TINJAUAN UJI PASCA IRADIASI BAHAN BAKAR JENIS *PEBBLE BED* DI INSTALASI RADIOMETALURGI

Antonio Gogo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir
Badan Tenaga Nuklir Nasional, Serpong, Bnaten, Indonesia 15313
antonio@batan.go.id

ABSTRAK

Dalam rangka menyongsong program pembangunan dan pengembangan pabrikasi bahan bakar Reaktor Daya Eksperimental RDE (HTGR) maka dipandang perlu melakukan tinjauan terkait uji pasca iradiasinya di Instalasi Radiometalurgi (IRM). Hasil tinjauan ini diharapkan dapat menjadi masukan untuk kesiapan IRM melakukan uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar RDE jenis *Pebble Bed*. Fasilitas uji pasca iradiasi di IRM memungkinkan untuk penyediaan data unjuk kerja bahan bakar RDE, dengan beberapa hal yang menjadi perhatian, yaitu: penetapan desain kapsul uji untuk *fuel compacts* dan pembongkarannya di *hot cell*, penanganan *coated fuel particles* di *hot cell* dengan sistem vakum, penggunaan kamera dengan pendukungnya yang didesain khusus untuk *coated fuel particles* agar pengaruh radiasi gamma seminimal mungkin serta dilengkapi mekanisme penempatan sampel, gamma spektrometer dengan mekanisme penempatan khusus *coated fuel particles* di depan kolimator. Terkait lisensi, alat uji ketahanan *fuel compacts* (simulasi kecelakaan) seperti CCCTF atau KÜFA memerlukan *hot cell* khusus yang dapat dibangun di *basement* gedung IRM. Observasi terhadap distribusi produk fisi pada penampang lintang *coated fuel particles* dapat dilakukan dengan SEM dan EPMA, yang dirancang khusus untuk material teriradiasi. Energi dispersif spektroskopi sinar-x atau panjang gelombang dispersif spektroskopi sinar-x untuk analisis unsur.

Kata kunci: RDE, bahan bakar nuklir *pebble bed*, uji pasca iradiasi, Instalasi Radiometalurgi.

ABSTRACT

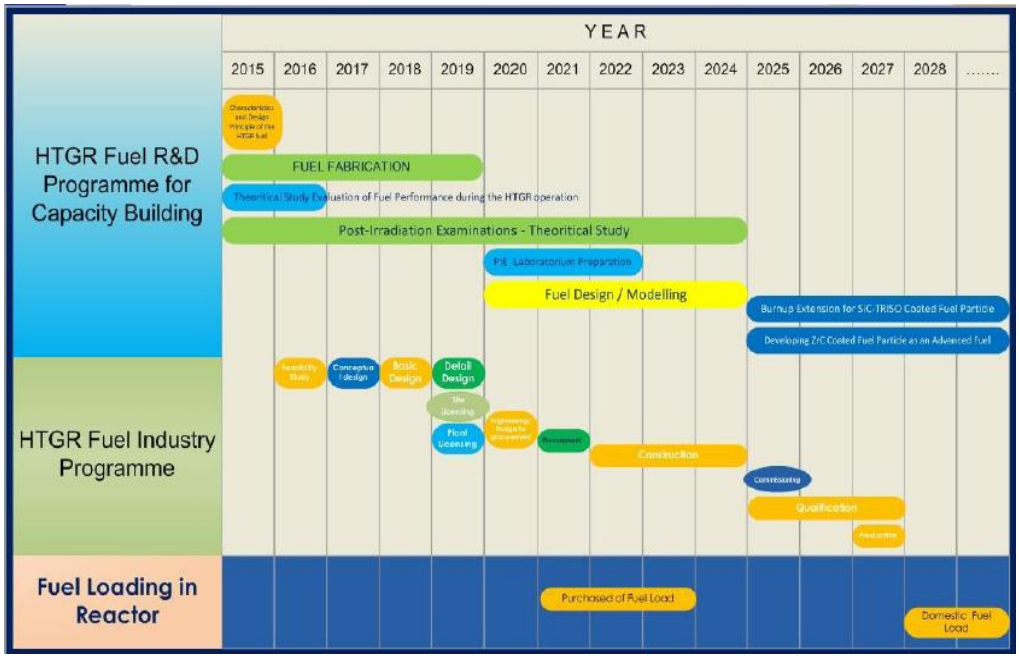
In order to meet the development program of the Experimental Power Reactor (RDE-HTGR) fuel fabrication, it is deemed necessary to conduct a review of the post irradiation examination at Radiometalurgy Installation (RMI). The results of this review are expected to be a suggention for management of RMI in preparation for the post-irradiation examination of RDE fuels Pebble Bed. The post-irradiation examination facility enable for the provision of RDE fuel performance data, with several points of concern: determine of the design of test capsule for fuel compacts and disassembly in hot cells, handling of coated fuel particles in a hot cell with a vacuum system, use of the camera with its supporters specially designed for coated fuel particles to minimize the effect of gamma radiation as well as equipped with sample placement mechanism, gamma spectrometer with special placement mechanism of coated fuel particles in front of collimator. Related to the licenses, fuel compacts durability testing devices such as CCCTF or KÜFA required specic hot cells that can be built in the basement of the IRM building. Observations on the distribution of fission products at cross sectional coated fuel particles can be done with SEM and EPMA, specifically designed for irradiated materials. X-ray dispersive energy spectroscopy or wavelength dispersive x-ray spectroscopy for elemental analysis.

