

## PENGARUH BURNUP DAN DAYA TERHADAP PELEPASAN GAS FISI DARI ELEMEN BAKAR REAKTOR DAYA JENIS PWR BERDASARKAN PERHITUNGAN DENGAN KODE FEMAXI-IV

Edy Sulistyono  
Pusat Elemen Bakar Nuklir

### ABSTRAK

Telah dilakukan analisis terhadap pengaruh perubahan burnup terhadap pelepasan gas fisi serta dibandingkan antara pelepasan gas fisi dengan variasi daya memakai program komputer FEMAXI-IV untuk elemen bakar jenis PWR pada kondisi *steady-state*. Hasil analisis menunjukkan bahwa pelepasan gas fisi sangat dipengaruhi oleh temperatur bahan bakar, *burnup* maupun daya pada suatu elemen bakar yang diiradiasi.

### ABSTRACT

*Burn up dependence of fission gas released and variation power analysis have been conducted using FEMAXI-IV computer code program for Pressure Water Reactor Fuel during steady-state condition. The analysis result shows that the fission gas release is sensitive to the fuel temperature, the increasing of burn up and power in the fuel element under irradiation experiment.*

### PENDAHULUAN

Pelepasan gas hasil fisi dari suatu elemen bakar dapat disebabkan antara lain oleh naiknya temperatur bahan bakar. Selain itu tekanan internal dari elemen bakar juga sangat dipengaruhi kondisi operasi selama berada pada kondisi *steady-state* atau *transient*. Untuk meramalkan kecepatan produksi gas fisi selama proses iradiasi dapat dianalisis unjuk kerja elemen bakar dengan menggunakan program komputer yang sering disebut *fuel rod performance codes*.

Salah satu model program komputer untuk meramalkan produk gas fisi suatu elemen bakar dapat menggunakan kode komputer FEMAXI-IV<sup>1</sup>, karena model program ini berdasarkan model hasil pengembangan dari model yang ditemukan oleh White dan Tucker<sup>2</sup>, Hargreaves dan Collins<sup>3</sup> dan K.Ito, R. Iwasaki<sup>4</sup>.

Model dari program ini beranggapan bahwa bahan bakar adalah  $UO_2$  dan merupakan kumpulan dari butir-butir berbentuk bulat. Mekanisme terbentuknya gas fisi yang dihasilkan berdasarkan atas difusi atom gas, efek *trapping* pada intragranular gelembung, efek *sweeping*, resolusi dari atom gas, dan produk atom gas dari eksese kapasitas jenuh dalam bahan bakar. Ukuran dan densitas dari gelembung intra-granular dikontrol oleh temperatur bahan bakar. Gelembung intragranular diasumsikan tidak bergerak didalam model. Kumpulan atom gas yang dihasilkan berakumulasi menjadi gelembung-gelembung.

Tulisan ini menguraikan garis besar sistem kode komputer yang dipakai dan pengaruh *burnup* serta daya pada elemen bakar reaktor daya jenis PWR berdasarkan perhitungan dengan menggunakan kode komputer FEMAXI-IV.

### METODOLOGI

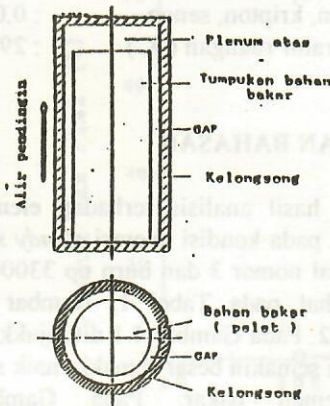
#### Garis Besar Sistem Kode FEMAXI-IV

Program FEMAXI-IV<sup>5</sup>, adalah program komputer yang disusun dengan bahasa FORTRAN-IV yang mampu meramalkan unjuk kerja elemen bakar jenis LWR, baik dari unjuk kerja termal maupun mekanik pada kondisi *steady-state* atau kondisi *transient*. Sistem analisis temperatur dihitung berdasarkan pada bentuk geometri satu dimensi silinder utuh dan distribusi radial dari temperatur berdasarkan perbedaan letak per bagian dari bahan bakar (*finite difference method*), sedangkan bentuk aksial dari temperatur dihitung berdasarkan pada simpul tegak (*axial nodes*).

