
ANALISIS STATISTIK EKSPERIMEN SIMULASI FABRIKASI DAN IRADIASI PROTOTIP PELAT U_3Si_2 -Al BATAN

Suwardi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

ABSTRAK

ANALISIS STATISTIK EKSPERIMEN SIMULASI FABRIKASI DAN IRADIASI PROTOTIP PELAT U_3Si_2 -Al BATAN. Makalah ini menyajikan analisis teoritis dan statistik dari suatu eksperimen yang dilaksanakan untuk penentuan ekspansi termal dari pelat bahan bakar U_3Si_2 -Al yang dikembangkan oleh BATAN. Tujuan analisis ini adalah untuk memberikan informasi tambahan bagi pemanfaatan hasil eksperimen seperti untuk analisis kinerja dan keselamatan bahan bakar serta untuk desain bahan bakar yang lebih baik, dan juga untuk penyempurnaan eksperimen. Aspek non-isotropi material komposit dan ANOVA (Analisis Varian) telah digunakan untuk analisis data eksperimen. ANOVA telah digunakan untuk menguji hipotesis ketergantungan koefisien muai termal (KMT) pada perubahan waktu dan temperatur. Disimpulkan bahwa KMT arah memanjang pelat tidak tergantung pada temperturnya, sedangkan bengkak termal meningkat dengan waktu pemanasan. Hal ini diformulasikan dalam korelasi sebagai berikut: $KMT = 24,33 + 1,125 t$, KMT dalam $10^{-6}/K$ dan t dalam hari, dengan suatu koefisien korelasi sebesar 0,993. Nilai bengkak termal dari data yang ditinjau adalah terlalu kecil dibandingkan dengan hasil dari penelitian yang lain. Diusulkan agar sebelum diselenggarakan uji iradiasi, lebih dulu dilengkapi riset dengan muai ketebalan dan lebar pelat dan waktu pemanasan lebih panjang.

KATA KUNCI: ANOVA, Koefisien muai termal, Bengkak termal, Dispersi U_3Si_2 -Al

ABSTRACT

STATISTICAL ANALYSES FOR SIMULATION EXPERIMENT ON THE FABRICATION AND IRRADIATION OF BATAN U_3Si_2 -Al PLATE PROTOTYPE. *This paper presents both theoretical and statistical analyses of an experiment conducted for thermal expansion determination of U_3Si_2 -Al fuel plate developed by BATAN. The objective of the analyses is to give additional information for better utilization of the results such as for fuel safety and performance analysis, fuel design, and the completion of the experiment. The non-isotropical aspect of composite material and ANOVA (ANalysis of VAriance) have been used to analyze the results of experimental data. ANOVA has been conducted to test the hypothesis of dependency of thermal expansion coefficient (CTE) on temperature or time variation. It is concluded that the CTE of the plate is independent of its temperature variation, while the thermal swelling increases with heating time. Such dependency is formulated in the following correlation: $CTE = 24.33 + 1.125 t$, CTE in $10^{-6}/K$ and t in day, with a correlation coefficient of 0.993. The axial swelling of reviewed data is too small compared to results of other research. It is suggested that before irradiation test being conducted, research must be performed on plate expansion with a longer heating time.*

FREE TERMS: ANOVA, Coefficient of thermal expansion, Thermal swelling, U_3Si_2 -Al dispersion

I. PENDAHULUAN

Dalam rangka pengembangan bahan bakar dengan densitas lebih tinggi untuk memenuhi permintaan peningkatan ekonomi bahan bakar, BATAN bekerjasama dengan P.T. BATAN Teknologi telah berhasil membuat prototip pelat elemen bakar U_3Si_2-Al dengan densitas U sebesar 3,6; 4,2; 4,8 dan 5,2 gU/mL, dengan mengacu persyaratan fabrikasi dan uji. Densitas tersebut lebih tinggi daripada densitas elemen bakar yang sedang digunakan dalam reaktor RSG-GAS yaitu 2,96 gU/mL. Prototip tersebut dimaksudkan untuk uji iradiasi di RS-GAS^[1]. Uji iradiasi diperlukan sebagai langkah kualifikasi untuk mendapatkan lisensi bahan bakar yang dikembangkan. Untuk melengkapi Laporan Analisis Keselamatan sekaligus data kualifikasi, diperlukan pengujian pra-iradiasi atau uji dingin, antara lain uji termal bahan bakar dispersi tersebut. Pengujian dimaksudkan untuk menentukan pengaruh reaksi antara bahan bakar dan matriks Al pada kondisi temperatur dan waktu fabrikasi serta temperatur dan waktu dalam reaktor tanpa radiasi dan tanpa reaksi fisi, terhadap kinerja bahan bakar. Pengujian ini lazim disebut dengan uji kompatibilitas termal^[2-8], yang melibatkan transformasi dan reaksi yang hanya dipengaruhi oleh temperatur dan waktu, dan dimanfaatkan sebagai simulasi pada proses fabrikasi serta dalam reaktor dengan mengabaikan parameter iradiasi. Pada umumnya uji dilakukan pada temperatur melebihi temperatur di reaktor dan demikian pula waktunya. Hal ini disebabkan dalam reaktor selain temperatur dan waktu, pengaruh beban iradiasi neutron cepat dan neutron termal serta tenaga kinetik tinggi dari *recoil* inti berat hasil belah dan reaksi nuklir jauh lebih rumit dari sekadar efek temperatur dan waktu. Selain itu diperlukan karakterisasi pelat elemen bakar pra-iradiasi, khususnya termofisik bahan: konduktivitas termal, difusivitas termal dan ekspansi termal baik muai maupun bengkak untuk memprediksi kinerja khususnya keselamatan bahan bakar dalam reaktor. Data yang diperoleh antara lain dibutuhkan untuk analisis keselamatan eksperimen iradiasi dan untuk prediksi perilaku bahan bakar, yang selanjutnya digunakan untuk menguji dan memperbaiki model kinerja setidaknya data untuk analisis yang lebih lengkap yaitu dengan adanya tambahan data kinerja iradiasi.

Dalam makalah ini ditinjau hasil penentuan koefisien muai termal dan perubahan panjang sebagai fungsi temperatur dan waktu pada pelat elemen mini, bahan bakar U_3Si_2-Al berdensitas 3,6 gU/mL. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan data simulasi pengaruh termal, khususnya hasil eksperimen dan prosedur eksperimen dari pustaka 7 karena dalam abstraknya disebutkan data koefisien muai termal bergantung pada temperatur. Selain itu dari Tabel hasil/perhitungan tampak hasil akhir tanpa hasil antara, tanpa didahului atau diberi penjelasan rumus yang dipergunakan. Beberapa penelitian sebelumnya tentang uji kompatibilitas termal dilakukan pada temperatur 350, 400, 500, 525 dan 550 °C dengan waktu bervariasi dari 1600 jam hingga 2000 jam^[2,5-8].