Keywords: Experimental Power Reactor, pebble bed fuel, post irradiatioan examination, Radiometallurgy Installation

I. PENDAHULUAN

Arah Kebijakan dan Strategi BATAN pada Rencana Strategis (Renstra) BATAN Tahun 2015-2019 untuk Fokus Bidang Energi sudah disebutkan bahwa fokus kegiatan penelitian, pengembangan dan pendayagunaan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir di bidang energi adalah penelitian dan pengembangan jenis reaktor daya berpendingin gas temperatur tinggi (HTGR) untuk perancangan dan pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dengan keluaran berupa "Prototipe Reaktor Daya Eksperimental 10 MW" [1]. Program RDE merupakan bagian dari pembentukan peta jalan pengembangan energi nuklir di Indonesia [2]. Pada tanggal 23 Januari 2017, izin tapak pembangunan RDE disetujui oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir [3].

Terkait program RDE, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN-BATAN) mendapat tugas untuk melakukan persiapan pabrikasi bahan bakar RDE. Berbagai kegiatan sedang dan akan dilakukan terkait persiapan pabrikasi bahan bakar RDE tersebut. Peta jalan untuk program tersebut termasuk rencana uji pasca iradiasi disajikan pada Gambar 1. Studi teoritis terkait uji pasca iradiasi bahan bakar RDE dimulai dari tahun 2015 sampai dengan 2024, dan perolehan data hasil uji pasca iradiasi mulai tahun 2025. Uji pasca iradiasi sebagai konfirmasi ketahanan iradiasi dan perolehan data karakterisasi iradiasi dari bahan bakar selama di dalam teras reaktor. Uji pasca iradiasi awal *(preliminary)* dari bahan bakar HTGR dengan sampel bahan bakar kompak teriradiasi juga sebagai konfirmasi terhadap teknik uji pasca iradiasi terpilih. Studi terhadap pilihan teknik uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar RDE perlu dilakukan. Dengan demikian, maka salah satu langkah yang dipandang perlu untuk dilakukan yaitu, melakukan tinjauan terkait persiapan uji pasca iradiasi fasilitas *hot cell* dari Instalasi Radiometalurgi terhadap bahan bakar HTGR jenis *Pebble Bed.* Hasil tinjauan diharapkan dapat menjadi bahan masukan untuk tahap persiapan IRM untuk melakukan uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar RDE jenis *Pebble Bed*. Tinjauan uji pasca iradiasi di IRM untuk RDE ini dilakukan dengan studi literatur khususnya terkait uji pasca iradiasi yang sudah atau sedang dilakukan di negara lain serta dipadukan dengan fasilitas *hot cell* IRM serta pengalaman penulis.