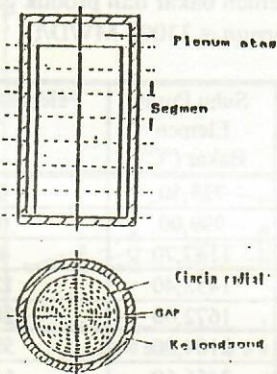
#### Model Analisis Pelepasan Gas Fisi

Model analisis produk gas fisi yang dipakai dalam FEMAXI-IV adalah model phisik yang telah disederhanakan dari model yang dibuat oleh White dan Tucker<sup>2</sup> dan Hargreaves and collins<sup>3</sup>. Model diasumsikan bahwa bahan bakar merupakan kumpulan dari butiran-butiran bentuk bulat dari  $UO_2$ . Gas fisi yang dihasilkan dalam butiran merupakan hasil dari pergeseran dari butir-butir yang terakumulasi menjadi bentuk

gelembung, mekanisme pergeseran bisa disebabkan oleh difusi atom atau bertambah luas (*sweeping*) oleh pertumbuhan gelembung yang suatu ketika akan mencapai titik jenuh, sehingga antar gelembung bisa terjadi penggabungan, membentuk ikatan seperti rantai dan kemudian membuat alur seperti terowongan (*tunnel*) sehingga lepas keluar. Ukuran dan densitas butir/gelembung dikontrol oleh temperatur elemen bakar. Gelembung intragranular dianggap tidak bergerak di dalam model. Dalam kode komputer ini, kecepatan generasi dan terbentuknya produk gas fisi dihitung berdasarkan pada bentuk geometri satu dimensi silinder utuh (*pin*) dibagi atas bentuk arah aksial maks 12 segmen dan setiap segmen dibagi atas maks. 10 bagian ke arah distribusi radial dan mengikuti beberapa asumsi dan persamaan sebagai berikut :



Gambar 1. Bentuk geometri elemen bakar



Gambar 2. Bentuk Geometri untuk Termal dan mekanik

### Kecepatan Generasi

Kecepatan generasi pada segmen j ke arah aksial dan radius i ke arah radial mengikuti persamaan :

$$P^{ij} = \frac{Y \cdot f^{ij} \cdot q^j}{E_f \cdot N_A}$$

Dimana  $P^{ij}$  = kecepatan generasi produk gas fisi dalam radius ij (mol/cm<sup>3</sup> sec);  $f^{ij}$  = fungsi distribusi density dari heat generasi dalam arah radial;  $q^j$  = density panas generasi rata-rata dari arah aksial segmen j (W/cm);  $E_f$  = energi yang dihasilkan per 1 fisi = 2,884 x 10<sup>-11</sup> joule (180 MeV);  $N_A$  = avogadro number = 6.02 x 10<sup>23</sup>.

Komposisi gas dihitung berdasarkan

$$X_{He} = \frac{n_o \cdot X_{o,He}}{n_t}$$

$$X_{Kr} = \frac{(n_o \cdot X_{o,Kr} + 0,13 n_r)}{n_t}$$

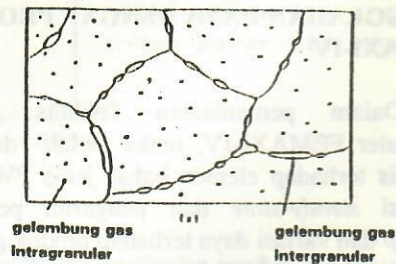
$$X_{Xe} = \frac{(n_o \cdot X_{o,Xe} + 0,87 n_r)}{n_t}$$

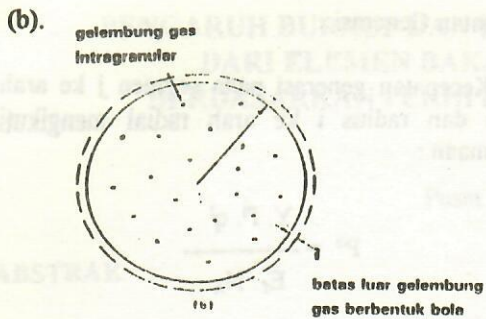
Dimana  $X_{He}$  = mol fraksi helium;  $X_{Kr}$  = mol fraksi Krypton;  $X_{Xe}$  = mol fraksi Xenon,  $n_o$  = mol gas awal dalam rod bahan bakar;  $n_r$  = mol gas hasil produk gas fisi;  $n_t$  = mol gas total;  $X_{o...}$  = mol fraksi awal.

### Difusi Secara trapping

Mekanisme pergeseran butiran atau gelembung ditunjukkan pada gambar 3.a. dan secara ideal model gelembung dianggap berbentuk bola ditunjukkan pada gambar 3.b, dan diasumsikan bahwa bentuk dinding penyekat dalam keadaan setimbang.