Aplikasi hasil penelitian tersebut untuk keperluan prediksi bahan bakar produksi BATAN tidak mudah dilakukan disebabkan antara lain oleh perbedaan stuktur, mikrostruktur dan geometri kedua bahan bakar. Dengan demikian diperlukan penentuan karakteristik termal dari bahan bakar produksi Batan yang akan diprediksi. Penelitian yang lebih mirip dengan itu telah dilakukan untuk bahan bakar U_3Si_2-Al yang dikembangkan BATAN sebagaimana telah dipublikasikan^[9,10]. Waktu yang digunakan mencapai 4 hari, perubahan entalpi dengan menggunakan DTA dan koefisien muai panjang dengan pengamatan dilatometrik (dL/(Lo.dT)). Sementara pengamatan densitas dan perubahan dimensi pelat elemen bakar U_3Si_2-Al juga telah dilakukan pada penelitian berbeda^[2,6].

BATAN telah melakukan penelitian berjudul kestabilan termal bahan bakar U_3Si_2-Al ^[9] dengan metodologi berbeda, yaitu waktu hanya beberapa menit bukan ratusan jam

dan bahan yang diuji adalah campuran serbuk, bukannya pelat daging komposit. Hasil α_L pada temperatur 170 °C sebesar 24,2 – 24,3 (E-06/°C), pada temperatur 350 °C sebesar 25,5 – 26,2 (E-06/°C), dan pada temperatur 550 °C sebesar 26,6 – 28,6 (E-06/°C). Sampai dilakukan peninjauan ini, belum ditemukan hasil atau rencana penelitian lanjutan perihal perubahan tebal pelat elemen bakar sebagai fungsi waktu dan temperatur simulasi dalam reaktor.

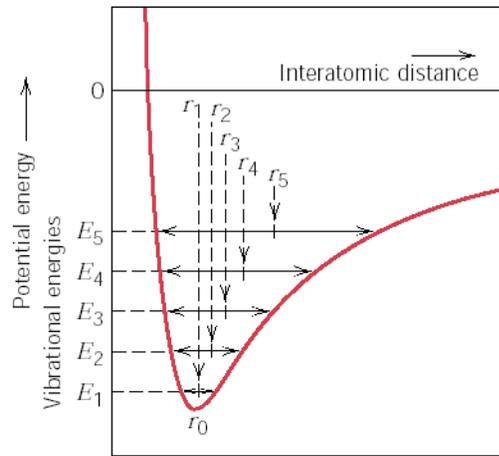
Dalam kaitannya dengan keselamatan reaktor, perubahan tebal pelat merupakan parameter utama dari perubahan volume selama dalam reaktor. Hal ini disebabkan perubahan penambahan tebal akan mengurangi luas celah pendingin yang berakibat penurunan aliran air pendingin sehingga menaikkan temperatur pelat. Sementara penambahan panjang pelat diakomodasi dengan celah atas, sedangkan penambahan lebar pelat hanya menambah kelengkungan pelat ke arah yang sama karena pelat-pelat dalam berkas bahan bakar dipasang melengkung ke arah yang sama. Dengan demikian penambahan lebar maupun panjang pelat tidak berpengaruh terhadap termohidrolik teras. Selain itu, berdasarkan pada proses perolan dan perbandingan dimensi tebal-lebar-panjang, maka kecenderungan persentase muai arah tebal melebihi persentase arah lebar maupun panjang^[12,13]. Data hasil penentuan koefisien muai termal dilakukan dengan waktu yang amat panjang, tidak didahului atau diberi definisi, rumus atau cara menghitung, sementara nilainya tampak cukup berbeda dari data pustaka lain^[8].

Kajian ini bertujuan untuk menentukan besarnya variabel dependen yaitu KMT, menentukan variabel yang berperan dalam ekspansi termal, yang telah diteliti adalah temperatur dan waktu. Uji 2 hipotesis dengan ANOVA. Hipotesis-0 (1) data KMT pada berbagai temperatur berbeda makna. Hipotesis-0 (2) data KMT pada berbagai waktu berbeda makna.

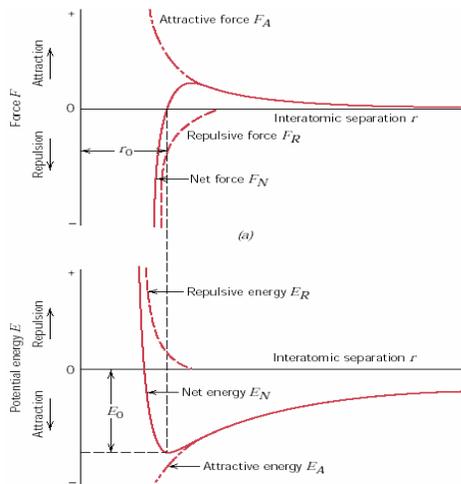
Uji hipotesis dilakukan dengan menggunakan program dalam bahasa *Mathcad* dengan menggunakan komputer dilengkapi dengan program *Mathcad Pro* dan *MS Excel*. Analisis teoritis mengenai perhitungan koefisien ekspansi termal dilakukan, kemudian dilanjutkan dengan uji hipotesis 1 dan 2 dengan ANOVA. Hasil perhitungan dalam studi ini dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada makalah yang ditinjau dan juga dengan hasil penelitian serupa.

II. TEORI

Ekspansi termal pertama dikaitkan dengan perubahan jarak rerata antar atom yang untuk bahan pada umumnya adalah naik dengan kenaikan temperatur. Hubungan antara jarak rerata antar atom dengan temperatur digambarkan dengan diagram energi potensial dua atom bertetangga pada Gambar 1. Bentuk tipikal energi tolak sebagai fungsi jarak atom dan kurva tipikal energi tarik sebagai fungsi jarak antar atom pada umumnya tidak simetris, yaitu semakin tinggi temperatur semakin besar jarak rerata. Dalam skala makro semakin besar jarak antar atom semakin besar volume yang disebabkan semakin tinggi temperatur yang dikelompokkan dalam fenomena muai termal.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Diagram energi potensial interaksi dua atom yang merupakan resultan dari energi tarik dan energi tolak (b) terkait oleh daya tarik dan daya tolak atom^[12]

Pemuaian termal bahan murni dicirikan dengan satu sifat termomekanik yang disebut koefisien termal, linier atau volumik. Pemuaian termal bahan murni mempunyai karakter konstanta yang disebut koefisien muai termal linier dan volumik. Koefisien muai termal didefinisikan sebagai perubahan dimensi per kenaikan temperatur :

$$\lambda_L = dL/(L_0.dT)$$

$$\lambda_V = dV/(V_0.dT)$$

Untuk benda umumnya bersifat mengembang atau ekspansi bila dipanaskan, dan mengerut bila didinginkan. Khususnya pada benda cair dan gas, karakteristik termomekanik adalah koefisien muai termal volumik, α_V .

$$\alpha_V = dV/(V_0 \cdot dT), P \text{ tetap} \quad (1)$$

Salah satu karakteristik termomekanik benda padat adalah koefisien muai termal linier:

$$\alpha_L = dL/(L_0 \cdot dT), P \text{ tetap} \quad (2)$$

dimana α_L tidak tergantung temperatur.