Gambar 1. Roadmap pengembangan pabrikasi bahan bakar RDE [4]

II. POKOK BAHASAN

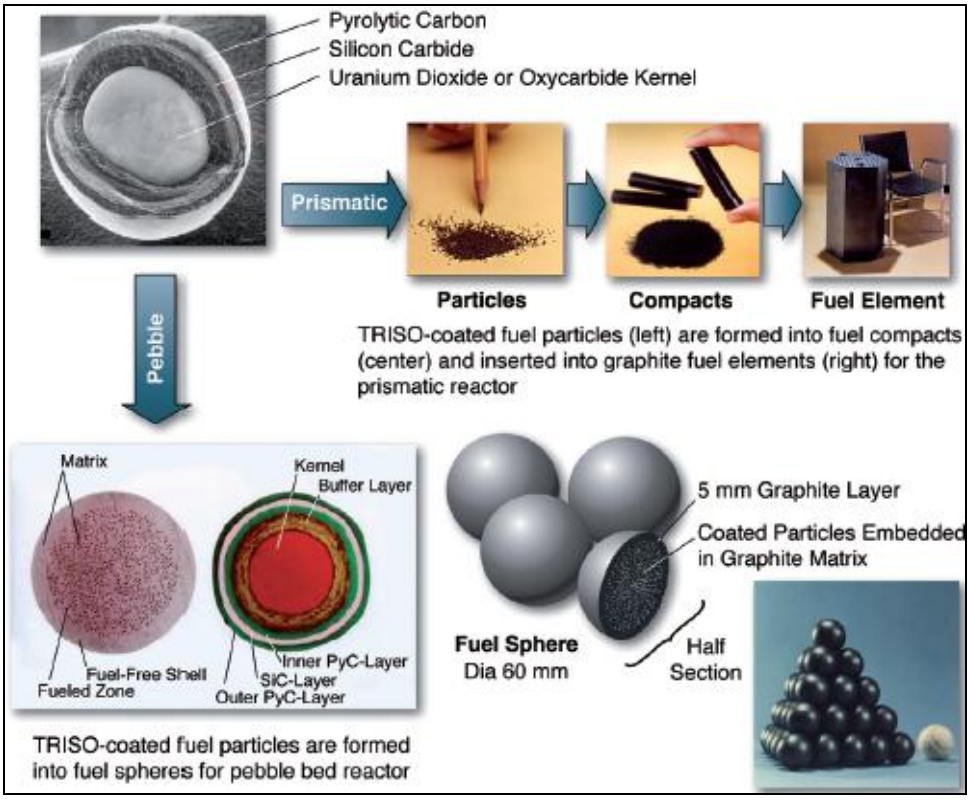
Reaktor Daya Eksperimental

RDE merupakan salah satu jenis reaktor temperatur tinggi berpendingin gas helium yang segera akan dibangun di Indonesia, yang mengacu pada desain dan teknologi HTR-10 di China. RDE dirancang menggunakan bahan bakar kernel partikel berlapis *(coated fuel particles)* TRISO yang berbentuk bola (*pebble*). Dalam operasinya RDE dapat menggunakan bahan bakar kernel uranium dioksida (UO_2), thorium oksida (ThO_2/UO_2) maupun plutonium dioksida (PuO_2) tanpa merubah bentuk dan geometri teras reaktor. Reaktor didesain berdaya termal 10 MWth dengan temperatur keluaran teras sekitar 700 ^oC dan menghasilkan listrik sekitar 3 MWe. Di samping menghasilkan listrik, reaktor ini diharapkan dapat menghasilkan panas dengan temperatur tinggi yang dapat digunakan untuk proses panas industri seperti produksi hidrogen dan pencairan batu-bara [5].

