



---

# **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

<b>Daftar Gambar</b>	<b>ii</b>
<b>Daftar Program</b>	<b>iii</b>
<b>1 Pendahuluan</b>	<b>2</b>
<b>2 Alur Perhitungan</b>	<b>4</b>
2.1 Pendahuluan . . . . .	4
2.2 Membaca <i>file input</i> . . . . .	8
2.3 Menghitung OPF saat irradiasi . . . . .	9
2.4 Menghitung DS saat kecelakaan . . . . .	9
2.5 Menghitung tekanan . . . . .	10
2.6 Fraksi gagal bahan bakar . . . . .	11
2.6.1 Fraksi gagal akibat berkurangnya <i>tensile strength</i> . . . . .	11
2.6.2 Fraksi gagal bahan bakar akibat <i>weight loss</i> . . . . .	12
<b>LAMPIRAN</b>	<b>1</b>
<b>Lampiran 1</b>	<b>2</b>

# Daftar Gambar

1.1	Ilustrasi bentuk bahan bakar <i>pebble</i> . . . . .	2
1.2	Komposisi elemen pelapis partikel . . . . .	3
2.1	Diagram alir perhitungan TRAIC . . . . .	4

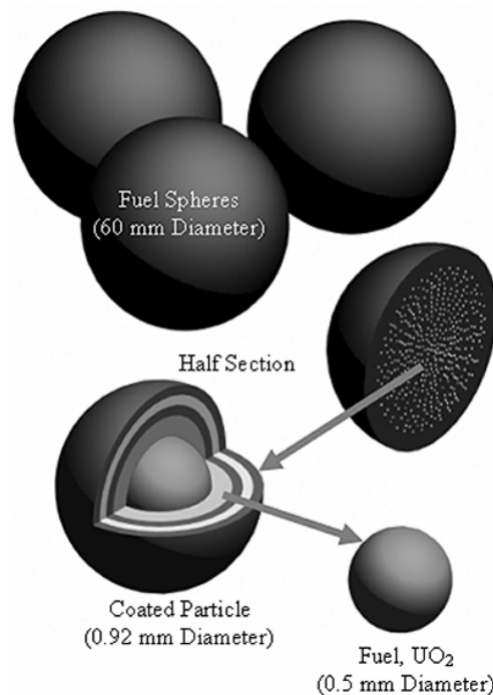
# Daftar Program

2.1	triac.py . . . . .	5
-----	--------------------	---

# 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.

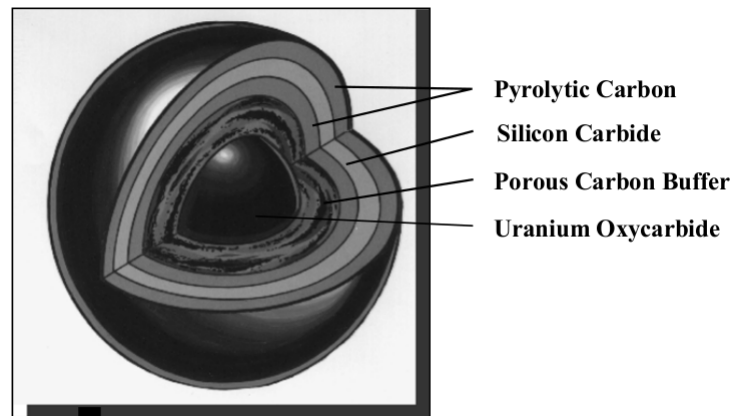


Gambar 1.1: Ilustrasi bentuk bahan bakar *pebble* [1]

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*).