Untuk bahan padat bentuk pelat sifat pemuai termal dicirikan dengan koefisien muai termal memanjang (α_P), koefisien muai termal melebar (α_L), dan koefisien muai termal menebal (α_T). Untuk bahan isotrop ketiga ciri memiliki nilai yang sama.

$$\alpha_P = \alpha_L = \alpha_T = \alpha_L \quad (3)$$

Secara matematik/geometri dapat ditentukan hubungan antara α_L dan α_V bahan isotrop sebagai berikut.

$$(1 + \alpha_V) = (1 + \alpha_L)^3 \quad (4)$$

$$\alpha_V \cong 3 \cdot \alpha_L \quad (5)$$

Pembengkakan: Pertambahan panjang atau besar volume disebabkan oleh perubahan fisis ireversibel atau proses kimia.

Pembengkakan termal: Penambahan dimensi karena transformasi metalurgi, atau dan kimiawi, yang terjadi hanya karena pemanasan dan perubahan itu tergantung pada temperatur dan memerlukan waktu, sehingga besarnya tergantung temperatur dan waktu.

Pembengkakan iradiatif: Penambahan dimensi karena iradiasi. Interaksi neutron berbagai tingkat energi dari neutron cepat hingga neutron lambat, dan pancaran (radiasi) partikel radioaktif dengan materi, dapat mempengaruhi sifat bahan melalui bermacam proses; khusus untuk iradiasi neutron dengan bahan fisi, iradiasi dapat menyebabkan reaksi pembelahan, menghasilkan neutron, partikel hasil belah dengan energi kinetik sangat besar. Perubahan bersifat tetap, dalam arti bila radiasi dihentikan sifat bahan tidak akan kembali pada sifat sebelum iradiasi.

Sifat termomekanik lain yang sedikit mirip untuk benda pada khususnya logam dan paduan adalah *creep*. Didefinisikan sebagai deformasi permanen yang berlangsung lambat pada benda yang mendapatkan beban tetap. Apabila benda mendapatkan beban tarik tetap, *creep* yang diderita berupa perubahan panjang. Bahan yang bertemperatur tinggi rentan terhadap deformasi oleh *creep*^[11] disebabkan oleh perubahan densitas, $d\rho/\rho \cdot dT$

III. TATA KERJA

1. Dihitung dL/L_0 data yang dikaji (Tabel 1), kolom 2, 3 dan 4 dengan persamaan (1). Hasilnya disajikan pada Gambar 2a.
2. Dihitung KMT dari data eksperimen dengan persamaan (2)-(6), dan hasil disajikan pada kolom 2-5, pada Tabel 2.

3. Dibuat grafik KMT terhitung pada Tabel 2 dengan absis waktu dan parameter temperatur, pada Gambar 2.
4. Uji hipotesis data KMT lintas temperatur, dengan ANOVA KMT(T1), KMT(T2), KMT(T3).
5. Uji hipotesis data KMT lintas waktu. Analisis varian KMT lintas variabel waktu 10 titik.
6. Analisis regresi KMT pada 3 macam temperatur sebagai fungsi waktu.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data eksperimen sebagai bahan kajian disajikan pada Tabel 1. Hasil fraksi ekspansi disajikan pada kolom 1-3 pada Tabel 1. Dari dL pada kolom 2, 3 dan 4 pada Tabel 1 dan data ukuran PEB dapat dihitung $\alpha L = dL / (L_0 \cdot dT)$ sebagai fungsi t dan T, yaitu dengan persamaan (2) yang dilengkapi:

$$\alpha L = dL / (L_0 \cdot dT) \sim (L - L_0) / L_0 \times 1 / (T - T_0) \quad (6)$$

dimana L = tebal saat t

T = temperatur

L₀ = panjang saat T=T₀, dimana diasumsikan T₀ = 30 °C.

Hasil perhitungan KMT berdasarkan persamaan (1) – (3) disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2. Pada tabel serta khususnya pada gambar secara visual tampak bahwa variasi oleh perubahan waktu jauh lebih besar daripada yang disebabkan oleh variasi temperatur.

Tabel 1. Muai memanjang^[7]

Waktu (hari)	Pemuai (μm)		
	170 °C	350 °C	550 °C
0,1	83	333	433
0,25	158	370	625
0,5	167	416	678
1	176	423	683
1,5	184	423	691
2	191	441	697
2,5	197	455	704
3	202	463	711
3,5	205	471	717
4	212	475	725
αL	(24,2	(25,5	(26,6
$\cdot 10^{-6}/K$	-	-	-
	24,3)	26,2)	28,6)
αL_{med} $10^{-6}/K$	24,25	25,35	27,6

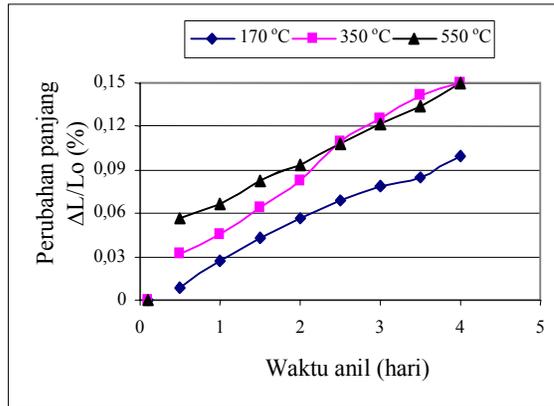
Tabel 2. KMT dihitung dari Tabel 1 dengan persamaan (6)

Waktu (hari)	$(\Delta L / (L_0 \cdot \Delta T)) \times 10^6$			
	170 °C	350 °C	550 °C	Rerata
0,1	11,857 14	20,8125	16,653 85	16,441 16
0,25	22,571 43	23,125	24,038 46	23,244 96
0,5	23,857 14	26	26,076 92	25,311 36
1	25,142 86	26,4375	26,269 23	25,949 86
1,5	26,285 71	26,4375	26,576 92	26,433 38
2	27,285 71	27,5625	26,807 69	27,218 64
2,5	28,142 86	28,4375	27,076 92	27,885 76
3	28,857 14	28,9375	27,346 15	28,380 27
3,5	29,285 71	29,4375	27,576 92	28,766 71
4	30,285 71	29,6875	27,884 62	29,285 94
Rerata	24,25	25,969	25,106	25,8918
Terkecil	11,857	20,813	16,654	16,441 16
Terbesar	28,857	28,938	27,346	29,285 94
StDev	5,088	2,563	3,332	
StDev-r	0,209 814	0,098 695	0,132 717	