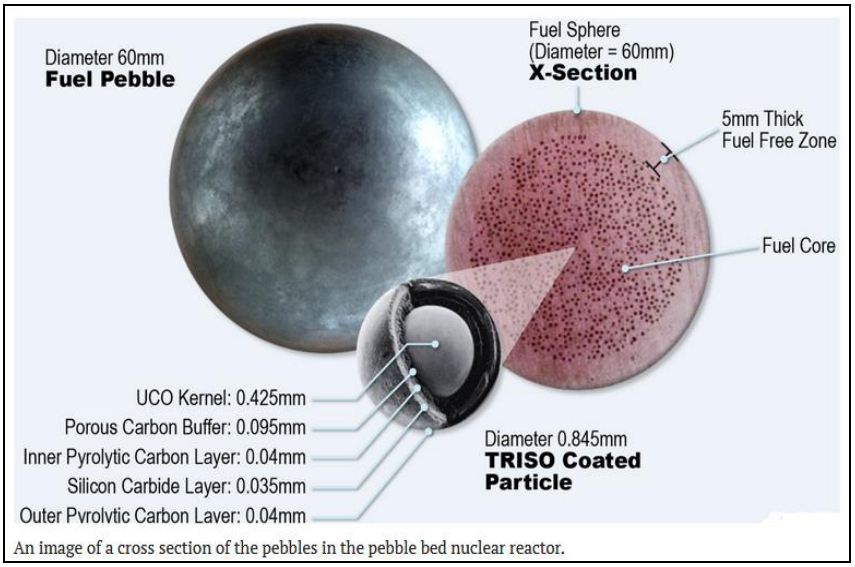
Bahan bakar RDE

Bahan bakar untuk reaktor temperatur tinggi (*HTR -High Temperature Reactor*) pada umumnya tersusun atas partikel bahan bakar yang dikompakkan dengan matrik grafit dalam bentuk bola atau pelet. Setiap partikel bahan bakar tersusun atas bahan fisil berupa bola-bola kecil (kernel) berdiameter sekitar 600 mikron dan lapisan pelindung yang berfungsi menghalangi pelepasan nuklida hasil fisi ke sistem pendingin dan

menghalangi serangan kimia pendingin terhadap kernel bahan bakar. Kernel bahan bakar dapat berupa uranium dioksida (UO_2), campuran uranium dan thorium dioksida $(U+Th)O_2$ maupun campuran UO_2 dengan UC (*Uranium Carbide*). Lapisan pelindung yang dikembangkan pada partikel bahan bakar untuk HTR modern adalah tipe TRISO (*Tri-Isotropic*). Lapisan pelindung ini tersusun atas tiga lapis, yaitu lapis terdalam berupa lapisan pirokarbon kerapatan tinggi (*Inner* PyC/IPyC), lapis tengah berupa lapisan silikon karbida (SiC) dan lapis terluar berupa lapisan pirokarbon kerapatan tinggi (*Outer* PyC/OPyC). Di antara kernel bahan bakar dengan lapisan pelindung terdalam (IPyC) terdapat lapisan *buffer* pirokarbon yang sangat berpori. Fungsi utama lapisan *buffer* adalah sebagai penampung gas hasil fisi yang terlepas dari kernel bahan bakar [6]. Model elemen bakar tipe prismatik, *pebble* dan ilustrasi tampang lintang partikel bahan bakar berpelindung TRISO serta tebal lapisan dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Sistem bahan bakar reaktor temperatur tinggi, menunjukan partikel bahan bakar TRISO di dalam matrik grafit sebagai blok prismatik (kanan atas) atau *pebble* (kanan bawah) [7].



Gambar 3: Tampang lintang dari *pebble* [8]

Uji Pasca Iradiasi

Dasar filosofi keselamatan dari desain bahan bakar nuklir adalah mempertahankan produk fisi tetap ditempatnya, baik pada kondisi operasi normal, selama kondisi kecelakaan, dan selama kondisi penyimpanan jangka panjang [9]. Dalam desain keselamatan bahan bakar HTGR, hal terpenting adalah untuk mempertahankan produk fisi tetap tinggal di dalam patikel sehingga apabila terlepas ke sistem pendingin primer tidak melampaui batas yang dapat diterima. Dari titik pandangan ini, kriteria dasar dari desain bahan bakar adalah untuk meminimalkan fraksi kegagalan lapisan pelapis bahan bakar yang dipabrikasi dan mencegah kegagalan lain yang signifikan dari bahan bakar selama digunakan untuk operasi reaktor [10]. Oleh karena itu, maka salah satu fungsi dari hasil uji pasca iradiasi bahan bakar RDE, adalah untuk mampu menyajikan data terkait kemampuan/kinerja dari bahan bakar dan kemampuan lapisan pelindung TRISO (*Tri-Isotropic*) mempertahankan produk fisi tetap ditempatnya. Hal ini guna memperoleh konfirmasi terhadap kualitas dalam bahan bakar dalam bahan bakar pada kondisi teriradiasi.

