



EFEK REKRISTALISASI PADA BAHAN BAKAR UO_2 DERAJAT BAKAR TINGGI TERHADAP PELEPASAN GAS HASIL FISI

Bambang Herutomo

Pusat Pengembangan Teknologi Bahan Bakar dan Daur Ulang-BATAN

ABSTRAK

EFEK REKRISTALISASI PADA BAHAN BAKAR UO_2 DERAJAT BAKAR TINGGI TERHADAP PELEPASAN GAS HASIL FISI. Rekrystalisasi atau pemecahan butiran asli membentuk struktur berbutir halus telah diamati di dalam bahan bakar UO_2 derajat bakar tinggi. Bahan bakar berbutir halus berpotensi untuk mempertinggi pelepasan gas hasil fisi. Kenaikan tekanan gas di dalam batang bahan bakar sebagai akibat pelepasan gas hasil fisi adalah satu kondisi yang dapat membatasi tingkat derajat bakar. Makalah ini membahas hasil studi tentang efek rekrystalisasi pada bahan bakar UO_2 derajat bakar tinggi terhadap pelepasan gas hasil fisi. Dalam studi ini, program komputer FASTGRASS telah digunakan untuk memprediksi perilaku gas hasil fisi di dalam bahan bakar. Hasil studi secara umum menunjukkan bahwa rekrystalisasi menyebabkan pelepasan gas hasil fisi meningkat secara tajam terutama untuk skenario kecelakaan berat seperti transien tipe RIA. Simulasi dalam reaktor pada pelet bahan bakar UO_2 tipe PWR (laju fisi $\approx 2,03 \times 10^{19}$ fisi/ m^3 -s dan derajat bakar ≈ 70 MWD/kgU) menunjukkan bahwa rekrystalisasi, yang telah terjadi di bagian tepi luar pelet pada fraksional jari-jari antara 0,9 – 1,0 dan mulai terjadi pada saat derajat bakar mencapai 45 MWD/kgU, telah memberikan tambahan prosentasi pelepasan gas hasil fisi sekitar 3 – 5% untuk keadaan mantap (*steady state*) dan sekitar 15 – 20% untuk transien tipe RIA.

ABSTRACT

EFFECT OF RECRYSTALLIZATION IN HIGH-BURNUP UO_2 FUEL ON FISSION GAS RELEASE. Recrystallization or subdivision of the original grains into fine-grained structure has been observed in high-burnup UO_2 fuels. Fuel with fine grains has potency to enhance fission gas release. Increasing of gas pressure inside the fuel rod due to fission gas release is one condition that can limit the attainable burnup level. This paper discusses the results of the study of the effect of recrystallization in high burnup UO_2 fuel on fission gas release. In this study the FASTGRASS computer code was used to predict the fission gas behavior in the fuel. In general, the results show that recrystallization causes a sharp increase of fission gas release, mainly in severe accident scenarios such as the RIA type transient. The in-reactor simulation of the PWR type - UO_2 fuel pellet (fission rate $\approx 2.03 \times 10^{19}$ fissions/ m^3 -s and burnup ≈ 70 MWD/kgU) shows that recrystallization, which happened in the peripheral region of fuel pellet at fractional radius of 0.9 – 1.0 and started at burnup of 45 MWD/kgU, gives an additional percentage of fission gas release up to 3 – 5% for steady state and up to 20 – 25% for RIA type-transient.

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar berderajat bakar tinggi pada PLTN jenis LWR (*Light Water Reactor*) merupakan solusi terbaik saat ini untuk menekan ongkos bahan bakar terutama bagi utiliti yang menerapkan strategi daur bahan bakar terbuka (*open fuel cycle*). Hal ini dikarenakan pemanfaatan uranium menjadi lebih baik dan jumlah bahan bakar bekas yang disimpan akan berkurang apabila derajat bakar yang dicapai bahan bakar semakin tinggi. Dewasa ini rata-rata derajat bakar bahan bakar LWR telah berhasil ditingkatkan dari 28 MWD/kgU (BWR) dan 33 MWD/kgU (PWR) menjadi sekitar 40 – 50 MWD/kgU. Sasaran derajat bakar (*average discharge burnup*) yang ingin dicapai dimasa mendatang (th. 2010-an) adalah sekitar 65 MWD/kgU^[1,2,3].