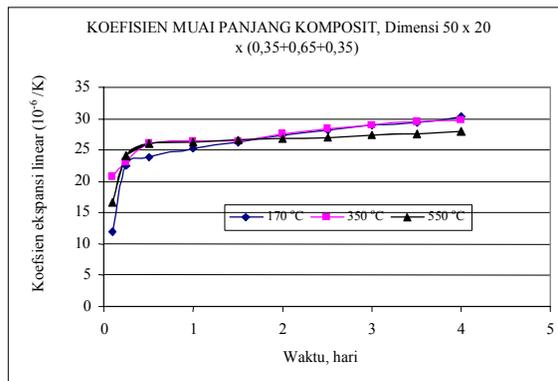
Catatan : αL_{med} adalah nilai median baris terakhir Tabel 1; StDev adalah simpangan baku; dan StDev-r adalah simpangan baku nisbi.

Data KMT sebagai fungsi waktu menunjukkan bahwa pada awal pengamatan (t=6 jam) nilai jauh dibawah KMT matriks Al, pada 9 titik pengukuran berikutnya KMT mendekati nilai KMT Al, tetapi naik secara linier dengan waktu. Hal ini mengindikasikan selama waktu itu masih

terjadi pengisian pori bawaan fabrikasi. Melewati 2 hari KMT pada temperatur tertinggi berada dibawah nilai KMT pada temperatur lebih rendah, meski sampai hari ke-4 semuanya masih terus meningkat. Hal ini agaknya terkait dengan semakin lambat reaksi karena reaktannya sama sementara yang temperatur tertinggi lebih pada awalnya KMT lebih cepat naik.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Persen muai dan pembengkak termal pelat selama 4 hari pada 3 temperatur; dan (b) KMT memanjang αL komposit kelongsong fungsi waktu dengan αL kelongsong $25 \text{ E-}06/\text{K}$

Dalam analisis varian berikut nilai-nilai absolut adalah dalam kelipatan mikro atau 10^{-6} .

1. ANOVA $\alpha (t,T)$ dengan Hipotesis-0, $\alpha L = f(t)$, dengan level signifikansi = 0,05.

Data yang diperoleh berdasarkan faktor temperatur ada 3 set (d1, d2, d3), masing-masing diperoleh pada temperatur 170, 350 dan 550 °C yaitu kolom-kolom 2, 3 dan 4 pada Tabel 2.

Secara rinci perhitungan disajikan dalam Lampiran 1, dengan ringkasan hasil adalah:

$$\text{ANOVA}(d, 0.05) = \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 12.974 \\ 2.657 \\ 0 \end{pmatrix} \blacksquare$$

dengan rincian

$$\text{ANOVA}(d, 0.05)_0 = \begin{pmatrix} 297.999 & 7 & 42.571 \\ 52.502 & 16 & 3.281 \\ 350.5 & 23 & 0 \end{pmatrix} \blacksquare$$

Matriks ANOVA(d,a)₀ adalah: Baris-1 merupakan faktor varian, faktor derajat kebebasan dan rasio faktor varian/faktor kebebasan. Baris-2 merupakan ralat varian, ralat derajat kebebasan dan rasio ralat varian/ralat kebebasan. Baris-3 adalah total varian, total derajat kebebasan dan kosong.

Matriks ANOVA(d,alfa)₁ adalah Statistik F data eksperimen. ANOVA(d,alfa)₂ adalah nilai quantil F kritis, masing-masing untuk level signifikansi alfa. ANOVA(d,alfa)₃ adalah nilai dari Hipotesis-1; jika nilai = 0, berarti hipotesis tertolak, dan jika nilai = 1 berarti hipotesis diterima. Hipotesis: Varian lintas faktor adalah tidak signifikan

Karena nilai uji Hipotesis-0 (ANOVA(d,alfa)₃) level signifikansi = 0,05, bernilai NOL (0), dengan demikian hipotesis bahwa waktu tidak mempengaruhi nilai KMT adalah tertolak dengan peluang salah penilaian 5%. Dalam kalimat lain, waktu mempengaruhi KMT.

2. ANOVA α(T,t), varian lintas waktu, level signifikansi 0,05.

Uji Hipotesis-0: Temperatur tidak mempengaruhi KMT, dengan level signifikansi = 0,05.

Data yang diperoleh berdasarkan faktor temperatur ada 3 set (d1, d2, d3), masing-masing diperoleh pada temperatur 170, 350 dan 550 °C yaitu kolom-kolom 2, 3 dan 4 pada Tabel 2.

Perhitungan secara rinci disajikan pada Lampiran-2, dengan ringkasan hasil adalah:

$$\text{ANOVA}(Tt, 0.05) = \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 0.613 \\ 3.467 \\ 1 \end{pmatrix} \blacksquare$$

dengan rincian hasil antara:

$$\text{ANOVA}(Tt, 0.05)_0 = \begin{pmatrix} 19.334 & 2 & 9.667 \\ 331.166 & 21 & 15.77 \\ 350.5 & 23 & 0 \end{pmatrix} \blacksquare$$

Statistik F data eksperimen = 0,613, sedangkan nilai quantil F kritis = 3,467, untuk level signifikansi alfa, menghasilkan nilai 1 (satu) berarti Hipotesis-0 adalah diterima, dengan kata lain temperatur tidak mempengaruhi KMT.

Uji hipotesis dengan level signifikansi diturunkan hingga 2% bahkan 1% memberi hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{ANOVA}(d, 0.02) &= \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 12.974 \\ 3.409 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{ANOVA}(Tt, 0.02) &= \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 0.613 \\ 4.74 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \text{ANOVA}(d, 0.01) &= \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 12.974 \\ 4.026 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{ANOVA}(Tt, 0.01) &= \begin{pmatrix} \{3,3\} \\ 0.613 \\ 5.78 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Jadi tetap NOL (ditolak) untuk lintas waktu dan tetap SATU (diterima) untuk lintas temperatur.

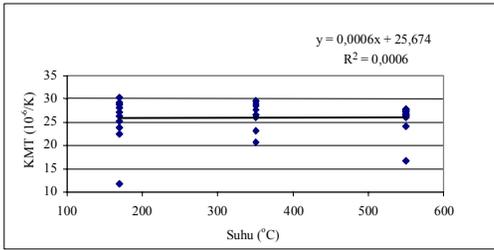
Ditinjau dari termal-mekanika bahan, aluminum dalam bahan ini sebagai matrik jauh lebih lunak daripada butir uranium silisida sebagai dispersan. Ekspansi termal matrik hingga sebesar porositas fabrikasi masih dapat ditampung oleh mengecilnya porositas.