(a)





Gambar 3. (a) : Mekanisme terbentuknya gas.  
(b) : Bentuk ideal gelembung sebagai model  
Persamaan difusi adalah sebagai berikut :

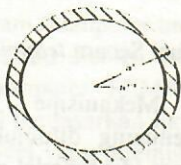
$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dC}{dr} - gc + b'm + B$$

dengan C = konsentrasi gas atom/satuan volume (atom/cm<sup>3</sup>), D = koefisien difusi (cm<sup>2</sup>/det), g = probability dari gas atom oleh gelembung intragranular (det<sup>-1</sup>), b = probability dari gas atom yang larut kembali dalam padatan (det<sup>-1</sup>), m = nomor atom gas per satuan volume (atom/cm<sup>3</sup>), B = kecepatan produksi gas per satuan volume (atom/cm<sup>3</sup>/det).

Bertambah Luas (*Sweeping*) Oleh Pertumbuhan Gelembung

Probabilitas dari pertambahan luas permukaan gelembung gas karena pertumbuhan gas dapat dihitung berdasarkan persamaan :

$$fg = 1 - \frac{a^{i-1}}{a^i}$$



dimana :

a<sup>i</sup> = jari-jari gelembung setelah pertumbuhan gelembung.

a<sup>i-1</sup> = jari-jari gelembung sebelum pertumbuhan gelembung.

#### PENGOLAHAN DATA DENGAN PROGRAM FEMAXI-IV

Dalam pemanfaatan fasilitas program komputer FEMAXI-IV, maka telah dilakukan analisis terhadap elemen bakar jenis PWR pada kondisi *steady-state* dan pengaruh perubahan *burnup* dan variasi daya terhadap produk gas fisi. Spesifikasi input data elemen bakar jenis PWR

- a. Spesifikasi pelet
- Bahan bakar : UO<sub>2</sub>.
  - Diameter dalam (cm) : 0.0
  - Diameter luar (cm) : 0.819
  - Bentuk : non dished pellets  
non chamfered pellets
  - Perkayaan U<sup>235</sup> : 0.083
  - Panjang pelet (cm) : 1.344
  - Panjang (node) aksial (cm) : 80.0
  - Berat pelet total (g) : 2197.772
  - Ukuran butir (micron) : 5.0

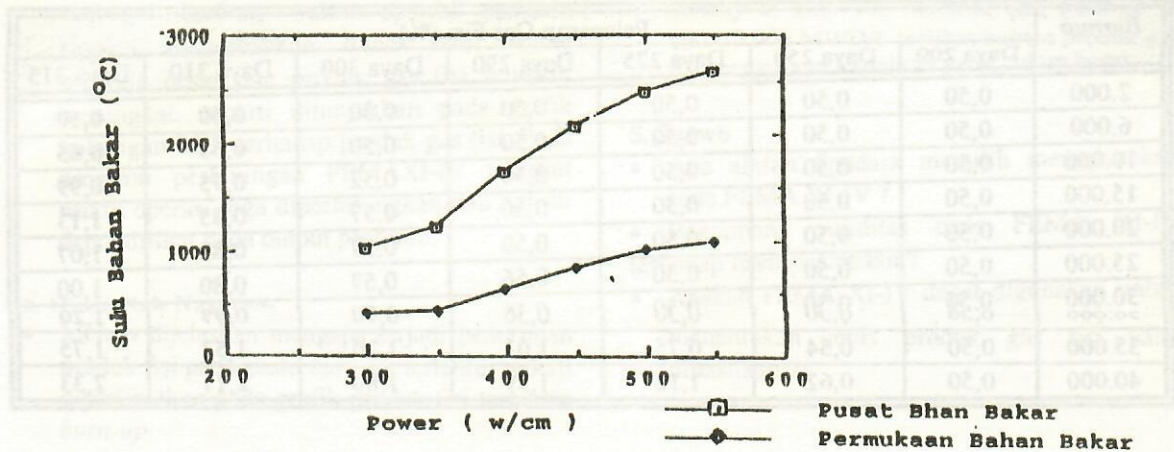
- b. Lain-lain
- Bahan kelongsong : zircaloy
  - Diameter dalam kelongsong (cm) : 0.836
  - Diameter luar kelongsong (cm) : 0.951
  - Volum plenum atas (cm<sup>3</sup>) : 38.380
  - Volum plenum bawah (cm<sup>3</sup>) : 0.0
  - Komposisi awal gas (%) helium : 100.0
  - nitrogen, kripton, xenon : 0.0
  - Temperatur ruangan ( K ) : 291.15

