Dokumen Pengembangan TRIAC
(TRIso *Analysis Code*)

LABORATORIUM KOMPUTASI

PUSAT TEKNOLOGI DAN KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR

Disusun oleh:
Arya Adhyaksa Waskita

Supervisor:
Dr. Topan Setiadipura

31 Juli 2017

Daftar Isi

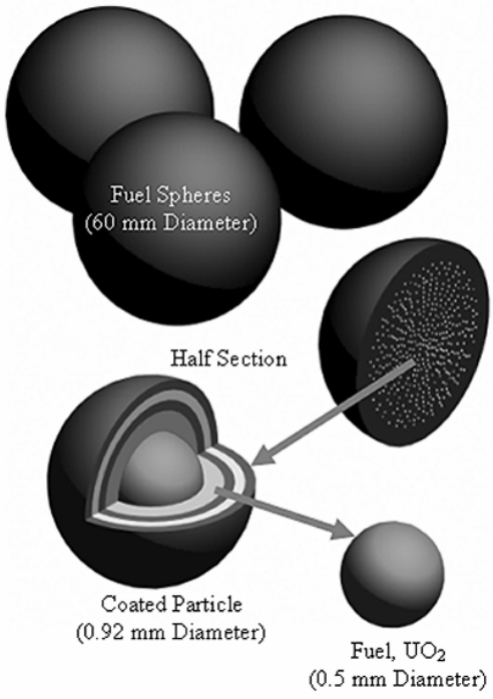
Daftar Gambar

Daftar Program

BAB 1

Pendahuluan

BATAN saat ini tengah berencana membangun reaktor riset baru berbasis HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*) [1] sebagai persiapan PLTN, yang akan dibangun di Indonesia di masa depan [2]. Salah satu yang perlu diperhatikan dalam pengembangan reaktor jenis ini adalah bahan bakarnya yang berjenis *pebble* yang bentuknya dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1.1. Bahan bakar harus dirancang sedemikian rupa sehingga rasio gagalnya bahan bakar selama operasi minimal.

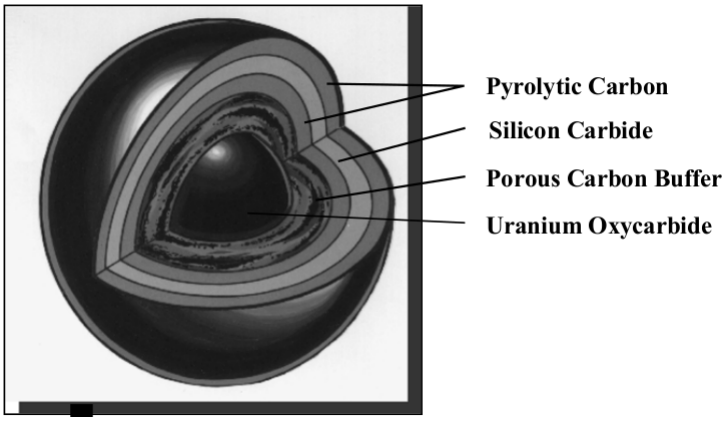


Gambar 1.1: Ilustrasi bentuk bahan bakar *pebble* [1]

Bahan bakar berjenis *pebble* ini memiliki komponen utama yang dalam Gambar 1.1 disebut sebagai *coated particle*. Komposisi elemen pelapis (*coated*) dapat diilustrasikan dalam Gambar 1.2. Dalam upaya menguasai teknologi reaktor berjenis HTGR melalui pengembangan RDE, salah tugas yang harus dilaksanakan adalah penguasaan analisis kegagalan bahan bakarnya, khususnya ketika terjadi kecelakaan.

Beragam model analisis telah dikembangkan, salah satunya yang dikembangkan oleh Wang [1]. Selain itu, terdapat sebuah model sederhana yang dikembangkan oleh Verfondern dalam PANAMA [3]. Pada model tersebut, bahan bakar disebut gagal jika kekuatan lapisan

SiC (*Silicon Carbide*) lebih kecil daripada tekanan internal dari lapisan di bawahnya (perhatikan Gambar 1.2). Model inilah yang akan diterapkan dalam TRIAC (*TRIso Analysis Code*).



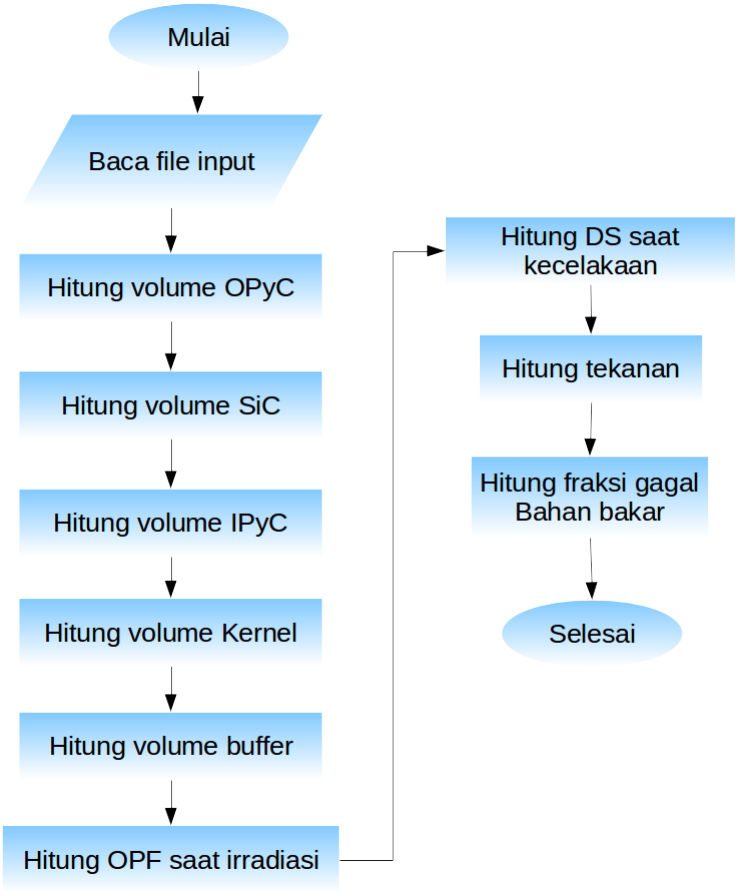
Gambar 1.2: Komposisi elemen pelapis partikel [1]