Agar tujuan kinerja dan keandalan yang diinginkan tercapai, salah satu problema yang perlu mendapat perhatian serius dalam penggunaan bahan bakar berderajat bakar tinggi adalah kenaikan tekanan gas di dalam batang bahan bakar (*fuel rod*) yang disebabkan oleh gas-gas hasil fisi, terutama xenon dan kripton, yang terlepas dari matrik bahan bakar. Selain itu, tekanan kontak pelet-kelongsong juga akan meningkat sebagai akibat kenaikan ekspansi volume bahan bakar (*swelling*) yang terutama disebabkan oleh akumulasi gelembung-gelembung gas hasil fisi tersebut di dalam matrik bahan bakar. Untuk tingkat derajat bakar yang telah dicapai saat ini, problema tersebut telah dapat diatasi antara lain melalui perbaikan desain seperti menambah volume ruang kosong di dalam batang bahan bakar^[3]. Akan tetapi, untuk tingkat derajat

bakar yang lebih tinggi lagi, desain batang bahan bakar tersebut masih perlu dikaji ulang karena hasil penelitian ^[4,5] mengungkapkan bahwa laju *swelling* dan laju pelepasan gas hasil fisi meningkat tajam setelah iradiasi melewati derajat bakar tertentu.

Rekristalisasi atau pemecahan butiran (*grain*) hasil fabrikasi menjadi butiran-butiran halus (*subgrain*) telah diamati di dalam bahan bakar UO₂ berderajat bakar tinggi. Proses rekristalisasi mulai terjadi apabila energi per inti cukup untuk membentuk permukaan-permukaan batas butir dengan membuat suatu volume yang bebas regangan dengan hasil akhir berupa penurunan energi bebas material. Restrukturisasi ini menyebabkan terbentuknya suatu jaringan yang rapat menyerupai batas butir baru. Dosis iradiasi yang menyebabkan rekristalisasi ditentukan oleh kondisi operasi bahan bakar seperti temperatur dan laju fisi ^[4,5,6].

Peristiwa rekristalisasi di dalam bahan bakar UO₂ mula pertama diamati oleh Bleiberg et.al. ^[4], yaitu butiran asli yang berukuran 20 – 30 μm telah pecah menjadi butiran-butiran halus dengan ukuran <1 μm setelah dosis iradiasi mencapai 2 x 10²¹ fisi/cm³. Penelitian lain ^[5] juga mengungkapkan bahwa bagian tepi luar (*peripheral*) pelet bahan bakar LWR meningkat porositasnya dengan kenaikan derajat bakar. Pada derajat bakar sekitar 45 MWD/kgU, cincin luar yang sangat berpori dengan ketebalan sekitar 100 – 200 μm telah terbentuk. Pengujian lebih lanjut dari *rim effect* ini menunjukkan struktur butir yang sangat halus apabila dibandingkan dengan ukuran butir UO₂ yang asli.

Rekristalisasi yang menghasilkan struktur bahan bakar berbutir halus tersebut diduga kuat akan mempertinggi laju pelepasan gas hasil fisi dan *swelling*. Hal ini mengingat panjang difusi gas-gas hasil fisi (gelembung-gelembung gas) untuk mencapai batas butir di dalam bahan bakar yang mengalami rekristalisasi menjadi lebih

pendek sehingga gas-gas hasil fisi akan mencapai bidang batas butir dalam waktu yang lebih singkat. Untuk membuktikan dugaan tersebut, studi (perhitungan) untuk mengetahui efek rekristalisasi terhadap pelepasan gas hasil fisi dan *swelling* dari bahan bakar UO₂ berderajat bakar tinggi tipe LWR telah dilakukan dan hasil-hasil perhitungan dibahas di dalam makalah ini. Kondisi iradiasi yang ditinjau dalam perhitungan adalah keadaan mantap (*steady state*) dan transien singkat tipe – RIA (*Reactivity Initiated Accident*). Dalam studi ini, perilaku gas hasil fisi di dalam bahan bakar UO₂ sebagai fungsi sejarah iradiasi diprediksi dengan program komputer FASTGRASS ^[7]. Hasil-hasil perhitungan yang diperoleh diharapkan berguna sebagai dasar pertimbangan dalam mendesain elemen bakar LWR eksperimental tipe PWR berderajat bakar tinggi yang akan diuji-iradiasi di RSG-GAS.