#### HASIL DAN BAHASAN

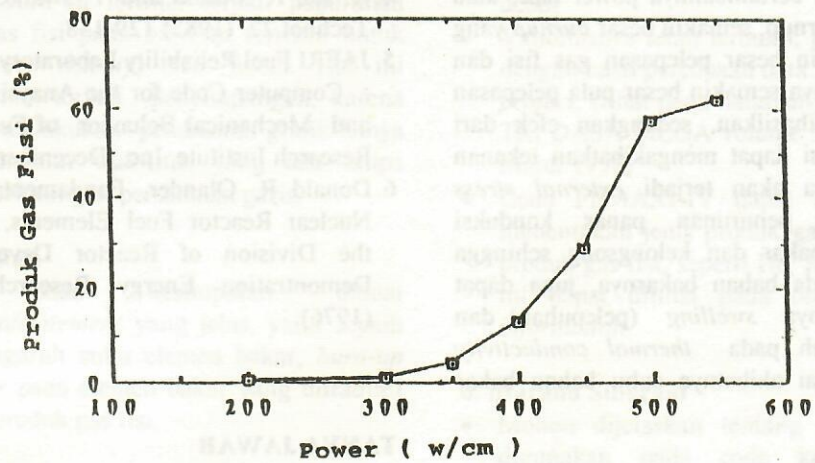
Data hasil analisis terhadap elemen bakar jenis PWR pada kondisi operasi *steady state* pada posisi aksial nomor 3 dan burn up 33000 MWD/t dapat dilihat pada Tabel 1, Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Pada Gambar 4.1 ditunjukkan bahwa untuk daya semakin besar semakin naik suhu pada pusat elemen bakar. Pada Gambar 4.2. ditunjukkan bahwa semakin besar power yang diberikan semakin besar pula produk gas fisi. Hal ini disebabkan oleh naiknya suhu pada elemen bakar sehingga produksi gas fisi semakin banyak.

Tabel 1 : Pengaruh daya terhadap distribusi suhu pada pusat elemen bakar dan produk gas fisi.  
(*burnup* = 33000 MWD/t).

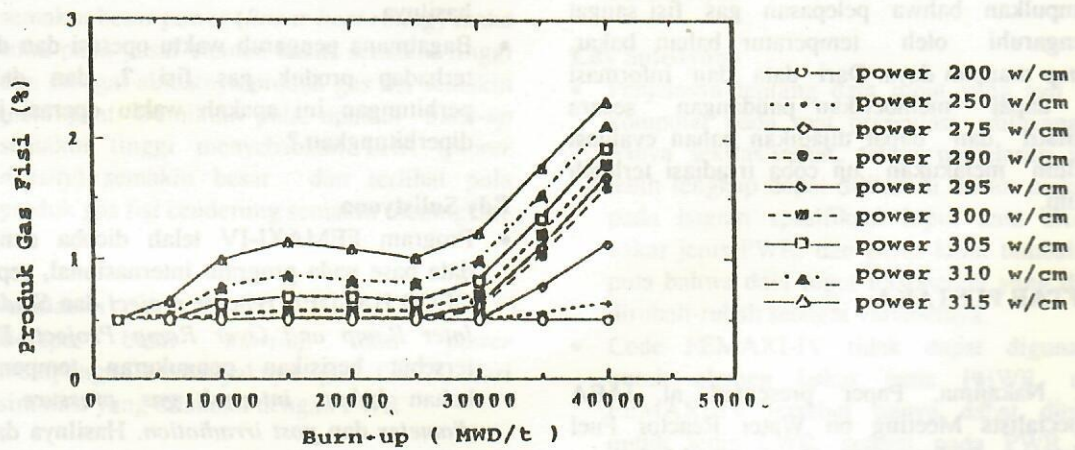
Daya (w/cm)	Suhu Pusat Elemen Bakar (°C)	Pelepasan Gas Fisi (%)
200,0	723,50	0,50
300,0	999,00	0,98
350,0	1167,70	4,25
400,0	1432,40	12,90
450,0	1672,00	28,78
500,0	2104,00	57,32
550,0	2456,60	61,69



Gambar 4.1. Hubungan antara daya terhadap suhu bahan bakar.



Gambar 4.2. Hubungan antara daya terhadap produk gas fisi.