BAB 2

Alur Perhitungan

2.1 Pendahuluan

Secara umum, perhitungan TRIAC mengikuti diagram alir seperti pada Gambar 2.1 berikut. Sementara kode sumbernya disajikan dalam Listing 3.4 yang dibangun sepenuhnya berbasis pengetahuan yang diperoleh dari dokumen laporan teknis [4].



Gambar 2.1: Diagram alir perhitungan TRAIC

2.2 Membaca *file input*

Sub rutin ini ditujukan untuk membaca file input dengan format seperti terdapat pada Lampiran 3.3. Sub rutin ini menggunakan skema yang kaku karena identifikasi nilai-nilai yang akan dibaca ditentukan oleh suatu teks tertentu. Setelah teks yang menjadi penanda, nilai-nilai yang dibutuhkan dibaca. Tetapi, nilai tersebut dapat langsung berada dalam satu baris bersama dengan teks penanda, atau berada pada baris yang berbeda. Sub rutin ini terdapat pada Listing 3.1 dan akan dijelaskan pada sub bab 3.1.

2.3 Menghitung OPF saat irradiasi

OPF (*Oxygen Per Fission*) adalah jumlah atom oksigen yang terlepas selama fisi atom U^{235} atau Pu^{239}. Atom oksigen ini mempengaruhi terbentunya senyawa CO yang akan meningkatkan tekanan internal dalam bahan bakar. Pembentukan senyawa CO juga dipengaruhi oleh temperatur, waktu serta jenis partikel kernel.

Nilai OPF didekati oleh persamaan (2.1). Nilai n dalam persamaan (2.1) sama dengan banyaknya data sejarah irradiasi. Nilai Δ_i merupakan selisih waktu dari sejarah irradiasi yang dicatat. Nilainya akan berubah dengan berubahnya rentang pencatatan temperatur irradiasi. Jika dalam contoh kasus yang disajikan pada Lampiran 1, rentang waktu pencatatan temperatur irradiasi dilakukan setiap 17 hari, maka Δ_i adalah 17 hari atau $17x24x3600$ detik. t_B adalah waktu irradiasi total bahan bakar, sedangkan $\overline{t_i}$ waktu irradiasi ketika pencatatan dilakukan.

$$OPF \simeq \sum_{i=1}^{n} g(\overline{t_i}) \cdot (t_B - \overline{t_i}) \cdot \Delta t_i \tag{2.1}$$

Tetapi, nilai OPF juga didefinisikan seperti persamaan (2.2), dengan nilai $g(\overline{t_i})$ didefinisikan oleh persamaan (2.3). Nilai R pada persamaan (2.3) adalah konstanta gas sebesar $8.3143[\frac{J}{mole \cdot K}]$.

$$OPF = \frac{g(T)}{2} \cdot t^2 \tag{2.2}$$

$$\frac{g(T)}{2} = 8.32 \cdot 10^{-11} \cdot e^{\frac{-163000}{R \cdot T}} \tag{2.3}$$

Nilai OPF selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai temperatur irradiasi (T_B) dari persamaan (2.4). Formula empiris tersebut sesuai untuk jenis bahan bakar UO_2.

$$\log OPF = -10.08 - \frac{0.85 \cdot 10^4}{T_B} + 2 \cdot \log t_B \tag{2.4}$$

Sedangkan nilai T_B akan digunakan untuk menghitung DS, faktor berkurangnya koefisien difusi (s^{-1}) dari gas hasil fisi di dalam partikel kernel. Nilainya untuk bahan bakar UO_2 memenuhi persamaan (2.5).

$$\log DS = -2.30 - \frac{0.8116 \cdot 10^4}{T_B}. \tag{2.5}$$

Terakhir, DS akan digunakan untuk menghitung sebuah nilai tak berdimensi τ_i yang memenuhi persamaan (2.6).

$$\tau_i = DS(T_B) \cdot t_B \tag{2.6}$$

2.4 Menghitung DS saat kecelakaan

Seperti telah dijelaskan dalam sub bab 2.3, *DS* adalah faktor berkurangnya koefisien difusi gas hasil fisi dalam partikel kernel. Sekarang, faktor ini dihitung ketika kondisi kecelakaan terjadi. Kita memerlukan sejarah temperatur bahan bakar setelah kecelakaan terjadi serta τ_i. yang telah dihitung di persamaan (2.6).