M E T O D E

Untuk mengetahui efek rekristalisasi terhadap pelepasan gas hasil fisi dan *swelling* dari bahan bakar UO₂ yang ditinjau, perhitungan dengan program komputer FASTGRASS dikerjakan dengan cara sbb. :

- sebelum dosis iradiasi mencapai dosis rekristalisasi maka perhitungan dilakukan dengan ukuran butir UO₂ standar untuk LWR, yaitu 15 μm, kemudian
- pada saat dosis iradiasi telah mencapai dosis rekristalisasi dan seterusnya, ukuran butir diubah menjadi 0,5 μm sesuai rekomendasi pustaka ^[4,5,6].

Dosis rekristalisasi atau dosis iradiasi yang menyebabkan bahan bakar UO₂ mulai mengalami rekristalisasi, **FDX** (fisi/m³), dalam perhitungan ini ditentukan berdasarkan persamaan-persamaan dan data parameter yang dikembangkan oleh J.Rest dan G.L. Hofman ^[4,5,6], yaitu :

$$FDX = \frac{2,193 \cdot 10^{-8} \cdot \dot{F} + 6,478 \cdot \sqrt{\dot{F}} \cdot e^{-18561,5/T}}{7,89 \cdot 10^{-27} \cdot T \cdot e^{-32482,6/T} + 2,73 \cdot 10^{-38} \cdot T \cdot \dot{F}} \dots\dots\dots(1)$$

\dot{F} = laju fisi (x 10²⁰ fisi / detik)
T = Temperatur (K)

HASIL DAN BAHASAN

Hasil perhitungan dosis rekristalisasi bahan bakar UO_2 sebagai fungsi laju fisi dan temperatur iradiasi dapat dilihat pada gambar 1 dan hasil perhitungan dosis rekristalisasi bahan bakar UO_2 untuk PWR (laju fisi sekitar $2,03 \times 10^{19}$ fisi/ $\text{m}^3\text{-s}$) sebagai fungsi temperatur dapat dilihat pada gambar 2. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa untuk temperatur iradiasi yang sama (gambar 1) maka kenaikan laju fisi menyebabkan penurunan dosis rekristalisasi. Dengan kata lain, apabila laju fisi naik maka proses rekristalisasi akan terjadi lebih cepat (pada dosis iradiasi atau derajat bakar yang lebih rendah). Untuk laju fisi yang sama (gambar 2), dosis rekristalisasi menurun sedikit dengan kenaikan temperatur dan mencapai titik terendah pada temperatur sekitar 800 K. Dosis rekristalisasi kemudian naik secara tajam untuk temperatur di atas 900 K. Perlu diketahui bahwa proses rekristalisasi pada bahan bakar UO_2 tidak akan terjadi apabila temperatur lebih besar dari 1000 K karena cacat-cacat yang terbentuk akibat iradiasi telah mengalami rekoveri termal^[6].

Data hasil perhitungan menunjukkan bahwa proses rekristalisasi pada bahan bakar PWR mulai terjadi pada saat dosis iradiasi mencapai sekitar $1,2 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 atau setara dengan derajat bakar sekitar 45 MWD/kgU dan rekristalisasi ini terjadi pada bagian bahan bakar yang memiliki temperatur sekitar 800 K. Apabila bahan bakar tersebut diiradiasi sampai derajat bakar 80 MWD/kgU atau setara dengan dosis iradiasi sekitar $2,1 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 maka proses rekristalisasi hanya akan terjadi pada bagian pelet bahan bakar yang memiliki temperatur lebih kecil dari 950 K (lihat gambar 2). Oleh karena itu, untuk mengurangi efek rekristalisasi maka fraksi bahan bakar yang memiliki temperatur lebih rendah dari 950 K perlu dikurangi.