Uji pasca iradiasi atau *Post Irradiation Examination* (PIE) dapat menggunakan beberapa teknik uji tak merusak (NDT) dan merusak (DT) untuk karakterisasi kondisi bahan bakar setelah diiradiasi. Teknik tersebut dapat meliputi [11];

- metrologi untuk karakterisasi penyusutan atau *swelling* bahan bakar
- ceramografi optik untuk karakterisasi kondisi kernel dan lapisannya
- SEM dan *microprobe* untuk karakterisasi distribusi dari produk fisi di dalam partikel, termasuk bukti adanya serangan kimia pada lapisan SiC

- pemindai gamma dari bahan bakar dan komponen uji lainnya untuk menentukan migrasi produk fisi, inventori radionuklida dan *burnup*
- analisis kimia via proses *leach-burn-leach* untuk menentukan fraksi kegagalan partikel bahan bakar
- *compact deconsolidation* dan pengukuran spektrum gamma dari produk fisi utama, untuk setiap partikel dengan *Irradiated Microsphere Gamma Analyzer* (IMGA).

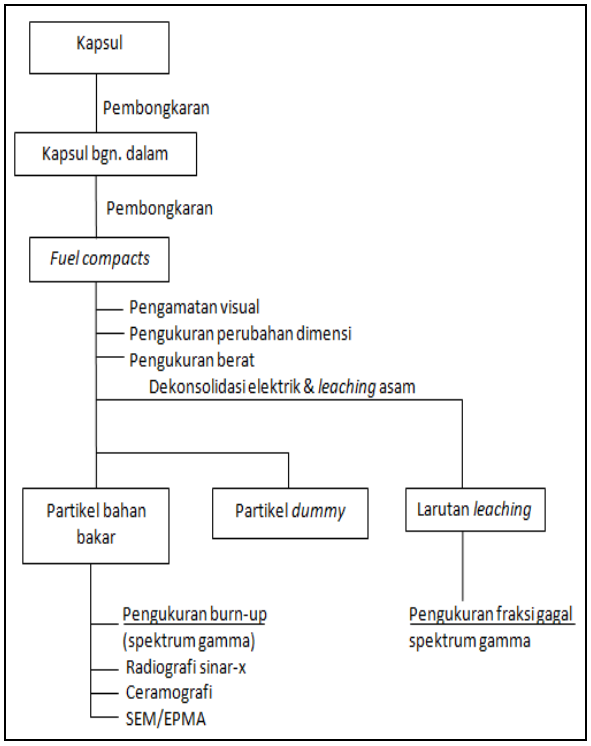
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Program Renstra PTBBN-BATAN 2015-2019, yaitu melaksanakan kegiatan pengembangan teknologi pabrikasi bahan bakar nuklir dan bahan struktur untuk reaktor daya eksperimental. Penetapan keberhasilan pabrikasi tersebut tentu saja melalui tahapan uji kendali kualitas yang sudah ditetapkan, termasuk uji pasca iradiasi.