Dengan menggunakan persamaan (2.6), kita dapat menghitung nilai *DS* dengan temperatur kecelakaan yang tercatat. Kemudian, kita perlu menghitung nilai τ_A dengan persamaan (2.6) tetapi dengan nilai temperatur dan waktu setelah terjadi kecelakaan. Selanjutnya, dengan modal nilai τ_i dan τ_A kita akan menghitung nilai Fd, yang merupakan faktor fisi gas Xe dan Kr (yang dominan). Nilai Fd dihitung dengan persamaan (2.7).

$$Fd = \frac{(\tau_i + \tau_A) \cdot f(\tau_i + \tau_A) - \tau_A \cdot f(\tau_A)}{\tau_i} \tag{2.7}$$

Sedangkan nilai $f(\tau)$ dihitung menggunakan persaamaan (2.8). Batas atas nilai n pada persaamaan (2.8) dapat menggunakan nilai yang cukup besar, misalnya 1000, atau ketika dua nilai berdekatan yang dihasilkan hanya berselisih kurang dari 10^{-20}. Idealnya, suku penjumlahan sebanyak n akan semakin baik jika hasilnya mendekati 1.

$$f(\tau) = 1 - \frac{6}{\tau} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}}{n^4 \cdot \pi^4} \right) \tag{2.8}$$

2.5 Menghitung tekanan

Tekanan adalah variabel yang penting dalam tahapan analisis ini karena akan menentukan fraksi gagal bahan bakar. Untuk menghitung tekanan yang timbul ketika kecelakaan terjadi pada waktu tertentu, sehingga menyebabkan panas tertentu, digunakan persamaan (2.9) [1].

$$p = \frac{(F_d \cdot F_f + OPF) \cdot F_b \cdot (\frac{V_f}{V_k}) \cdot R \cdot T}{V_m} \tag{2.9}$$

dengan :

F_d = fraksi relatif gas fisi yang lepas

F_f = produk fisi yang dihasilkan dari gas fisi stabil, F_f=0.31

OPF = jumlah atom oksigen setiap terjadi fisi saat terjadi kecelakaan

F_b = *burnup* logam berat (FIMA)

V_f = fraksi void [m^3], terkait dengan 50% volume buffer

V_k = volume kernel [m^3]

V_m = volume molar dalam partiekl kernel $\left[\frac{m^3}{mole}\right]$

R = konstanta gas, 8.3143 $\left[\frac{J}{(mole \cdot K)}\right]$

Khusus untuk variabel OPF, karena perhitungan tekanan dilakukan ketika terjadi kecelakaan, digunakanlah persamaan (2.10). Persamaan (2.10) mirip dengan persamaan (2.4) dengan penambahan suku ke-3.

$$\log OPF = -10.08 - \frac{0.85 \cdot 10^4}{T_B} + 2 \cdot \log t_B - 0.04 \cdot \left(\frac{10^4}{T} + \frac{10^4}{T_B + 75} \right) \tag{2.10}$$

2.6 Fraksi gagal bahan bakar

Tahapan terkahir dari analisis ini adalah perhitungan fraksi gagal bahan bakar. Secara umum, fraksi gagal bahan bakar dipengaruhi sejumlah sebab. Dalam analisis yang dilakukan TRAIC (dan juga PANAMA sebagai acuannya), gagalnya bahan bakar dapat disebabkan oleh 3 sebab. Ketiganya adalah sebagai berikut.

1. Pabrikasi (ϕ_0). Dalam analisis ini, nilai ϕ_0 diasumsikan sama dengan 0.
2. Berkurangnya *tensile strength* lapisan SiC (ϕ_1). Hal ini dapat terjadi karena
   - proses irradiasi maupun
   - meningkatnya temperatur secara signifikan ketika terjadi kecelakaan) atau disebut juga *grain boundary*.
3. Dekomposisi termal pada temperatur tinggi yang menyebabkan terjadinya *weight loss* pada lapisan SiC (ϕ_2).

Ketiga sebab terjadinya kegagalan bahan bakar tersebut mengikuti persamaan (2.11).

$$\phi_{total} = 1 - (1 - \phi_1) - (1 - \phi_2) \tag{2.11}$$

2.6.1 Fraksi gagal akibat berkurangnya *tensile strength*

Nilai fraksi gagal bahan bakar pada waktu t setelah terjadinya kecelakaan diperoleh dengan persamaan (2.12).

$$\phi_1(t,T) = 1 - e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_o}\right)^m} \tag{2.12}$$

dengan :

σ_o=*tensile strength* dari SiC [Pa] pada akhir irradiasi

σ_t=tekanan yang dialami SiC [Pa] akibat tekanan gas internal

Variabel tekanan internal pada SiC (σ_t) dihitung dengan dengan persamaan (2.13). Pada persamaan (2.13), jari-jari lapisan SiC merupakan rerata karena lapisan SiC memang memiliki ketebalan yang nilai awalnya diwakili oleh variabel d_o.

$$\sigma_t = \frac{r \cdot p}{2 \cdot d_o} \cdot \left(1 + \frac{\dot{v} \cdot t}{d_o}\right) \tag{2.13}$$

dengan :

r=rerata jari-jari SiC, $\left(0.5 \cdot \left(r_a^3 + r_i^3\right)\right)^{\frac{1}{3}}$ [m]

d_o=ketebalan awal lapisan SiC, $r_a - r_i$ [m]

p=tekanan gas fisi dalam partikel [Pa]

$\dot{v}$=laju korosi sebagai fungsi temperatur (T), $\left[\frac{m}{s}\right]$

Sedangkan variabel laju korosi ($\dot{v}$) dihitung dengan persamaan (2.14), mirip dengan persamaan (2.3) dengan perbedaan pada konstanta.

$$\dot{v} = 5.87 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-\left(\frac{179500}{R \cdot T}\right)} \tag{2.14}$$