KMT matriks Al sebesar 23,6 E-06/K juga lebih besar daripada KMT U_3Si_2 , ditambah lagi fraksi volume matriks lebih besar daripada 0,5; dengan kalimat lain volume matriks lebih besar daripada volume dispersan, sehingga nilai KMT bahan akan lebih besar dipengaruhi oleh KMT matriks Al. Berbagai acuan menyebutkan nilai KMT untuk Al adalah 23,6 E-06/K [9,10,12].

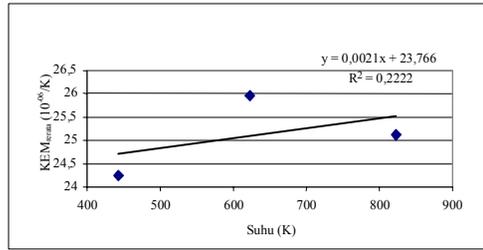
Median nilai KMT dari data yang dikaji disajikan sebagai catatan di bawah Tabel 1. Pengepasan data dengan regresi linier menghasilkan persamaan $KMT = 20,153 + 0,0089 T$, satuan E-06/K, dengan T adalah temperatur mutlak (K). Nilai koefisien korelasi $R^2 = 0,9729$, sehingga merupakan pengepasan yang amat baik. Dengan demikian akan diperoleh pengepasan yang mutlak tepat ($R^2 = 1$) bila digunakan persamaan kuadrat atas data median tersebut.

Bila data perhitungan KMT tiap titik pada makalah ini dibuat sebagai fungsi temperatur, maka didapatkan hasil yang berbeda, yaitu $KMT = 0,0006 x + 25,674$ dimana x dalam K dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,0006$, seperti tampak pada Gambar 4. Bila masing-masing rerata 10 titik, maka didapatkan $KMT = 0,0021 x + 23,766$ dimana x dalam K dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,2222$ seperti tampak pada Gambar 4. Keduanya dalam E-06/K. Bila koefisien korelasi $<0,37$ dinilai tidak ada hubungan atau ketergantungan^[13]. Hal ini sesuai dengan hasil uji hipotesis dengan ANOVA.

Hal lain yang menarik adalah perbedaan kurva dL/Lo fungsi t dan kurva KMT fungsi t. Kurva jenis perpanjangan relatif linier, sementara kurva KMT berbentuk lutut. Yang kedua kiranya disebabkan oleh penentuan KMT dalam waktu yang lama, sehingga terjadi peristiwa lain yaitu pembengkakan termal. Pembengkakan termal bagi bahan dispersi dengan mengandung pori pada matriksnya dan matriks bersifat plastis dihadapan dispersan, maka terjadi penutupan pori dan penataan ulang oleh efek termal, sehingga kondisi termal-mekanika relatif setimbang pada saat kurva mencapai lutut.



Gambar 3 (a). Pengepasan kurva menggunakan seluruh 30 titik KMT



Gambar 3 (b). Pengepasan kurva menggunakan 3 data rerata 10 titik KMT *)

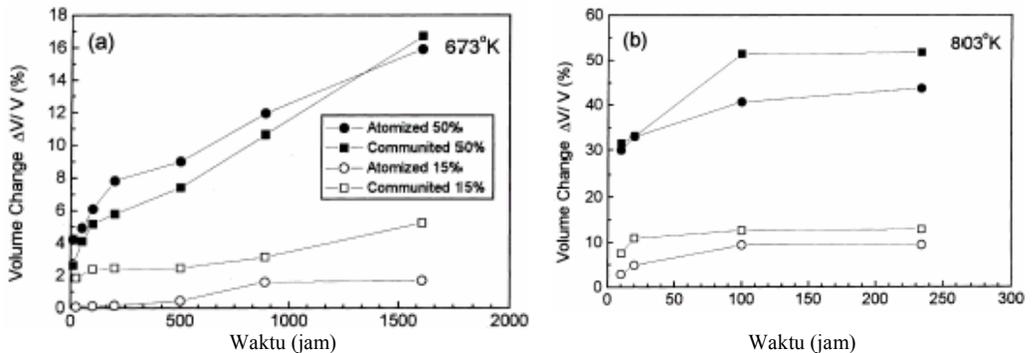
*) Simpangan baku: $\pm 5,1$; $\pm 2,6$; $\pm 0,3$, Koefisien korelasi $R^2 = 0,222\ 222$.

Kalau dianggap bahwa bahan adalah isotrop, maka koefisien muai termal volumik dihitung dengan persamaan (4) – (5). Anggapan ini terlalu sederhana mengingat konfigurasi pelat tidak sekedar tripleks dengan lapisan tengah bahan komposit, tetapi ada bingkai dari lapisan komposit. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Koefisien muai termal naik dengan waktu untuk semua temperatur. Ini jelas oleh karena reaksi termal terbentuk fasa yang lebih berpori/lebih rendah densitasnya daripada bahan asal sebagaimana penelitian lain^[4-7]. Bila hanya karena tarikan dan berlangsung amat lambat dikategorikan sebagai *creep*. Pada temperatur tinggi (550 °C) kemiringan kurva koefisien terhadap waktu adalah terendah dibanding kemiringan pada 2 temperatur yang lebih rendah (170, 350 °C), Gambar 2(b). Regangan pada temperatur tinggi relatif tertinggi sebagai fungsi waktu: sesuai dengan pemuai termal. Regangan naik dengan waktu, tetapi kemiringan hampir sama. Menurut teori laju reaksi aluminida tergantung pada temperatur. Ini berbeda dengan temuan peneliti lain^[4-7].

Penelitian lain mengenai pengaruh termal telah dilakukan untuk bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al , baik bahan bakar diperoleh dengan cara atomisasi maupun dengan cara mekanik. Pada awalnya pemuai tertahan oleh daging komposit, yaitu U_3Si_2-Al , tetapi pada temperatur tinggi terjadi reaksi antara matriks dan dispersan (Al dan U_3Si_2) membentuk aluminida. Terjadi hambatan muai pembengkakan daging oleh kelongsong^[7]. Reaksi ini dikendalikan oleh proses interdifusi, sehingga cepat pada temperatur tinggi. Ini terlihat bahwa pada temperatur tinggi kondisi setimbang lebih cepat tercapai, yaitu berturut-turut 0,35; 0,45 dan 1 hari untuk temperatur 550, 350 dan 170 °C. Pembentukan aluminida yang menghasilkan struktur lebih rendah densitasnya selanjutnya akan melebihi kesetimbangan termal mekanik kelongsong, kesetimbangan mekanik daging dan kelongsong lebih berperan.