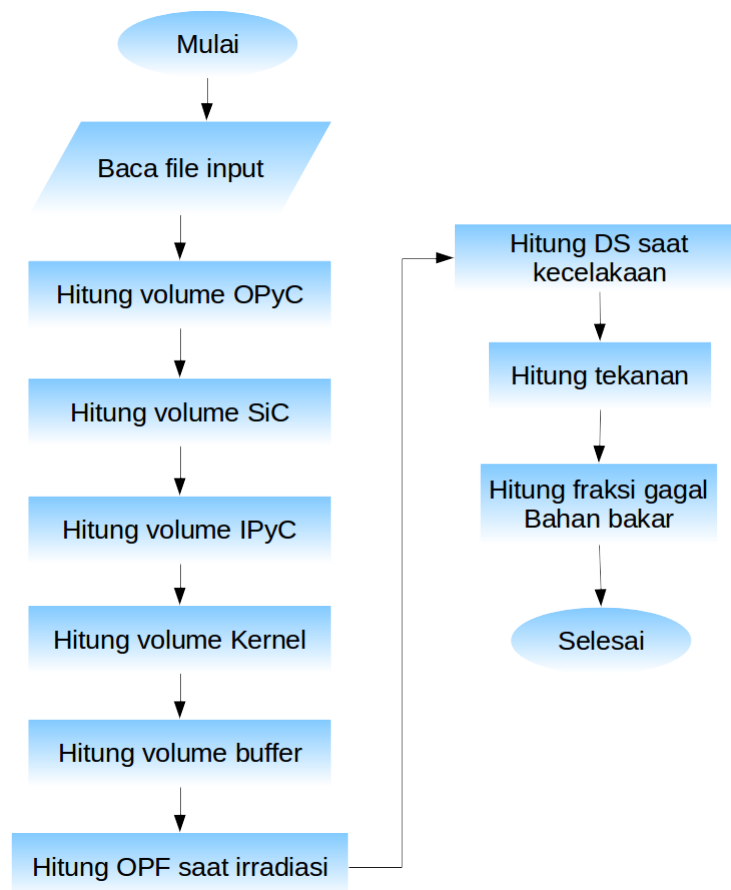
Gambar 1.2: Komposisi elemen pelapis partikel [1]

## 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 2.1 yang dibangun sepenuhnya berbasis pengetahuan yang diperoleh dari dokumen laporan teknis [4].



Gambar 2.1: Diagram alir perhitungan TRIAC

Listing 2.1: triac.py

```

1  import math, sys
2
3  def readdata(namafile):
4      f=open(namafile, "r")
5      statusGeometry=" [m]"
6      statusCharacteristics="SiC Tensile Strength [Pa]"
7      statusIrradiation="INPUT: Irradiation Temp. Hystory"
8      statusAccident="INPUT: Accident Temp. Hystory"
9      statusAll=0
10     dimensi=[]
11     characteristics=[]
12     irradiation=[]
13     accident=[]
14     i=0
15     x=0
16     for baris in f.readlines():
17         i=i+1
18         element=baris.split('\t')
19         if statusAll==0:
20             if element[0]==statusGeometry:
21                 for j in range(1,6):
22                     y=float(element[j])
23                     dimensi.append(y)
24                     statusAll=1
25
26             elif statusAll==1:
27                 if element[0]==statusCharacteristics:
28                     x=i+1
29                 elif i==x:
30                     try:
31                         for j in range(0,5):
32                             y=float(element[j])
33                             characteristics.append(y)
34                             statusAll=2
35                     except:
36                         x=i+1
37
38             elif statusAll==2:
39                 if element[0]==statusIrradiation:
40                     x=i+1
41                 elif element[0]==statusAccident:
42                     statusAll=3
43             else:
44                 temp=[]
45                 try:
46                     y=int(element[0])
47                     temp.append(y)
48                     y=float(element[1])
49                     temp.append(y)
50                     y=int(element[2])
51                     temp.append(y)
52                     irradiation.append(temp)
53                 except:
54                     x=i+1
55
56             elif statusAll==3:
57                 temp=[]
58                 try:
59                     y=int(element[0])
60                     temp.append(y)
61                     y=float(element[1])
62                     temp.append(y)
63                     y=int(element[2])
64                     temp.append(y)
65                     accident.append(temp)
66                 except:
67                     x=i+1
68
69     return dimensi, characteristics, irradiation, accident