Selanjutnya, variabel *tensile strength* lapisan SiC, penurunan nilainya mengikuti persamaan (2.15). Variabel σ_{oo} merupakan *tensile strength* awal sebelum diiradiasi. Nilainya merupakan sesuatu yang dapat diukur. Sedangkan Γ dan Γ_s masing-masing merupakan *fluence* netron cepat $\left[10^{25} m^{-2} EDN\right]$ dan *fluence* yang dipengaruhi temperatur irradiasi. Nilai Γ_s ditentukan menggunakan persamaan (2.16). Nilai minimum σ_{oo} merupakan nilai awal *tensile strength* dan diasumsikan sama dengan 196 [MPa]. Tentunya, dengan perlakuan irradiasi yang sama, lapisan SiC dengan nilai awal *tensile strength* terkecil akan memiliki nilai akhir *tensile strength* yang juga kecil.

$$\sigma_o = \sigma_{oo} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s}\right) \tag{2.15}$$

$$\log \Gamma_s = 0.556 + \frac{0.065 \cdot 10^4}{T_B} \tag{2.16}$$

Tensile strength lapisan SiC yang dihitung menggunakan persamaan (2.15) merupakan nilai yang berlaku pada satu *coated particle*. Padahal, ada sangat banyak *coated particle* yang dioperasikan. Karena itu, diperlukan perhitungan yang mempertimbangkan variabel ini untuk semua distribusi *coated particles*. Dengan pendekatan yang sama seperti persamaan (2.15), persamaan (2.17) dibangun.

$$m_o = m_{oo} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_m}\right) \tag{2.17}$$

dengan $\log \Gamma_m = 0.394 + \frac{0.065 \cdot 10^4}{T_B}$ dan nilai $m_{oo} = 2$ sebagai nilai terkecilnya. Nilai m_o pada persamaan (2.17) kemudian akan disubstitusi ke persamaan (2.12) sebagai m.

Selain korosi karena proses irradiasi, lapisan SiC juga dapat terkorosi karena *grain Boundary*. Jika korosi akibat irradiasi tergantung pada sejarah irradiasi yang dialami bahan bakar dan terjadi sebelum kecelakaan, maka korosi karena *grain Boundary* terjadi setelah kecelakaan. Penurunan nilai distribusi *tensile strength* akibat meningkatnya temperatur karena kecelakaan mengikuti persamaan (2.18).

$$m = m_o \cdot \left(0.44 + 0.56 \cdot e^{-\dot{\eta} \cdot t}\right) \tag{2.18}$$

di mana nilai $\dot{\eta}$ mengikuti persamaan 2.19 dengan pola yang sama seperti persamaan (2.14).

$$\dot{\eta} = 0.565 \cdot e^{\left(\frac{-187400}{R \cdot T}\right)} [s^{-1}] \tag{2.19}$$

2.6.2 Fraksi gagal bahan bakar akibat *weight loss*

Laju *weight loss* yang terjadi akibat tingginya temperatur saat terjadi kecelakaan mengikuti persamaan (2.20).

$$k = k_o \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T}} \tag{2.20}$$

dengan $Q = 556 \left[\frac{kJ}{mol}\right]$ dan k_o adalah faktor frekuensi yang tergantung pada jenis partikel.

Selanjutnya, diasumsikan bahwa partikel TRISO tergantung pada apa yang disebut sebagai "*action integral*", dan disimbolkan dengan ζ yang nilainya mengikuti persamaan (2.21).

$$\zeta = \int_{t_1}^{t_2} k(T) dt \tag{2.21}$$

dengan $K(T)$ adalah nilai yang menggambarkan sejarah kondisi partikel yang bergantung pada temperatur dan waktu.

Secara numerik, persamaan (2.21) dapat dituliskan sebagai persamaa (2.22).

$$\zeta(t_2) = \zeta(t_1) + k(T_m) \cdot (t_2 - t_1) \tag{2.22}$$

dengan $k(T_m) = \frac{375}{d_o} \cdot e^{\left(\frac{-556000}{R \cdot T_m}\right)}$.

Kemudian, fraksi gagal ϕ_2 sedemikian rupa sehingga nilainya ≤ 1. Karena itu, variabel ϕ_2 selanjutnya didefinisikan sebagai persamaan (2.23).

$$\phi_2(t,T) = 1 - e^{-\alpha \cdot \zeta^{\beta}} \tag{2.23}$$

Nilai α dan β kemudian ditentukan secara empiris. Dan berdasarkan penelitian empiris sebelumnya terhadap partikel UO_2, diperoleh nilai $\alpha = \ln 2 = 0.693$, sedangkan nilai $\beta = 0.88$.

Dalam TRIAC, faktor fraksi gagal ini tidak akan dipertimbangkan. Hal ini disebabkan karena kondisi ini terjadi pada temperatur di atas 2000 °C. Sementara RDE tidak dirancang untuk sampai pada temperatur tersebut.

BAB 3

Penerapan

3.1 Pendahuluan

TRIA *Code* yang telah dijelaskan sebelumnya secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua tugas utama, masing-masing adalah perhitungan di waktu irradiasi dan kecelakaan. Seluruh proses tersebut didahului dengan membaca *file input* dengan format yang sama seperti pada Lampiran 3.3. Penerapan pembacaan *file input* adalah seperti pada Listing 3.1.

Di Listing 3.1, pembacaan *input data* dilakukan secara sekuensial dan manual. Nilai-nilai yang harus dibaca ditentukan berdasarkan informasi yang ada pada *file input*. Sebagai contoh, untuk membaca nilai geometri, digunakan karakter "[m]" sebagai penanda. Jika ditemukan karakter tersebut, maka di saat itulah pembacaan nilai geometri dilakukan. Hal inilah yang dimaksud sebagai pembacaan secara manual. Ketika karakter yang diperlukan berubah, maka modifikasi harus dilakukan pada modul ini.