Hasil perhitungan FASTGRASS tentang fraksi gas hasil fisi yang terlepas dari matrik bahan bakar dan *swelling* yang terjadi pada bahan bakar untuk kondisi *steady state* dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4. Dalam hal ini perhitungan dilakukan terhadap spesimen uji bahan bakar UO_2 yang diiradiasi pada laju fisi sebesar $2,03 \times 10^{19}$ fisi/ $\text{m}^3\text{-s}$ dan temperatur konstan sekitar 900 K. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa laju pelepasan gas hasil fisi dan laju *swelling*

bahan bakar naik tajam setelah dosis iradiasi melewati dosis rekristalisasi, yaitu sekitar $1,54 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 atau sekitar 60 MWD/kgU. Oleh karena rekristalisasi menghasilkan butiran-butiran halus yang berukuran sekitar 0,5 μm (*sub-grain*) maka difusi gas-gas hasil fisi yang terbentuk, baik berupa atom maupun gelembung gas, akan lebih cepat mencapai batas butir apabila dibandingkan pada butiran UO_2 yang tidak mengalami rekristalisasi. Gas-gas hasil fisi yang telah mencapai batas butir akan tertahan yang kemudian membentuk titik-titik *node*. Apabila batas butir telah jenuh dengan titik-titik *node* maka akan terjadi persambungan antar titik *node* membentuk suatu terowongan halus dan gas-gas hasil fisi yang telah mencapai batas butir akan mengalir di dalam terowongan tersebut yang kemudian akan diendapkan di daerah batas butir yang memiliki ikatan paling lemah, yaitu di daerah pojok butir (*grain edge*), membentuk gelembung gas yang semakin lama tumbuh membesar sejalan dengan kenaikan dosis iradiasi. Apabila terjadi persambungan antara gelembung-gelembung gas pojok butir (*long-range interconnection*) tersebut maka akan terbentuk porositas baru di dalam bahan bakar dan volume bahan bakar bertambah besar (*swelling*). Selanjutnya, gas-gas hasil fisi akan terbebas keluar dari bahan bakar melalui porositas yang telah terbentuk tersebut^[4,5,6].

Hasil perhitungan FASTGRASS tentang fraksi gas hasil fisi yang terlepas dari matrik bahan bakar UO_2 pada keadaan transien tipe RIA, baik untuk butiran bahan bakar yang mengalami rekristalisasi maupun yang tidak mengalami rekristalisasi dapat dilihat pada gambar 5. Dalam perhitungan diasumsikan bahwa transien terjadi tepat pada saat dosis iradiasi mencapai dosis rekristalisasi (sekitar 60 MWD/kgU) dan skenario transien yang digunakan adalah pemanasan secara cepat dalam orde 10 milli detik dari temperatur semula (900 K) ke temperatur maksimum (2600 K) yang kemudian diikuti pendinginan selama 10 detik untuk kembali ke temperatur sebelum transien (900 K). Hasil perhitungan yang diperoleh menunjukkan bahwa transien tidak menyebabkan perubahan yang nyata terhadap pelepasan gas hasil fisi dari butiran yang tidak mengalami rekristalisasi. Akan tetapi, untuk butiran bahan bakar yang mengalami rekristalisasi, transien menyebabkan kenaikan yang sangat signifikan terhadap pelepasan gas hasil fisi,

yaitu mencapai sekitar 41 % (gambar 5) dan akan mencapai sekitar 95% apabila transien terjadi pada derajat bakar 70 MWD/kgU (gambar 6). Perhitungan yang dilakukan pada derajat bakar 60 MWD/kgU dengan variasi temperatur transien menunjukkan bahwa pelepasan gas hasil fisi tidak terjadi apabila temperatur maksimum transien kurang dari 2200 K dan pelepasan gas hasil fisi mencapai fraksi 90 % apabila temperatur maksimum transien sekitar 3000 K.