Gambar 4.3. Perbandingan antara variasi daya pada pengaruh burnup terhadap produk gas fisi.

Tabel 2. Hubungan antara *burnup* dan daya terhadap pelepasan gas fisi.

Burnup	Pelepasan Gas Fisi (%)						
	Daya 200	Daya 250	Daya 275	Daya 290	Daya 300	Daya 310	Daya 315
2.000	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
6.000	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,53	0,65
10.000	0,50	0,50	0,50	0,50	0,52	0,75	0,99
15.000	0,50	0,50	0,50	0,50	0,57	0,85	1,13
20.000	0,50	0,50	0,50	0,50	0,57	0,82	1,07
25.000	0,50	0,50	0,50	0,56	0,57	0,80	1,00
30.000	0,50	0,50	0,50	0,56	0,70	0,99	1,20
35.000	0,50	0,54	0,75	1,01	1,20	1,52	1,75
40.000	0,50	0,62	1,12	1,59	1,80	2,11	2,33

Pada Gambar 4.3 ditunjukkan bahwa pelepasan gas fisi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh bertambahnya power dan atau bertambahnya *burnup*, semakin besar *burnup* yang diberikan semakin besar pelepasan gas fisi dan semakin besar daya semakin besar pula pelepasan gas fisi yang dihasilkan, sedangkan efek dari pelepasan gas fisi dapat mengakibatkan tekanan internal sehingga akan terjadi *external stress* pada kelongsong, penurunan panas konduksi antara bahan bakar dan kelongsong sehingga suhu naik pada bahan bakarnya, juga dapat berakibat terjadinya *swelling* (pelepuhan) dan akan berpengaruh pada *thermal conductivity* turun dan sebagai akibatnya suhu bahan bakar naik.

## SIMPULAN

Dari hasil analisis unjuk kerja elemen bakar reaktor daya jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*) pada kondisi *steady state* dapat disimpulkan bahwa pelepasan gas fisi sangat dipengaruhi oleh temperatur bahan bakar, *burnup* maupun daya. Dari data dan informasi ini dapat memberikan pandangan secara kualitatif dan dapat dijadikan bahan evaluasi sebelum melakukan uji coba irradiasi terlebih dahulu.

## DAFTAR PUSTAKA

1. T. Nakajima, Paper presented at IAEA Specialists Meeting on Water Reactor Fuel Element Performance Computer Modelling, Brownson on Windermere, UK, 1984.
2. R.J. White and M.O. Tucker, J. Br. Nucl. Mater. 118(1983)

3. R. Hargreaves and D.A. Collins, J. Br. Nucl. Energy Soc. (1976) 311-318.
4. K. Ito, R. Iwasaki and Y. Iwano, J. Nucl. Sci. Technol. 22 (1985) 129-138.
5. JAERI Fuel Reliability Laboratory, FEMAXI-IV : Computer Code for the Anaysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, CRC Research Institute, Inc., December 1992
6. Donald R. Olander, Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements, Prepared for the Division of Reactor Development and Demonstration Energy Research, Chap 10 (1976).

## TANYA JAWAB

### 1. Endiah Puji Hastuti

- Apakah program perhitungan FEMAXI-IV telah di *bench marking* ?, dan bagaimana hasilnya
- Bagaimana pengaruh waktu operasi dan daya terhadap produk gas fisi ?, dan dalam perhitungan ini apakah waktu operasi juga diperhitungkan ?

### Edy Sulistyono

- Program FEMAXI-IV telah dicoba dengan data base pada program internasional, seperti OECD HALDEN reactor project dan *Studsвик Inter Ramp and Over Ramp Project*. Data tersebut berisikan pengukuran temperatur bahan bakar, *internal gas pressure rod diameter* dan *post irradiation*. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar perbandingan antara produk gas fisi dari hasil perhitungan dengan data hasil eksperimen, (lihat pada halaman 33 Buletin PRSG TRI DASA MEGA volume 3 no.1 edisi bulan maret 1994)

- Pengaruh waktu operasi dan daya *linear heat rating* terhadap produk gas fisi adalah sebagai berikut; waktu operasi semakin singkat menyebabkan *linear heat rating* semakin besar dan produk gas fisi semakin meningkat, seperti ditunjukkan pada grafik hubungan LHR terhadap produk gas fisi. Pada program perhitungan FEMAXI-IV tersebut waktu operasi juga diperhitungkan dan hal ini dapat dilihat pada output program.