Dalam hal ini yang dipelajari bukan koefisien akan tetapi stabilitas termal bahan bakar komposit atau dispersi, yaitu reaksi antara Al pada matriks, termasuk pula pada kelongsong dengan uranium atau U_3Si_2 butir dispersan. Reaksi yang menimbulkan perubahan dimensi melebihi batas toleransi, sebagai fungsi temperatur dan waktu dinilai tidak kompatibel, atau kompatibilitas rendah, karena perubahan yang mengakibatkan perubahan dimensi pelat dibatasi, yang dapat berdampak pada kinerja termal hidroliknya dan dapat merambat lainnya. Kim^[7] dalam makalah penelitiannya menunjukkan pengaruh temperatur dan waktu terhadap perubahan dimensi bahan bakar bentuk batang silindris dari serbuk atomisasi dan serbuk penggerusan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan volume (%) sebagai fungsi waktu dan temperatur pemanasan batang bahan bakar U_3Si_2 -Al: (a) hingga 1600 jam; (b) hingga 240 jam (= 10 hari) [7]

Terdapat perbedaan antara penelitian KAERI dan BATAN, yang pertama adalah geometri dan ada-tidaknya kelongsong. Selain itu sedikit perbedaan dalam rentang temperatur dan waktu serta fraksi volume dispersan, namun saling melengkapi dan menyilang. Sementara bahan yang dipakai memiliki kesamaan yaitu U_3Si_2 yang diperoleh dari proses mekanik. Terlepas dari bahan dan kondisi temperatur dan waktu yang banyak mirip, tetapi ada perbedaan mendasar dalam metode dan objektif atau tujuan penelitian. BATAN meneliti pemuaiian termal, yaitu beda ukuran antar temperatur yang berbeda. Sementara penelitian KAERI tentang perubahan dimensi atau volume antara sebelum dan sesudah proses termal dengan variabel temperatur dan waktu. Dalam hal KAERI pengukuran dimensi dilakukan pada temperatur yang sama. Namun demikian apabila dianalisis dengan menggunakan asumsi bahwa setelah didinginkan dalam tungku ukuran akan menyusut sebesar muai termal, maka dapat diperhitungkan perubahan panjang PEB setelah dingin, dengan mengurangkannya sebesar:

$$dL = 25 \text{ E-}06 \times dT \tag{7}$$

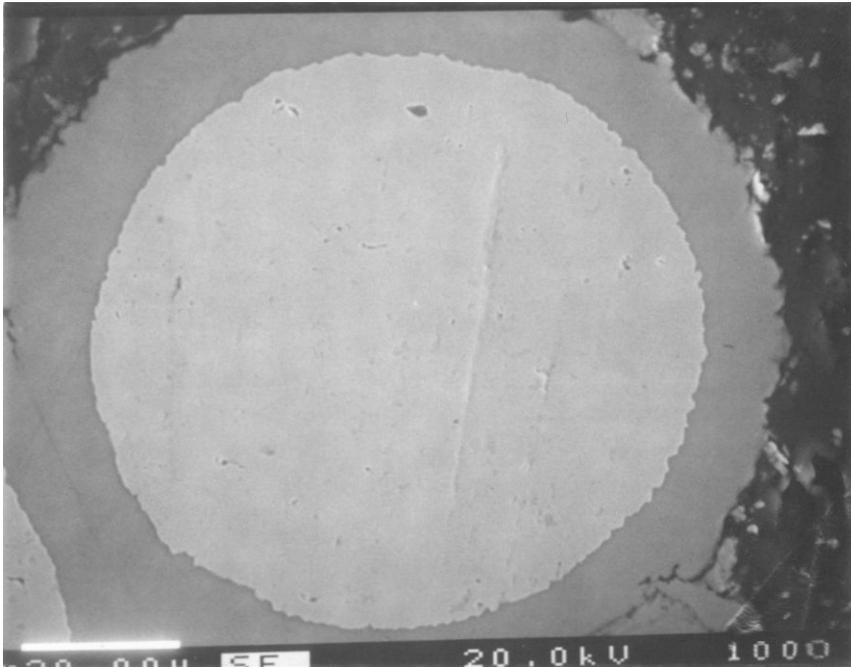
Data eksperimen yang ditinjau mendapatkan muai termal memanjang pelat mini dengan daging mengandung 3,6 gU/mL pada temperatur 550 °C pemanasan 4 hari atau 98 jam sebesar <0,15%, sementara Kim mendapatkan muai volume (termasuk pembekakan termal) bahan bakar U_3Si_2 -Al 12% vol. U_3Si_2 pada temperatur kamar setelah dipanaskan 530 °C selama 98 jam sebesar 50%, atau muai panjang 15%.

Perbedaan ini diduga oleh karena bahan yang diteliti oleh KAERI adalah bahan bakar dispersi tanpa kelongsong, sedangkan yang diteliti di Batan adalah bahan bakar dispersi yang telah dilapisi kelongsong dengan teknik rol, dan yang lebih penting yang diukur adalah ekspansi arah panjang pelat yang nilai absolut lebih besar tetapi nilai nisbi lebih rendah dibanding arah tebal [7].

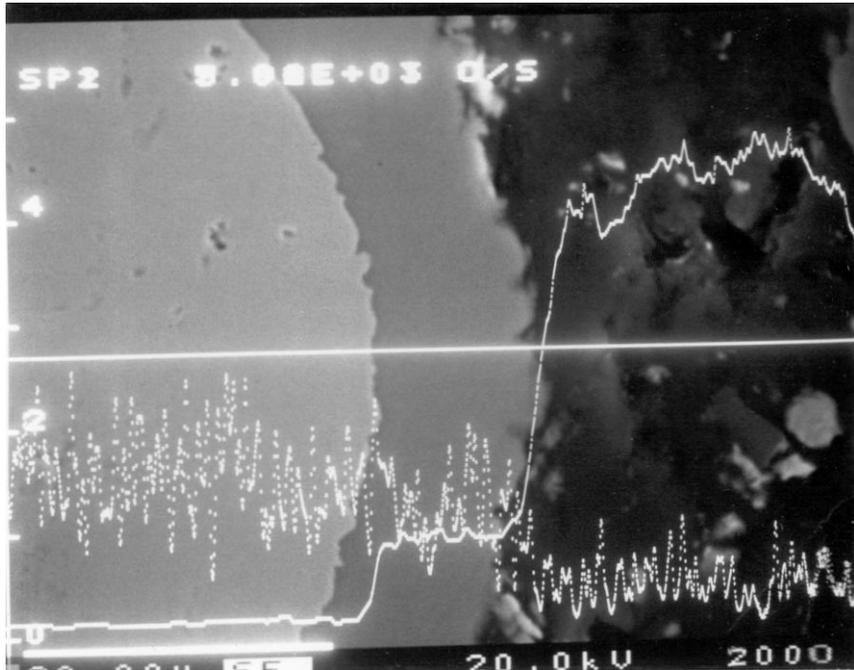
Menurut Ryu [5] pemuaiian volume daging bahan bakar dispersi silisida-Al karena reaksi matriks-dispersan yang terjadi pada batas butir (antarmuka U_3Si dan Al) serta sepanjang pita deformasi dalam partikel U_3Si_2 . Pada pemanasan temperatur tinggi atau pemanasan pada waktu panjang terdapat pori terjadi pada sekitar butir bahan bakar. Selain itu diamati adanya efek hambatan oleh kelongsong yang menurunkan pembengkakan termal daging bahan bakar.