Hasil perhitungan pada gambar 5 menunjukkan bahwa pelepasan gas hasil fisi mencapai maksimum setelah 3 detik dari awal transien dan kemudian tidak ada gas hasil fisi yang dilepaskan sampai batas waktu transien berakhir (10 detik). Kondisi ini terjadi karena pemanasan yang cepat dengan laju tinggi menyebabkan batas butir seolah-olah menjadi suatu permukaan yang bebas (batas butir mengalami retak-mikro sebagai akibat tegangan termal yang timbul) sehingga gas hasil fisi yang telah mencapai batas butir akan langsung terlepas dari matrik bahan bakar. Setelah pendinginan berlangsung beberapa saat maka batas butir akan kembali ke keadaan semula dan gas-gas hasil fisi yang telah mencapai batas butir akan tertahan di batas butir tersebut sehingga setelah pendinginan berlangsung sekitar 3 detik tidak terdapat gas hasil fisi yang terlepas dari matrik bahan bakar. Oleh karena transien tipe RIA berlangsung dalam selang waktu yang sangat singkat (orde 10 detik) dan gas-gas hasil fisi yang telah mencapai batas butir akan langsung dibebaskan sehingga gelembung-gelembung gas yang tertahan di pojok butir (*grain edge*) tidak sempat mengalami pertumbuhan maka transien tipe ini ini tidak akan menyebabkan kenaikan *swelling* pada bahan bakar.

Hasil perhitungan untuk pelet bahan bakar UO_2 tipe PWR yang diiradiasi pada rapat daya konstan sekitar 650 W/cm^3 atau laju fisi sekitar $2,03 \times 10^{19} \text{ fisi/m}^3\text{-s}$ dan temperatur permukaan pelet sekitar 830 K menunjukkan bahwa proses rekristalisasi akan terjadi pada saat derajat bakar mencapai sekitar 45 MWD/kgU. Apabila pelet tersebut diiradiasi sampai derajat bakar 70 MWD/kgU maka fraksi jari-jari pelet yang mengalami rekristalisasi (*rim effect*) adalah antara 0,9– 1,0 atau sekitar 20% dari luas penampang pelet bahan bakar. Rekristalisasi pada bagian pelet tersebut menyebabkan prosentasi gas hasil fisi yang terlepas dari matrik bahan bakar bertambah

sekitar 3 - 5 % dari prosentasi gas hasil fisi yang terlepas dari pelet bahan bakar yang dihitung tanpa memperhatikan efek rekristalisasi (gambar 7). Apabila terjadi transien tipe RIA pada akhir iradiasi maka prosentasi gas hasil fisi yang terlepas akan bertambah sekitar 20 - 25% dan penambahan ini dapat berdampak besar terhadap kenaikan tekanan gas di dalam batang bahan bakar. Di sisi lain, meskipun rekristalisasi juga menyebabkan kenaikan laju *swelling* akan tetapi kenaikan *swelling* yang terjadi pada daerah pelet yang mengalami rekristalisasi tersebut hampir tidak berpengaruh terhadap total *swelling* yang terjadi pada pelet bahan bakar (gambar 8). Hal ini dikarenakan relatif kecilnya orde *swelling* dan fraksi volume pelet bahan bakar yang mengalami rekristalisasi.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan bahasan di atas terlihat bahwa rekristalisasi yang terjadi pada bahan bakar UO_2 berderajat tinggi memiliki efek yang cukup signifikan terhadap pelepasan gas hasil fisi terutama apabila terjadi transien singkat seperti RIA. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rekristalisasi yang terjadi pada bagian luar pelet bahan bakar UO_2 derajat bakar tinggi (70 MWD/kgU) untuk PWR telah menambah prosentasi total gas hasil fisi yang terlepas dari pelet bahan bakar sekitar 3 - 5% pada kondisi *steady state* dan sekitar 15 - 20% apabila terjadi transien tipe RIA.

Meskipun rekristalisasi juga menyebabkan kenaikan *swelling* akan tetapi pengaruhnya terhadap total *swelling* yang terjadi pada pelet bahan bakar hampir tidak ada (dapat diabaikan). Efek lain yang perlu mendapatkan perhatian adalah peningkatan porositas pada bagian pelet yang telah mengalami rekristalisasi. Kenaikan porositas menyebabkan daya hantar panas bahan bakar turun dan temperatur operasi bahan bakar akan naik yang berarti laju pelepasan gas hasil fisi juga akan naik.