Selain nilai terkait geometri, diperlukan juga pembacaan untuk nilai *physical properties* serta sejarah operasi, baik saat operasi normal maupun kecelakaan. Pembacaan nilai yang berbeda dilakukan secara berurutan berdasarkan kemunculan nilai tersebut dalam *file input*. Hal inilah yang dimaksud dengan pembacaan secara sekuensial.

Terdapat empat jenis data yang perlu dibaca dari *file input* dalam Lampiran 1, masing-masing adalah sebagai berikut. Penerapannya disajikan dalam Listing 3.1.

1. Data tentang geometri *pebble*. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusGeometry` (baris ke-4. Di dalam data geometri, terdapat empat data berbeda, masing-masing secara berurutan adalah panjang jejari *pebble* terluar, OPyC (*Outer Pyrolitic Carbon*), SiC (*Silicon Carbide*), IPyC (*Inner Pyrolitic Carbon*), *buffer* dan kernel. Data geometri akan digunakan untuk menghitung volume setiap elemen pelapis (Gambar 1.2). Yang perlu diperhatikan adalah data jari-jari yang disajikan adalah jarak dari pusat bahan bakar sampai titik terluar dari setiap lapisan. Karena itu, volume suatu lapisan harus mempertimbangkan lapisan-lapisan di dalamnya. Data geometri disimpan dalam variabel diberi nama `dimensi` dan dalam bentuk `list` (baris ke-9).

2. Data tentang kekuatan SiC. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusCharacteristics` (baris ke-5 pada Listing 3.1). Ada empat nilai yang perlu dibaca terkait kekuatan SiC, masing-masing adalah SiC *Tensile Strength* [Pa], *Weibull Modulus Burnup* [FIMA], *Fission Yield of stable fission gasses* [Ff], *Fast Neutron Fluence* dan rasio berat Th terhadap U-235 pada kernel. Data terkait kekuatan SiC disimpan dalam variabel yang diberi nama `characteristics` dalam bentuk `list` (baris ke-10).

3. Data tentang sejarah irradiasi. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusIrradiation` (baris ke-6 pada Listing 3.1). Data ini merupakan data temperatur bahan bakar *pebble* pada selang waktu tertentu. Sebagai contoh, data yang disajikan pada Lampiran 1 diambil pada selang waktu 17 hari. Data sejarah irradiasi disimpan dalam variabel yang diberi nama `irradiation` dalam bentuk `list`. Setiap elemen adalah `list` yang secara *nested* terdiri dari dua elemen yang mewakili data kolom kedua dan ketiga tiap akuisisi (baris ke-11). Ilustrasinya adalah seperti $[[0,593],[1468800,833],\ldots]$ dengan informasi waktu pengukuran dalam satuan detik. Data tentang nomor urut tidak digunakan karena selain tidak diperlukan dalam perhitungan, akan menyulitkan proses interpolasi yang akan diterapkan berikutnya.

4. Data tentang sejarah kecelakaan. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusAccident` (baris ke-7). Data ini memiliki pola yang sama dengan data sejarah irradiasi. Data sejarah keselakaan disimpan dengan cara yang sama seperti data tentang sejarah irradiasi tetapi dengan nama `accident` (baris ke-12). Ilustrasinya adalah seperti $[[0,1033],[2341.44,1033],\ldots]$ dengan informasi waktu pengukuran dalam satuan detik.

.

Namun, terlihat pada baris ke-77 dari Listing 3.1, terdapat total 5 variabel yang dikembalikan ke fungsi awal, dengan variabel kelima adalah $b-a$. Variabel ini adalah rentang waktu pengukuran data irradiasi.

Listing 3.1: InputData.py

```
1  import sys, math, re
2  def readdata(namafile):
3          f=open(namafile,"r")
4          statusGeometry="[m]"
5          statusCharacteristics="SiC Tensile Strength [Pa]"
6          statusIrradiation="INPUT: Irradiation Temp. Hystory"
7          statusAccident="INPUT: Accident Temp. Hystory"
8          statusAll=0
9          dimensi=[]
10         characteristics=[]
11         irradiation=[]
12         accident=[]
13         i=0
14         x=0
15         a=0.0
16         b=0.0
17         c=0
18         for baris in f.readlines():
19                 i=i+1
20                 element=baris.split('\t')
21                 if len(element)!=0:
22                         if statusAll==0:
23                                 if element[0]==statusGeometry:
24                                         for j in range(1,7):
25                                                 y=float(element[j])
26                                                 dimensi.append(y)
27                                         statusAll=1
28
29                         elif statusAll==1:
30                                 if element[0]==statusCharacteristics:
31                                         print(element[0])
32                                         x=i+1
33                                 elif i==x:
34                                         try:
35                                                 for j in range(0,5):
36                                                         y=float(element[j])
37                                                         characteristics.append(y)
```

```
38                                              statusAll=2
39                                      except:
40                                              x=i+1
41
42                              elif statusAll==2:
43                                      if element[0]==statusIrradiation:
44                                              x=i+1
45                                      elif i==x:
46                                              if element[0]==statusAccident:
47                                                      statusAll=3
48                                              else:
49                                                      temp=[]
50                                                      try:
51                                                              l=float(element[1])
52                                                              c=c+1
53                                                              if l>=0:
54                                                                      temp.append(l*24*3600)
55                                                                      if c==1:
56                                                                              a=l
57                                                                      if c==2:
58                                                                              b=l
59                                                                      m=float(element[2])
60                                                                      temp.append(m)
61                                                                      irradiation.append(temp)
62                                                              x=i+1
63                                                      except:
64                                                              x=i+1
65
66                              elif statusAll==3:
67                                      temp=[]
68                                      try:
69                                              y=float(element[1])*24*3600
70                                              temp.append(y)
71                                              y=float(element[2])
72                                              temp.append(y)
73                                              accident.append(temp)
74                                      except:
75                                              x=i+1
76
77          return dimensi, characteristics, irradiation, accident, b-a
```

Selain itu, untuk meningkatkan ketelitian perhitungan, disiapkan juga modul interpolasi secara linier. Modul ini disiapkan agar sejarah operasi normal dan kecelakaan sehingga dapat diperoleh hasil yang tepat. Penerapan dari modul interpolasi linier tersebut disajikan pada Listing 3.2.