Park [12] mengamati pembengkakan pelat U_3Si_2 -Al teriradiasi hingga 70% U, membentuk lapisan alumunida hasil reaksi Al- U_3Si_2 dengan tebal dari 1,73 – 2,13 μm . Pembentukan lapisan ini berimplikasi pada sekitar 3,3 % $dV/V\text{m}$ perubahan volume.

Kim^[6] membandingkan pembentukan lapisan reaksi dari dua macam daging bahan bakar dispersi, masing-masing menggunakan serbuk bahan bakar hasil proses atomisasi dan penggerusan. Luas permukaan spesifik serbuk atomisasi lebih kecil daripada serbuk penggerusan, volume hasil reaksi antara butir bahan bakar dan matriks juga lebih kecil untuk serbuk atomisasi, daging dari serbuk atomisasi mengandung porositas fabrikasi lebih kecil. Sementara itu diindikasikan bahwa penetrasi Al ke dalam serbuk U_3Si_2 berlangsung dengan dua lintasan yaitu melalui fasa antarmuka dengan menyisakan U tak bereaksi di pusat butir dan melalui lintasan sepanjang batas butir dengan meninggalkan beberapa bagian butir bahan bakar yang tidak bereaksi. Penggembungan termal lebih besar pada daging atau inti berasal dari serbuk bahan bakar hasil penggerusan.



(a)



(b)

Gambar 5. (a) Citra SEM butir bahan bakar dispersi dalam matriks Al, lingkaran terang adalah bahan dispersan sebelum bereaksi, cincin abu-abu lapisan aluminida, warna gelap matriks Al; (b) kurva komposisi U, UAl_x , dan Al sepanjang lintasan

Pembengkakan termal bahan bakar dispersi dalam Al juga telah diteliti Kim dkk dari pengamatan tebal lapisan reaksi aluminida seperti tipikal Gambar 4, mendapatkan bahwa hubungan antara ketebalan lapisan aluminida (h), hasil reaksi antara U dan Al, sebanding dengan akar waktu waktu bila lapisan reaksi itu tipis, dan terhadap temperatur mengikuti persamaan Arrhenius.

$$h^2 \left(1 - \frac{2h}{3r_0} \right) = k \cdot t \quad (8)$$

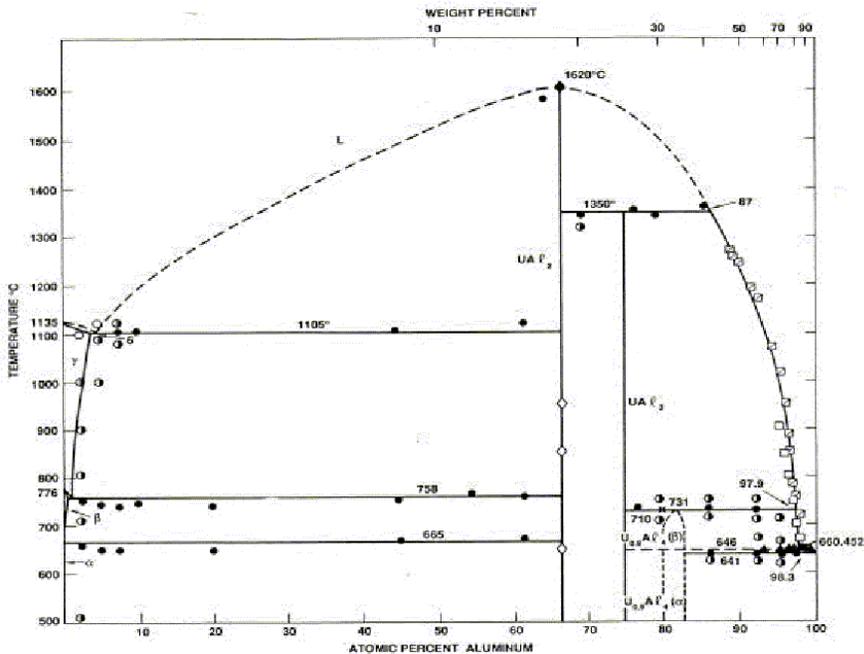
$$k = k_0 \exp \left(-\frac{Q}{R \cdot T} \right) \quad (9)$$

dimana h = tebal lapisan reaksi
 r_0 = jari-jari awal partikel bahan bakar U_3Si_2 .

Hubungan antara tebal lapisan reaksi dan kedua variabel temperatur dan waktu sebagai berikut.

$$h^2 \left(1 - \frac{2h}{3r_0} \right) = k_0 \cdot t \cdot \exp(-Q/R \cdot T) \quad (10)$$

Nilai Q yang besar terhadap hasil kali RT tampaknya menyebabkan perubahan dalam rentang temperatur eksperimen Aslina^[10] tidak cukup memberi dampak pada pemuaian dan bengkak termal bahan dispersi ini, dibandingkan dengan variasi waktu. Disamping itu, hubungan antara tebal lapisan dan pembengkakan/muai termal masih dihubungkan dengan perbedaan antara densitas lapisan hasil reaksi dengan kombinasi densitas U dalam butir bahan bakar dan Al pada matriks. Pada diagram kesetimbangan $U-Al$ (Gambar 6) tampak bahwa reaksi $U-Al$ terjadi dibawah temperatur $600\text{ }^{\circ}C$.



Gambar 6. Diagram kesetimbangan $U-Al$ ^[7]

Suku kedua ruas kanan merupakan kontribusi dari memperhitungkan difusi radial dalam ruang tiga dimensi. Bila lapisan sangat tipis terhadap diameter, h/r_0 mendekati 0, maka ruas kedua ini dapat diabaikan, sehingga h bisa dinyatakan secara eksplisit sebagai fungsi dari waktu, t dan temperatur mutlak (K).