Untuk menjaga agar batang bahan bakar tetap memiliki kinerja dan tingkat keandalan yang tinggi maka proses rekristalisasi yang terjadi pada bahan bakar UO_2 berderajat bakar tinggi perlu dihindari, yaitu dengan mendesain bahan bakar yang memiliki laju fisi dan temperatur operasi sedemikian hingga bahan bakar tidak

mengalami rekristalisasi sampai derajat bakar yang direncanakan tercapai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. MILLER R.S., "Steps Toward High Burn-up in PWRs : a US Perspective", Nuclear Energy, 1992, 31, No. 1, Feb., 41-47.
- [2]. COCHRAN R.G. and TSOULFANIDIS N., "The Nuclear Fuel Cycle : Analysis and Management", ANS - 1990.
- [3]. IAEA, "Review of Fuel Element Developments for Water Cooled Nuclear Power Reactor", TRS No. 299, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1989.
- [4]. REST J. and HOFMAN G.L., "Dynamics of Irradiation-Induced Grain Subdivision and Swelling in U_3Si_2 and UO_2 Fuels", Journal of Nuclear Materials, 210 (1994) 187 - 202.
- [5]. REST J., "The DART - Dispersion Analysis Research Tool : A Mechanistic Model for Predicting Fission-Product-Induced Swelling of Aluminium Dispersion Fuels", ANL-95/36, Argonne National Laboratory, August 1995
- [6]. REST J. and HOFMAN G.L., "Letter to the Editors : Effect of Recrystallization in High Burnup UO_2 on Gas Release during RIA - type Transients", Journal of Nuclear Materials 223 (1995) 192 - 195.
- [7]. REST J. and ZAWADZKI S.A., "FASTGRASS : A Mechanistic Model for Prediction of Xe, I, Cs, Te, Ba and Sr Release from Nuclear Fuel Under Normal and Severe - Accident Conditions", NUREG/CR-5840, ANL-92/3, Argonne National Laboratory, Sept. 1992.

TANYA JAWAB

Sungkono

- Parameter apa yang digunakan untuk mendesain elemen bakar agar tidak terjadi rekristalisasi?
- Pada temperatur berapa rekristalisasi UO_2 terjadi?
- Menurut pendapat Saudara, sampai derajat bakar berapa UO_2 aman?

Bambang Herutomo

- Laju fisi (rapat daya) dan temperatur operasi bahan bakar harus diatur sedemikian hingga dosis rekristalisasi-FDX (Persamaan 1) lebih besar dari tingkat derajat bakar yang dicapai oleh bahan bakar.
- Tergantung pada laju fisi (rapat daya) di dalam bahan bakar UO_2 (lihat Gambar 1 dan Gambar 2). Efek rekoveri termal menyebabkan bahan bakar UO_2 tidak mengalami rekristalisasi apabila dioperasikan pada temperatur lebih besar dari $1000^{\circ}K$.
- Untuk menghindari ketidak tentuan, sebaiknya bahan bakar UO_2 dioperasikan dengan derajat bakar tidak melebihi dosis rekristalisasi.

Nusin Samosir

- Parameter mana, laju fisi atau temperatur operasi yang lebih berpengaruh terhadap dosis rekristalisasi?

Bambang Herutomo

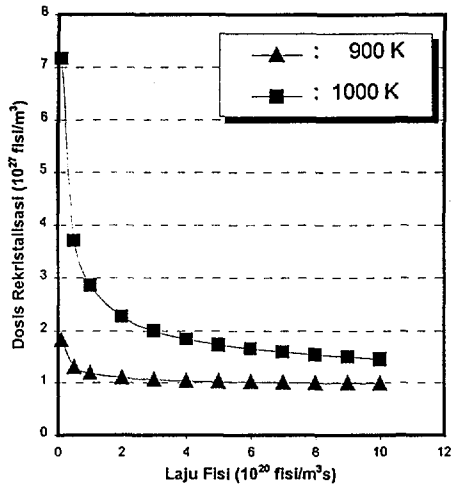
- Hasil perhitungan (Gambar 1 dan Gambar 2) menunjukkan bahwa temperatur operasi lebih berpengaruh terhadap besar dosis rekristalisasi dibandingkan laju fisi.