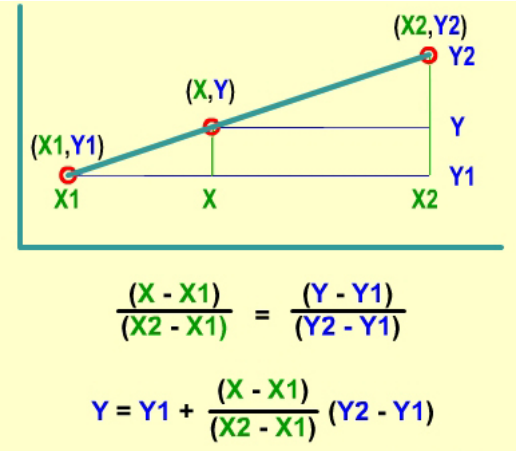
Seperti terlihat pada Lampiran 3.3, sejarah operasi normal atau disebut juga sebagai sejarah irradiasi, terdapat 3 kolom dalam *file input*. Demikian juga untuk sejarah ketika terjadi kecelakaan. Ketiganya adalah nomor urut, hari ke sekian dan temperatur. Dengan melakukan interpolasi, selisih hari yang digunakan dapat diperkecil. Dalam contoh *file input*, selisih pencatatan adalah 17 hari. Dengan interpolasi, kita dapat mengestimasi sejarah dalam selisih waktu yang lebih singkat.

Interpolasi yang diterapkan dapat diilustrasikan dalam Gambar 3.1 [1]. Argumen ketiga dari fungsi `linier (a,b,c)`, c, adalah jumlah partisi diantara nilai x_1 dan x_2. Nilai tersebut adalah *dt* yang merupakan argumen ketika mengeksekusi kode komputer TRIAC (Listing 3.4). Penggunaan fungsi interpolasi ini dilakukan di Listing 3.4 pada baris ke-53 s/d 66.

Listing 3.2: Interpolasi.py

```
1  def linier(a,b,c):
2          x1=a[0]
3          y1=a[1]
4          x2=b[0]
5          y2=b[1]
```

[1] http://jadipaham.com/wp-content/uploads/2015/10/Rumus-interpolasi-linear.jpg



Gambar 3.1: Ilustrasi interpolasi linier yang digunakan

```
6
7           i=[]
8           selisih=(x2-x1)/c
9           x=x1
10
11          for k in range(1,c):
12                  j=[]
13                  x=x+selisih
14                  y=(((x-x1)/(x2-x1))*(y2-y1))+y1
15                  j.append(x)
16                  j.append(y)
17                  i.append(j)
18          return i
```

3.2 TRIAC Core

Terdapat empat fungsi di dalam modul `core.py` seperti terlihat pada Listing 3.3. Fungsi-fungsi yang terdapat dalam modul ini dianggap sebagai fungsi yang sering digunakan dan relatif kompleks jika diletakkan dalam program utama TRIAC. Berikut adalah penjelasannya.

1. `OPF (irradiation,y,tb)` (baris ke-3 s/d 14). Fungsi tersebut membutuhkan tiga argumen, dengan argumen pertama adalah sejarah irradiasi dalam bentuk array. Jika melihat contoh yang disajikan pada Lampiran 3.3, data tersebut terletak setelah baris berisi `INPUT: Irradiation Temp. Hystory`. Array akan berdimensi dua, yaitu setiap elemen array merupan array dengan dua elemen, masing-masing adalah waktu (dalam detik) dan temperatur irradiasi.

   Argumen kedua, *y* adalah rentang waktu pengukuran ketika massa irradiasi. Contoh pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa pengukuran dilakukan setiap 17 hari. Ketika kita ingin rentang pengukuran ini lebih kecil dari 17, maka kita dapat memperolehnya dengan fungsi interpolasi. Waktu interpolasi ini harus dalam satuan detik. Sedangkan argumen ketiga adalah total masa irradiasi, yang dalam contoh Lampiran 1 adalah 1020 hari.

   Fungsi OPF akan menghitung akumulasi nilai *g* untuk setiap perubahan temperatur dan waktu irradiasi seperti dijelaskan pada persamaan (2.3). Akumulasi nilai *g* tersebut adalah nilai OPF seperti dijelaskan pada persamaan (2.1). Itu sebabnya kenapa fungsi ini diberi nama `OPF`.

Kemudian, nilai OPF digunakan untuk menghitung nilai Tb seperti dijelaskan persamaan (2.4). Nilai Tb selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai ds seperti dijelaskan persamaan (2.5) dan diterapkan oleh fungsi `DS` (baris ke-31 s/d 34 Listing 3.3). Akhirnya, nilai τ_i diperoleh dari nilai ds seperti dijelaskan persamaan (2.6). Tetapi, rentetan perhitungan tersebut tidak dilakukan di fungsi `OPF`, melainkan dalam program `triac.py` seperti pada Listing 3.4. Fungsi yang dibuat diusahakan untuk hanya mengerjakan satu fungsi saja.

2. `FTau (tau)` (baris ke-16 s/d 24). Fungsi ini digunakan untuk menghitung nilai f_τ seperti dijelaskan pada persamaan (2.8). Fungsi ini menerapkan nilai 2000 sebagai batas atas iterasi.