V. KESIMPULAN

Telah dilakukan studi statistis dan teoritis ekspansi termal PEB U_3Si_2-Al fraksi volume U_3Si_2 20%. Data eksperimen variasi temperatur $170\text{ }^{\circ}C$ hingga $550\text{ }^{\circ}C$ dan waktu hingga 4 hari. Telah dilakukan perhitungan KMT dengan anggapan bahwa penentuan dalam waktu yang amat lama dan bervariasi dianggap benar.

Hasil uji hipotesis dengan ANOVA untuk pengaruh variabel temperatur maupun waktu terhadap KMT menunjukkan bahwa KMT tergantung pada waktu pemanasan, sementara pengaruh temperatur tidak signifikan.

Pengepasan kurva secara regresi linier baik dengan 3×10 data KMT, maupun 3 rerata 10 data KMT menunjukkan amat lemahnya kaitan antara temperatur dengan KMT.

Nilai koefisien muai termal aksial (memanjang) sebesar $(24,33 + 1,1247 t) 10^{-6}/K$, dengan t dalam hari.

VI. SARAN

Untuk kualifikasi bahan bakar U_3Si_2 -Al $\geq 3,6$ gU/mL, perlu dilakukan penelitian:

1. Pengukuran dV/V_0 (rasio perubahan volume terhadap volume awal) untuk penentuan rasio perubahan tebal terhadap tebal awal atau langsung pengukuran.
2. Rasio perubahan tebal terhadap tebal awal setelah anil sebagai fungsi temperatur dan waktu penahanan.
3. Penentuan dilakukan dengan waktu lebih panjang untuk temperatur lebih rendah.

VII. DAFTAR PUSTAKA

1. SUPARJO, SARDJONO, dan BOYBUL, "The Effect of the Uranium Loading on the U_3Si_2 -Al Fuel Plates", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Buku II, Yogyakarta Nuclear Research Centre, BATAN, Yogyakarta, Vol. 405, Juni 1996, hal.220-225.
2. KIM, K.H., PAIK, J.M., KIM, C.K., HOFMAN, G.L., and PARK, K.W., "Thermal Compatibility Studies of U_3Si_2 Dispersion Fuels prepared with Centrifugally Atomized Powder", J.of Nuclear Materials, Vol. 270, 1999, pp.315-321.
3. DOMAGALA, R.F., WIENCEK, T.C., and TRESH, H.R., Nucl. Tech., Vol. 62, 1983, pp.353-360.
4. NAZARE, S., Nucl. Mater., 1984, Vol. 124, pp.14-24.
5. RYU, W.S., PARK, J.M., KIM, C.K., and KUK, I.H., "Comparison of Thermal Compatibility Between Atomized and Comminuted U_3Si_2 Dispersion Fuels", Proceedings of the 1994 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Vol. 427, Williamsburg, USA, 1997, pp.154-161.
6. KIM, K.H., PARK, J.M., KIM, C.K., HOFMAN, G.L., and PAIK, K.W., "Thermal Compatibility Studies of U_3Si_2 Dispersion Fuels prepared with Centrifugally Atomized Powder", J. of Nuclear Materials, Vol. 270(3), April 1999, pp.315-321.
7. KIM, K.H., JANG, S.J., AHN, H.S., PARK, J.M., and KIM, C.K., "Thermal Compatibility Studies of High-Density U_3Si_2 Dispersion Fuel from Atomized Powder", Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Vol. 2, Taejon, Korea, Vol. 716, October 1997, pp.55-61.
8. OH, S.J., KIM, K.H., LEE, Y.S., AHN, S.H., and KIM, C.K., "A Study on the Thermal Compatibility of Centrifugally Atomized U-Mo and U_3Si_2 Dispersion Fuels", Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, KAERI, Taejon, Korea, May 2001. [CD-ROM]
9. ASLINA B.G., dkk, "Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Pemuaihan dan Mikrostruktur PEB Mini U_3Si_2 -Al dengan TMU $3,6$ g/cm³", Prosiding Presentasi ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir 5, Nuclear Fuel Elements Development Centre, National Atomic Energy Agency, Jakarta, 2000.

-
10. ASLINA B.G., SUPARJO, DIAN ANGGRAINI, dan HASBULLAH N., “Karakteristik Termal Kelongsong AlMg₂ dan Pelat Elemen Bakar U₃Si₂-Al Variasi Tingkat Muat Uranium”, Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir 3, Nuclear Fuel Elements Development Centre, Vol. 395, National Atomic Energy Agency, Jakarta, 1998, hal.205-215.
 11. ANONYMOUS, Microsoft Corporation, Encarta Encyclopaedia, 1993-2003.
 12. PARK, J.M., OH, S.J., and KIM, K.H., et.al, “Comparison Irradiation Behavior Between Atomized and Comminuted U₃Si₂/Al Mini-Plate Fuels”, Proceedings of the KNS-KARP Joint Spring Meeting, Taejon, Korea, May 2002. [CD-ROM]
 13. CALLISTER, JR., W.D., Fundamentals of Materials Science and Engineering / An Interactive E-Text, <http://www.wiley.com/college/callister>.
 14. PERRY, R., and GREEN, D., Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, 50th anniversary 6th ed., International Student ed., Mc-Graw-Hill, USA, 1984.
 15. MathSoft Engineering and Education, MathCAD Resource Center, <http://www.mathcad.com>.

LAMPIRAN

Program ANOVA data D, level signifikansi α

```

ANOVA(D,  $\alpha$ ) :=
  ntotal ← 0
  SX ← 0
  SX2 ← 0
  T ← 0
  for i ∈ 0..last(D)
    SDi ←  $\sum D_i$ 
    nDi ← length(Di)
    SX ← SX + SDi
    SX2 ← SX2 +  $\sum (D_i \cdot D_i)$ 
    T ← T +  $\frac{SDi^2}{nDi}$ 
    ntotal ← ntotal + nDi
  SSfactor ← T -  $\frac{SX^2}{n_{total}}$ 
  SSerror ← SX2 - T
  SStotal ← SX2 -  $\frac{SX^2}{n_{total}}$ 
  dffactor ← length(D) - 1
  dferror ← ntotal - length(D)
  dftotal ← ntotal - 1
  Analysis0 ←  $\begin{pmatrix} SS_{factor} & df_{factor} & \frac{SS_{factor}}{df_{factor}} \\ SS_{error} & df_{error} & \frac{SS_{error}}{df_{error}} \\ SS_{total} & df_{total} & 0 \end{pmatrix}$ 
  Analysis1 ←  $\frac{(Analysis_0)_{0,2}}{(Analysis_0)_{1,2}}$ 
  Analysis2 ← qF(1 -  $\alpha$ , dffactor, dferror)
  Analysis3 ← Analysis1 < Analysis2
  Analysis

```