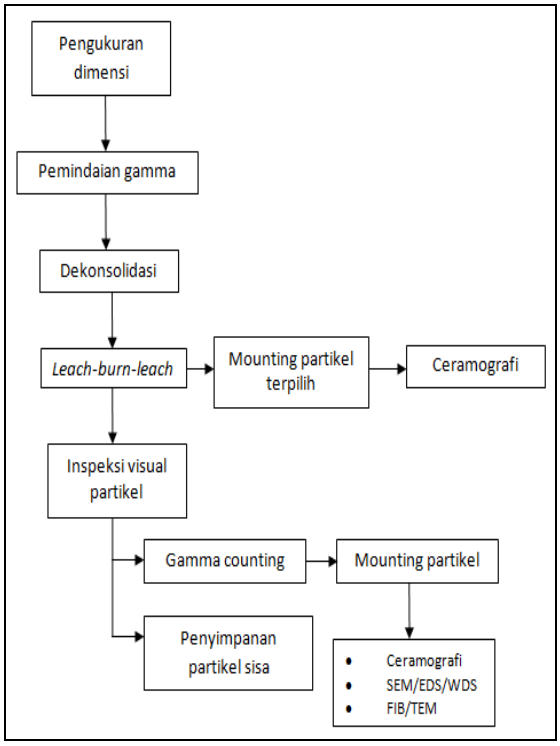
Sebelum digunakan di RDE, bahan bakar hasil pabrikasi akan diuji dengan menggunakan kapsul (*instrumented capsules*) dalam lingkungan radiasi di teras reaktor. Selanjutnya kapsul dengan bahan bakar di dalamnya tersebut dibawa ke *hot cell* IRM untuk dibongkar dan selanjutnya diuji. Contoh proses uji pasca iradiasi untuk bahan bakar *High Temperature Engineering Test Reactor* (HTTR) jenis bahan bakar *pin-in-block* yang menggunakan kapsul disajikan pada Gambar 4. Proses uji pasca iradiasi bahan bakar jenis *pin-in-block* dan *pebble* relatif sama. Proses uji pasca iradiasi dengan bahan bakar di dalam kapsul dapat juga sebagai evaluasi terhadap teknik/metoda uji pasca iradiasi yang akan digunakan. Dengan teknik/metoda uji pasca iradiasi yang sudah ditetapkan dan bahan bakar yang sudah digunakan di teras RDE, maka alur proses uji pasca iradiasi dapat mengikuti alur proses uji seperti pada Gambar 5.

Penerimaan kapsul/ bahan bakar

Peralatan untuk penanganan proses penerimaan kapsul/bahan bakar harus disesuaikan dengan dimensi kapsul atau wadah bahan bakar. Apabila kapsul bahan bakar RDE diiradiasi di PRSG maupun dari reaktor lain, maka proses penerimaan ke *hot cell* 101 IRM menggunakan jalur Kanal Hubung Instalasi Penyimpan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3). Antisipasi terhadap hal ini, desain kapsul perlu ditetapkan termasuk wadah transfer bahan bakar RDE sehingga peralatan penanganan transfer dapat ditetapkan.



Gambar 4. Contoh diagram alir PIE dengan kapsul [12]



Gambar 5. Contoh diagram alir PIE [15]

Pembongkaran kapsul

Setelah desain kapsul ditetapkan, maka proses/teknik pembongkarannya juga dapat ditetapkan. *Electrical saw blade* kecil yang dapat dipegang dengan manipulator dapat menjadi pilihan untuk proses pembongkaran kapsul. *Clamping device* pada *transport trolley hot cell* 102/103 dapat menjadi pilihan sebagai alat penjepit/pemegang kapsul selama proses pembongkaran. Limbah padat tak dapat bakar dari kapsul dapat langsung dikumpulkan dan dimasukan ke wadah khusus, sebelum dimasukan ke *waste barrel* di *hot cell* 102.

Fuel compacts

Setelah pembongkaran kapsul, maka proses uji pasca iradiasi terhadap *fuel compacts* (*pebbles*) sama antara proses pada Gambar 4 dan Gambar 5.

- Pengukuran perubahan dimensi

  Diketahui bahwa komposisi akan memiliki pengaruh pada tingkat penyusutan bahan bakar kompak selama iradiasi. Pengukuran perubahan dimensi *fuel compacts* dapat dilakukan dengan mikrometer dengan *flat head* atau dengan mikrometer laser [9]. Pengukuran perubahan dimensi ini dapat dilakukan di *hot cell* 103.

- Pengamatan visual

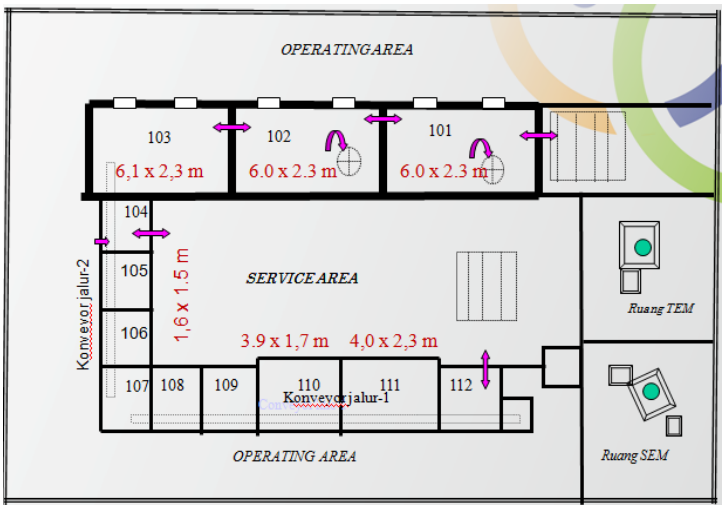
  Pengamatan visual terhadap *fuel compacts* dapat dilakukan dengan periskop di *hot cell* 102 sedangkan untuk *coated fuel particles* (diameter ± 1 mm) dengan kamera dan alat *handling* tertentu yang dapat ditempatkan juga di *hot cell* 103 (Gambar 6).