3. `OPFAccident (Tb,tb,T)` (baris ke-26 s/d 29). Fungsi ini akan menerima argumen kondisi kecelakaan melalui argumen ketiga T. Sedangkan argumen pertama Tb diperoleh dari fungsi pertama, `OPF`.

Listing 3.3: core.py

```
1  import math
2
3  def OPF(irradiation,y,tb):
4          x=len(irradiation)
5          z=0.0
6          for i in range(x):
7                  j=irradiation[i]
8                  a1=8.3143*j[1]
9                  a=-163000/(a1)
10                 b=math.exp(a)
11                 g=2*(8.32e-11)*b
12                 g1=g*(tb-j[0])*y
13                 z=z+g1
14         return z
15
16 def FTau(tau):
17         looping=0.0
18         for n in range (1,2000):
19                 pangkat=math.pow(n,2)*math.pow(math.pi,2)*tau
20                 A=math.exp(-(pangkat))
21                 B=math.pow(n,4)*math.pow(math.pi,4)
22                 looping=looping+((1-A)/B)
23         ftau=1-((6/tau)*looping)
24         return ftau
25
26 def OPFAccident(Tb,tb,T):
27         logOPF=-10.08-(8500/Tb)+(2*math.log10(tb))-(0.404*((10000/T)-(10000/(Tb+75))))
28         opfa=math.pow(10,logOPF)
29         return opfa
30
31 def DS(T):
32         logDS=-2.3-(8116/T)
33         ds=math.pow(10,logDS)
34         return ds
```

3.3 Perhitungan TRIAC

Bagian ini adalah inti dari perhitungan TRIAC yang alur eksekusinya diilustrasikan pada Gambar 2.1. Program ini akan menerima dua argumen selain nama programnya sendiri, yaitu nama *file input* (baris ke-8) serta jumlah interpolasi yang diinginkan (baris ke-9) dalam rentang pengukuran yang sudah ada. Tetapi, jika pengguna tidak memberikan argumen tersebut, program akan dieksekusi dengan *file input* dan jumlah interpolasi yang telah ditetapkan (baris ke-11 dan 12).

Proses selanjutnya adalah membaca informasi dari *file input*. Ada lima informasi yang harus diperoleh dari *file input*, masing-masing adalah informasi geometri, karakteristik material, sejarah irradiasi dan kecelakaan serta rentang pengukuran temperatur saat irradiasi. Setelah data-data tersebut diperoleh, langkah selanjutnya adalah perhitungan geometri partikel triso. Proses ini dilakukan dalam baris ke-23 s/d 37.

Langkah selanjutnya setelah perhitungan geometri adalah interpolasi. Tetapi, karena opsi tanpa interpolasipun harus diakomodasi, maka ada kondisi yang harus dipenuhi seperi pada baris ke-44 dan baris ke-96. Jika nilai $dt > 1$, maka interpolasi harus dilakukan.