Futichah

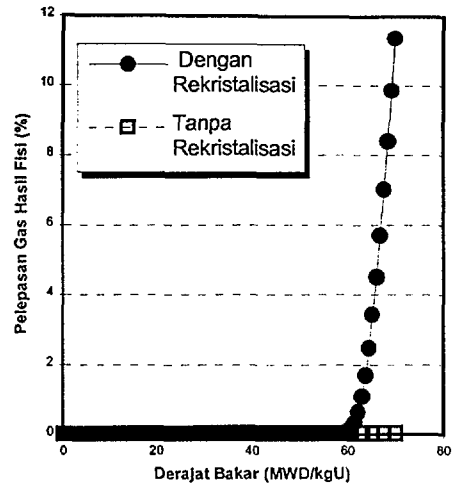
- Pelepasan hasil fisi apakah jumlahnya dipengaruhi oleh luas permukaan butir (ukuran butir) atau jumlah massa uraniumnya?

Bambang Herutomo

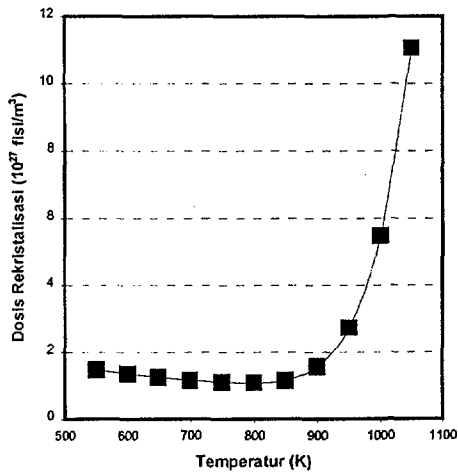
- Pelepasan hasil fisi dari matriks bahan bakar sangat dipengaruhi oleh luas permukaan butir (ukuran butir) yaitu semakin kecil luas permukaan butir maka semakin besar laju pelepasan gas hasil fisi. Selain itu, laju pelepasan gas hasil fisi juga dipengaruhi oleh temperatur operasi bahan bakar (laju pelepasan akan meningkat apabila temperatur naik). Sedangkan jumlah massa Uranium (^{235}U) tidak berpengaruh terhadap pelepasan gas hasil fisi. Akan tetapi, tingkat derajat bakar yang dicapai bahan bakar akan menentukan jumlah (total) gas hasil fisi yang terlepas.



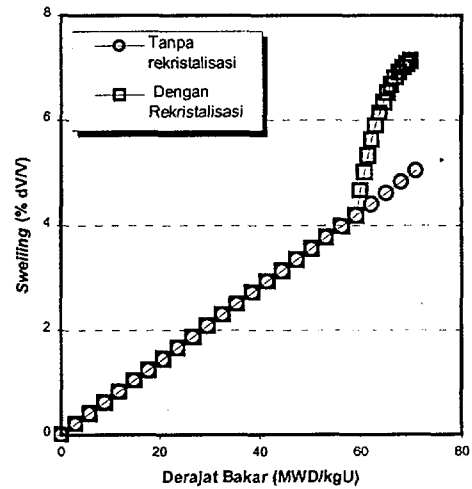
Gambar 1: Dosis rekristalisasi bahan bakar UO₂ sebagai fungsi laju fisi dan temperatur



