C., Reader, T., & Coderre, J. a. (2006). Benchmarking of the MIT High Temperature Gas-Cooled Reactor TRISO-Coated Particle Fuel Performance Model.
8. Kadak, A. C., Petti, D. A., Ballinger, R. G., Terry, W. K., Driscoll, M. J., Gougar, H. D., et al. (2000). Modular Pebble Bed Reactor Project University Research Consortium Annual Report Mit Collaborators Ineel Collaborators Modular Pebble Bed Reactor. In *Modular pebble bed reactor project university research consortium annual report* (p. 63).
9. Setiadipura, T. (2015). Requirements of Pebble Bed Reactor's Plant Information Model Center for Nuclear Reactor Technology and Safety Introduction.
10. Setiadipura, T., & Obara, T. (2014). Development of Monte Carlo-based pebble bed reactor fuel management code. *Annals of Nuclear Energy*, 71 ,313–321.
11. Sawa, K., Shiozawa, S., & Minato, K. (1996). *Development of a coated fuel particle failure model under high burnup irradiation*. *Journal of Nuclear*, 33 (9), 712–720.