## 2. Hasbullah Nasution

- Mohon dijelaskan mengapa terjadi penurunan produk fisi pada suatu *burn-up* tertentu, seperti diperlihatkan pada grafik produk fisi terhadap *burn-up*

## Edy Sulistyono

- Pada Gambar 4.3, yaitu grafik produk fisi terhadap *burn-up* terlihat terjadi penurunan produk gas fisi pada *burn-up* tertentu untuk LHR (*power density*) 315 W/cm. Hal ini kemungkinan terjadi penyimpangan, karena pada saat melakukan pembuatan grafik hanya menghubungkan titik-titik yang ada tanpa melalui perhitungan persamaan garis.

## 3. Harini Sosiati

- Mohon pada kesimpulan dibuat pernyataan/*statement* yang jelas, yaitu sejauh mana pengaruh suhu elemen bakar, *burn-up* dan *power* pada elemen bakar yang diiradiasi terhadap produk gas fisi.

## Edy Sulistyono

- Pengaruh suhu elemen bakar, *burn-up* dan *power* terhadap produk gas fisi telah dijelaskan secara lengkap di dalam makalah. Pada tabel 1 serta Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa semakin besar *power* (*linear heat rating*) maka suhu pada pusat elemen bakar semakin tinggi dan sebagai akibatnya produk gas fisi semakin meningkat. Demikian pula, apabila *burn-up* semakin tinggi menyebabkan LHR (*power density*) semakin besar dan terlihat pula produk gas fisi cenderung semakin meningkat.

## 4. Nurokchim

- Berapa besar *burn-up* dan *power* mempengaruhi banyaknya gas fisi ?, dari simulasi yang dilakukan dengan PWR

## Edy Sulistyono

- Ditinjau dari tayangan beningan pada rumus kecepatan produksi gas fisi serta pada Gambar 4.2 dan 4.3 memperlihatkan bahwa pada

*power density* rendah menghasilkan produk gas fisi yang sedikit, sedangkan pada *power density* di atas 300 W/cm dan *burn-up* di atas 30.000 MWD/t terlihat bahwa produk gas fisi mengalami kenaikan yang cukup besar.

## 5. Sarwo

- Apa alasan Saudara memilih menggunakan code FEMA XI-IV ?
- Bagaimana validitas code FEMA XI-IV terhadap hasil percobaan ?
- Apakah FEMA XI-IV dapat digunakan untuk menentukan jenis produk gas fisi yang dihasilkan ?

## Edy Sulistyono

- Program code FEMAXI-IV dipilih, karena dapat menganalisis secara lokal dengan cukup detail
- Validitasnya telah terbukti, bila dibandingkan dengan hasil percobaan data HALDEN reactor project, (lihat pada halaman 33 Buletin PRSG TRI DASA MEGA volume 3 no.1 edisi bulan Maret 1994)
- Code FEMAXI-IV dapat digunakan untuk menentukan jenis produk gas fisi hanya pada produk gas fisi, seperti He, Kr, Xe dan N. Hal ini dapat dilihat pada *output fission gas information*

## 6. Maradu Sibarani

- Mohon dijelaskan tentang data input yang digunakan pada code komputer, karena penjelasan di dalam makalah Saudara kurang jelas
- Apakah code FEMAXI-IV dapat digunakan untuk elemen bakar jenis PHWR, dan apa saja batasannya.

## Edy Sulistyono

- Penjelasan tentang data input yang asli dari komputer pada saat presentasi ditayangkan hanya sekilas/sesaat, tetapi penjelasan yang lebih lengkap dapat dilihat di dalam makalah pada bagian spesifikasi input data elemen bakar jenis PWR, dan perlu kami tambahkan pula bahwa data input tersebutlah yang dapat dirubah-rubah sebagai variabelnya.
- Code FEMAXI-IV tidak dapat digunakan untuk elemen bakar jenis PHWR, code FEMAXI-IV tersebut hanya dapat dipakai untuk jenis LWR, seperti pada PWR dan BWR.

### 7. Amil Mardha

- Apakah kode FEMAXI-IV dapat digunakan pada reaktor riset ?
- Mohon penjelasan cara perhitungannya ? atau dapat diterangkan dengan menggunakan alir perhitungan (*flow chart*)

### Edy Sulistyono

- Code FEMAXI-IV tidak dapat digunakan untuk reaktor riset, karena code FEMAXI-IV tersebut hanya digunakan untuk reaktor tipe LWR (PWR dan BWR)
- Diagram alir perhitungan (*flow chart*) dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan 2.6