Listing 3.4: triac.py

```
1  import math,sys
2  from InputData import readdata
3  from Interpolasi import linier
4  from core import *
5
6  if __name__=="__main__":
7          if len(sys.argv)==3:
8                  f=sys.argv[1]
9                  dt=int(sys.argv[2])
10         else:
11                 f="example.pan.in"
12                 dt=1
13
14         x=readdata(f)
15         dimensi=x[0]
16         characteristics=x[1]
17         irradiation=x[2]
18         accident=x[3]
19         rentang=x[4]
20
21         lenIR=len(irradiation)
22         tb=irradiation[lenIR-1][0]
23         VolRef1=(4/3)*math.pi*dimensi[0]*dimensi[0]*dimensi[0]
24         VolRef2=(4/3)*math.pi*dimensi[1]*dimensi[1]*dimensi[1]
25         VolOPyC=VolRef1-VolRef2
26
27         """Volume SiC"""
28         VolRef3=(4/3)*math.pi*dimensi[2]*dimensi[2]*dimensi[2]
29         VolSiC=VolRef2-VolRef3
30
31         """Volume IPyC"""
32         VolRef4=(4/3)*math.pi*dimensi[3]*dimensi[3]*dimensi[3]
33         VolIPyC=VolRef3-VolRef4
34
35         """Volume Buffer & Volume Kernel"""
36         VolKernel=(4/3)*math.pi*dimensi[4]*dimensi[4]*dimensi[4]
37         VolBuff=VolRef4-VolKernel
38         print("Volume OPyC:",VolOPyC)
39         print("Volume SiC:",VolSiC)
40         print("Volume IPyC:",VolIPyC)
41         print("Volume Buffer:",VolBuff)
42         print("Volume Kernel:",VolKernel)
43
44         if dt>1:
45                 irradiation2=[]
46                 accident2=[]
47                 lenAcc=len(accident)
48
49                 fi=file('irradiasi2','w')
50                 irradiation2.append(irradiation[0])
51                 b=0
52                 fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[0])+'\n')
53                 b=b+1
54                 for x in range(1,lenIR):
55                         temp=[]
56
57                         i=irradiation[x-1][1]
58                         j=irradiation[x][1]
```

```
59                          if i!=j:
60                                  temp=linier(irradiation[x-1],irradiation[x],dt)
61                                  for y in range(len(temp)):
62                                          irradiation2.append(temp[y])
63                                          fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[b])+'\n')
64                                          b=b+1
65                          irradiation2.append(irradiation[x])
66                          fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[b])+'\n')
67                          b=b+1
68
69                          if x==lenIR-1:
70                                  print('irradiasi terakhir',irradiation[x])
71                  fi.close()
72                  y=(float(rentang)/dt)*24*3600
73                  opf=OPF(irradiation2,y,tb)
74
75                  fi=file('accident2','w')
76                  b=0
77                  fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[0])+'\n')
78                  b=b+1
79                  accident2.append(accident[0])
80                  for x in range(1,lenAcc):
81                          temp=[]
82
83                          i=accident[x-1][1]
84                          j=accident[x][1]
85                          if i!=j:
86                                  temp=linier(accident[x-1],accident[x],dt)
87                                  for y in range(len(temp)):
88                                          accident2.append(temp[y])
89                                          fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[b])+'\n')
90                                          b=b+1
91                          accident2.append(accident[x])
92                          fi.write(str(b)+', '+str(irradiation2[b])+'\n')
93                          b=b+1
94
95
96          else:
97                  y=rentang*24*3600
98                  opf=OPF(irradiation,y,tb)
99
100         Tb=0.85e4/((2*math.log10(tb))-(math.log10(opf))-10.08)
101         dsi=DS(Tb)
102         tauI=dsi*tb
103
104         Vk=VolKernel
105         Vf=0.5*VolBuff
106         Ff=0.31
107         R=8.3143
108         Vm=2.43796e-5
109         Fb=0.08
110
111         a=(0.5*(pow(dimensi[1],3)+pow(dimensi[2],3)))
112         r=pow(a,(1.0/3))
113         do=dimensi[1]-dimensi[2]
114         sigma0=756e6
115         m=6.93
116         print('ln(2)='+str(math.log(2)))
117         pressure=[]
118         SigmaT=[]
119         phi1=0
120
121         for i in range(len(accident)):
122                 dsa=DS(accident[i][1])
123                 tauA=dsa*accident[i][0]
124                 if accident[i][0]==0:
125                         Fd=FTau(tauI)
126                 else:
127                         Fd=(((tauI+tauA)*FTau(tauI+tauA))-(tauA*FTau(tauA)))/tauI
128
```

```
129                 opfa=OPFAccident(Tb,tb,accident[i][1])
130                 n=((Fd*Ff)+opfa)*Fb*(Vk/Vm)
131                 p=n*R*accident[i][1]/Vf
132                 pressure.append(p)
133
134                 vdot=(5.87e-7)*math.exp(-179500/(8.3143*accident[i][1]))
135                 a=(1+((vdot*accident[i][0])/do))
136                 sigmaT=((r*p)/(2*do))*a
137                 SigmaT.append(sigmaT)
138
139                 a1=sigmaT/sigma0
140                 a=pow(a1,m)
141                 b=math.exp(-math.log(2)*a)
142                 phi=1-b
143                 phi1=phi1+phi
```

Daftar Referensi

[1] J. Wang, "An integrated performance model for high temperature gas cooled reactor coated particle fuel," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[2] "Reaktor daya eksperimental (rde)," http://www.batan.go.id/index.php/id/reaktor-daya-eksperimental-rde, diakses: 17-07-2017.

[3] K. Verfondern, J. Cao, T. Liu, and H.-J. Allelein, "Conclusions from v&v studies on the german codes panama and fresco for htgr fuel performance and fission product release," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 271, pp. 84 – 91, 2014, sI : HTR 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549313005992

[4] K. Verfondern and H. Nabielek, "The mathematical basis of the panama-i code for modelling pressure vessel failure of triso coated particles under accident conditions," Julich Research Center, Germany, Tech. Rep., 1990.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Contoh file input

TRIAC-BATAN
TRISO Analysis Code of BATAN
"Developed by Computational Laboratory, Center for Nuclear Reactor Technology and Safety, BATAN"

Case Title: (describe your problem case here)

TRISO Geometry:
Outer radius CFP SiC IPyC buffer kernel center

[m] 4.60E-04 4.20E-04 3.85E-04 3.45E-04 2.50E-04 0
Properties and Operation Parameters:

SiC Tensile Strength [Pa] Weibull Modulus Burnup [FIMA] "Fission Yield of stable fission gasses, Ff" Fast Neutron Fluence Weight ratio of th to U-235 in kernel

8.34E+08 8.02 0.09 0.31 2.4
Properties and Operation Parameters related with thermal decomposition:

Alpha Beta
0.0001 4
-1 1401.6 0.1 10
INPUT: Irradiation Temp. Hystory

1	0	593
2	17	833
3	34	1023
4	51	1093
5	68	1123
6	85	593
7	102	833
8	119	1023
9	136	1093
10	153	1123
11	170	593
12	187	833
13	204	1023
14	221	1093
15	238	1123
16	255	593
17	272	833
18	289	1023
19	306	1093
20	323	1123
21	340	593
22	357	833
23	374	1023
24	391	1093
25	408	1123
26	425	593
27	442	833
28	459	1023
29	476	1093
30	493	1123
31	510	593
32	527	833
33	544	1023
34	561	1093
35	578	1123
36	595	593
37	612	833

```
38    629   1023
39    646   1093
40    663   1123
41    680   593
42    697   833
43    714   1023
44    731   1093
45    748   1123
46    765   593
47    782   833
48    799   1023
49    816   1093
50    833   1123
51    850   593
52    867   833
53    884   1023
54    901   1093
55    918   1123
56    935   593
57    952   833
58    969   1023
59    986   1093
60    1003  1123
61  1020    593

      0
      -1    180   1
INPUT: Accident Temp. Hystory

1     0     1033
2     0.0271      1033
3     0.2208      1068
4     1     1160
5     10    1571
6     20    1728
7     30    1752
8     35    1749
9     60    1690
10    90    1605
11    120   1526
12    180   1395

      0
```