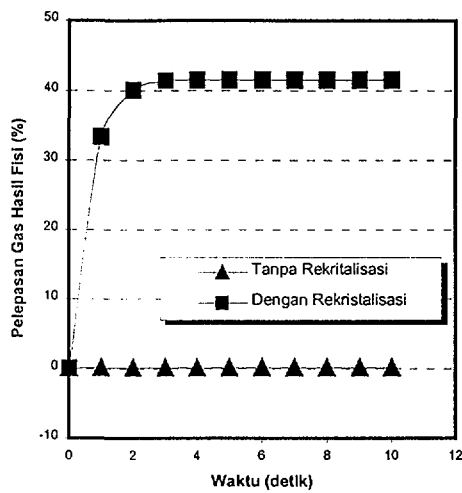
Gambar 3: Efek rekristalisasi terhadap pelepasan gas hasil fisi dari bahan bakar UO₂ (900 K, $2,03 \times 10^{19}$ fisi/m³-s)



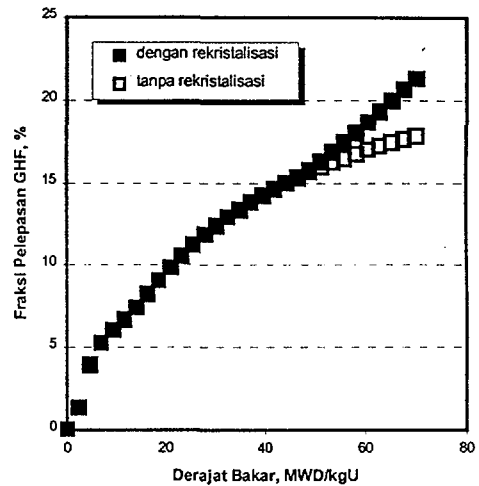
Gambar 2: Dosis rekristalisasi di dalam bahan bakar UO₂ tipe PWR (laju fisi $2,03 \times 10^{19}$ fisi/m³-s) sebagai fungsi temperatur



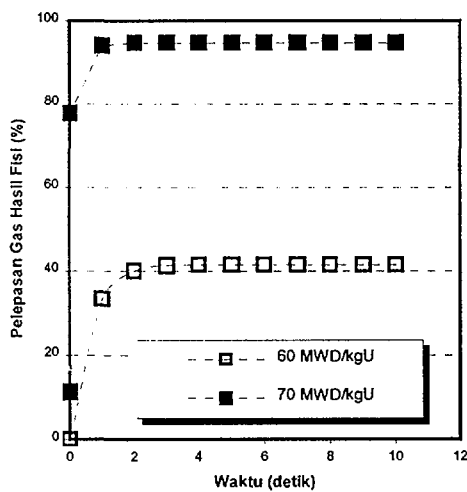
Gambar 4: Efek rekristalisasi terhadap swelling bahan bakar UO₂ (900 K, $2,03 \times 10^{19}$ fisi/m³-s)



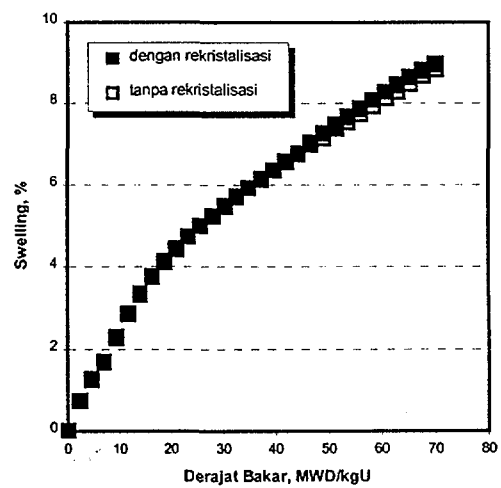
Gambar 5: Efek transien tipe RIA terhadap pelepasan gas hasil fisi dari bahan bakar UO_2 pada derajat bakar 60 MWD/kgU



Gambar 7: Pelepasan gas hasil fisi dari pelet bahan bakar UO_2 tipe PWR ($650 W/cm^3$, $2,03 \times 10^{19}$ fisi/ $m^3 \cdot s$)



Gambar 6: Efek transien tipe RIA terhadap pelepasan gas hasil fisi dari bahan bakar UO_2 yang mengalami rekrystalisasi pada derajat bakar yang berbeda



Gambar 8: Swelling dari pelet bahan bakar UO_2 tipe PWR ($650 W/cm^3$, $2,03 \times 10^{19}$ fisi/ $m^3 \cdot s$)