```



```

70
71
72 def OPF(irradiation , dt):
73     x=len(irradiation)
74     print(" Irradiation length:",x)
75     y=dt*24*3600
76     tb=1020*24*3600
77     z=0.0
78     for i in range(x):
79         j=irradiation[i]
80         g=2*(8.32e-11)*(math.exp(-163000/(8.3143*j[2])))*(tb-(j[1]*24*3600))*y
81         z=z+g
82
83     Tb=0.85e4/((2*math.log10(tb))-(math.log10(z))-10.08)
84     logDS=-2.3-(8116/Tb)
85     ds=math.pow(10,logDS)
86     tauI=ds*tb
87     return z,Tb,ds,tauI
88
89 def FD(tauA , tauI):
90     print(' tauA=',tauA)
91     print(' tauI=',tauI)
92     summasi=tauA+tauI
93     looping=0.0
94     loopingPlus=0.0
95     loopingI=0.0
96     for n in range(1,2000):
97         pangkat=math.pow(n,2)*math.pow(math.pi,2)*tauA
98         A=math.exp(-(pangkat))
99         B=math.pow(n,4)*math.pow(math.pi,4)
100        looping=looping+((1-(A)/(B)))
101
102        pangkatI=math.pow(n,2)*math.pow(math.pi,2)*tauI
103        AI=math.exp(-(pangkatI))
104        loopingI=loopingI*((1-(AI)/(B)))
105        if tauA==0:
106            """ print(n, pangkatI, AI, B, AI/B, loopingI) """
107        loopingPlus=loopingPlus+(1-(math.exp(-(math.pow(n,2)*math.pow(math.pi,2)*summasi)))/(
108
109        if tauA==0:
110            FTau=1-((6/tauI)*loopingI)
111            print(' tauI=',tauI)
112            print(' loopingI=',loopingI)
113            print(' ftauI=',FTau)
114            Fd=FTau
115        else:
116            FTau=1-((6/tauA)*looping)
117            FTauPlus=1-((6/summasi)*loopingPlus)
118            Fd=((summasi*FTauPlus)-(tauA*FTau))/tauI
119        return Fd
120
121 def OPFAccident(Tb,T):
122     tb=1020*24*3600
123     logOPF=-10.08-(8500/Tb)+(2*math.log10(tb))-(0.404*((10000/T)-(10000/(Tb+75))))
124     return math.pow(10,logOPF)
125
126 def Pressure(Tb,dsAccident,Vk,Vf,accident):
127     Ff=0.31
128     R=8.3143
129     Vm=2.43796e-5
130     Fb=0.08
131     p=[]
132     for i in range(len(accident)):
133         x=accident[i]
134         y=dsAccident[i]
135         p.append((y[2]*Ff*OPFAccident(Tb,x[2]*Fb)/((Vf/Vk)*R*x[2]/Vm))
136     return p
137
138 def DS(accident , tauI):
139     x=len(accident)

```

```

140     ds=[]
141     for i in range(x):
142         j=accident[i]
143         logDS=-2.3-(8116/j[2])
144         k=[]
145         l=math.pow(10,logDS)
146         k.append(1)
147         tauA=1*j[1]*24*3600
148         k.append(tauA)
149         Fd=FD(tauA,tauI)
150         k.append(Fd)
151         ds.append(k)
152     return ds
153
154 if __name__=="__main__":
155     if len(sys.argv)==3:
156         f=sys.argv[1]
157         dt=int(sys.argv[2])
158     else:
159         f="example.pan.in"
160         dt=17
161
162     x=readdata(f)
163     dimensi=x[0]
164     characteristics=x[1]
165     irradiation=x[2]
166     accident=x[3]
167     """print("Dimensi:",dimensi)
168     print("Karakteristik:",characteristics)
169     print("Irradiasi:",irradiation)
170     print("Accident:",accident)"""
171     """Volume Outer Pyrolitic Carbon"""
172     VolRef1=(4/3)*math.pi*dimensi[0]*dimensi[0]*dimensi[0]
173     VolRef2=(4/3)*math.pi*dimensi[1]*dimensi[1]*dimensi[1]
174     VolOPyC=VolRef1-VolRef2
175
176     """Volume SiC"""
177     VolRef3=(4/3)*math.pi*dimensi[2]*dimensi[2]*dimensi[2]
178     VolSiC=VolRef2-VolRef3
179
180     """Volume IPyC"""
181     VolRef4=(4/3)*math.pi*dimensi[3]*dimensi[3]*dimensi[3]
182     VolIPyC=VolRef3-VolRef4
183
184     """Volume Buffer & Volume Kernel"""
185     VolKernel=(4/3)*math.pi*dimensi[4]*dimensi[4]*dimensi[4]
186     VolBuff=VolRef4-VolKernel
187     print("Volume OPyC:",VolOPyC)
188     print("Volume SiC:",VolSiC)
189     print("Volume IPyC:",VolIPyC)
190     print("Volume Buffer:",VolBuff)
191     print("Volume Kernel:",VolKernel)
192     TB=OPF(irradiation,dt)
193     z=Tb[0]
194     Tb=Tb[1]
195     ds=Tb[2]
196     tauI=Tb[3]
197     print("OPF=",z,"Tb=",Tb,"DS=",ds,"TauI=",tauI)
198     dsAccident=DS(accident,tauI)
199     for i in range(len(dsAccident)):
200         x=dsAccident[i]
201         print(x[0],x[1],x[2])
202
203     p=Pressure(Tb,dsAccident,VolKernel,VolBuff/2,accident)
204     print(p)

```

## 2.2 Membaca *file input*

Sub rutin ini ditujukan untuk membaca file input dengan format seperti terdapat pada Lampiran 1. 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 baris ke-3 s/d baris ke-69 dalam Listing 2.1

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

1. Data tentang geometri *pebble*. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusGeometry` (baris ke-5 pada Listing 2.1). Di dalam data geometri, terdapat empat data berbeda, masing-masing secara berurutan adalah panjang jejari *pebble* terluar, OPyC (*Outer Pyrolytic Carbon*), SiC (*Silicon Carbide*), IPyC (*Inner Pyrolytic 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-10 dalam Listing 2.1).
2. Data tentang kekuatan SiC. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusCharacteristics` (baris ke-6 pada Listing 2.1). 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-11 dalam Listing 2.1).
3. Data tentang sejarah iradiasi. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusIrradiation` (baris ke-7 pada Listing 2.1). 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 iradiasi disimpan dalam variabel yang diberi nama `irradiation` dalam bentuk `list`. Setiap elemen adalah `list` yang secara *nested* terdiri dari tiga elemen yang mewakili data tiap kolom pada setiap akuisisi (baris ke-12 pada Listing 2.1). Ilustrasinya adalah seperti `[[1,0,593],[2,17,833],...]`
4. Data tentang sejarah kecelakaan yang dalam hal ini adalah kondisi di mana temperatur bahan bakar lebih besar daripada 2000°C. Data ini diidentifikasi menggunakan teks yang didefinisikan oleh variabel `statusAccident` (baris ke-8 pada Listing 2.1). Data ini memiliki pola yang sama dengan data sejarah iradiasi. Data sejarah kecelakaan disimpan dengan cara yang sama seperti data tentang sejarah iradiasi tetapi dengan nama `accident` (baris ke-13 pada Listing 2.1). Ilustrasinya adalah seperti `[[1,0,1033],[2,0.0271,1033],...]`

## 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 terbentuknya 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  $\Delta_i$  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  $\Delta_i$  adalah 17 hari atau  $17 \times 24 \times 3600$  detik.  $t_B$  adalah waktu irradiasi total bahan bakar, sedangkan  $\bar{t}_i$  waktu irradiasi ketika pencatatan dilakukan.

$$OPF \simeq \sum_{i=1}^n g(\bar{t}_i) \cdot (t_B - \bar{t}_i) \cdot \Delta t_i \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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

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).

$$\log DS = -2.30 - \frac{0.8116 \cdot 10^4}{T_B} \quad (2.5)$$

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

$$\tau_i = DS(T_B) \cdot t_B \quad (2.6)$$

## 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  $\tau_i$  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  $\tau_A$  dengan persamaan

(2.6) tetapi dengan nilai temperatur dan waktu setelah terjadi kecelakaan. Selanjutnya, dengan modal nilai  $\tau_i$  dan  $\tau_A$  kita akan menghitung nilai  $Fd$ , yang merupakan faktor fisi gas Xe dan Kr (yang dominan). Nilai  $Fd$  dihitung dengan persamaan (2.7).

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

Sedangkan nilai  $f(\tau)$  dihitung menggunakan persamaan (2.8). Batas atas nilai  $n$  pada persamaan (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.

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

Di level implementasi, perhitungan  $DS$  saat kecelakaan didistribusi ke dalam beberapa fungsi seperti terlihat pada Listing 2.1. Masing-masing fungsi tersebut adalah  $DS(\text{accident}, \text{tauI})$  dan  $FD(\text{tauA}, \text{tauI})$ .

## 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).

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

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 partikel 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.

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

## 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 ( $\phi_0$ ). Dalam analisis ini, nilai  $\phi_0$  diasumsikan sama dengan 0.
2. Berkurangnya *tensile strength* lapisan SiC ( $\phi_1$ ). 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 ( $\phi_2$ ).

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

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

### 2.6.1 Fraksi gagal akibat berkurangnya *tensile strength*

Nilai ini diperoleh dengan persamaan (2.12).

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

dengan :

$\sigma_o$ =*tensile strength* dari SiC [Pa] pada akhir irradiasi

$\sigma_t$ =tekanan yang dialami SiC [Pa] akibat tekanan gas internal

Variabel tekanan internal pada SiC ( $\sigma_t$ ) 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  $d_o$ .

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

dengan :

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

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

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

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

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

*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.

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

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 iradiasi, lapisan SiC juga dapat terkorosi karena *grain Boundary*. Jika korosi akibat iradiasi tergantung pada sejarah iradiasi 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).

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

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

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

## 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).

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

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  $\zeta$  yang nilainya mengikuti persamaan (2.21).

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

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).

$$\zeta(t_2) = \zeta(t_1) + k(T_m) \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.22)$$

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

Selanjutnya, fraksi gagal  $\phi_2$  sedemikian rupa sehingga nilainya  $\leq 1$ . Karena itu, variabel  $\phi_2$  selanjutnya didefinisikan sebagai persamaan (2.23).

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

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



# 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**

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

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

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