- Ukur berat

  Jika jumlah impuritas signifikan ada dalam *sweep gas* (helium), massa dari matriks *fuel compacts* akan hilang oleh oksidasi selama iradiasi. Untuk mengkonfirmasi kondisi dari sampel selama iradiasi, berat *fuel compacts* diukur dengan *electrical balance* yang dapat ditempatkan di dalam *hot cell* 103.

- Ukur *burn-up*

  Setelah proses *acid leaching,* pengukuran spektrum gamma *dari coated fuel particles* dilakukan untuk evaluasi *burn-up* dari *fuel compacts*. Radioaktivitas ^{137}Cs di dalam *coated fuel particles* dari setiap *fuel compact* dapat diperoleh dengan detektor HpGe.



Gambar 6. *Layout hot cell* IRM

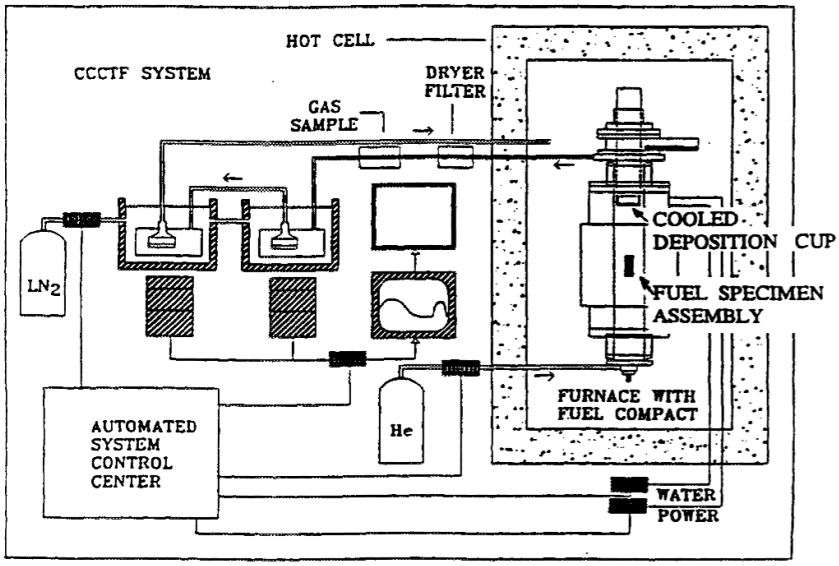
Kondisi kecelakaan

Penyediaan data dari unjuk kerja bahan bakar HTGR harus diuji secara eksperimen terutama mengenai pengaruh suhu yang lebih tinggi terhadap bahan bakar pada interaksi produk fisi dengan lapisan SiC yang menyebabkan degradasi bahan bakar dan pelepasan produk fisi.

Beberapa fasilitas uji yang sudah digunakan untuk mengetahui pengaruh suhu yang lebih tinggi terhadap integritas bahan bakar, antara lain:

- *Core Conduction Cooldown Test Facility* (CCCTF) [9]

  CCCTF (Gambar 7) dirancang dan dibangun di ORNL pada tahun 1992. CCCTF merupakan tungku suhu tinggi (800 sampai 2000 °C) yang mengukur lepasan gas produk fisi dari bahan bakar HTGR. Fasilitas tersebut dapat digunakan untuk simulasi respon bahan bakar terhadap kecelakaan akibat panas berlebih pada inti dengan kondisi tidak adanya oksidasi. CCCTF dapat juga untuk mensimulasi adanya oksidasi yaitu, dengan adanya uap air atau udara.

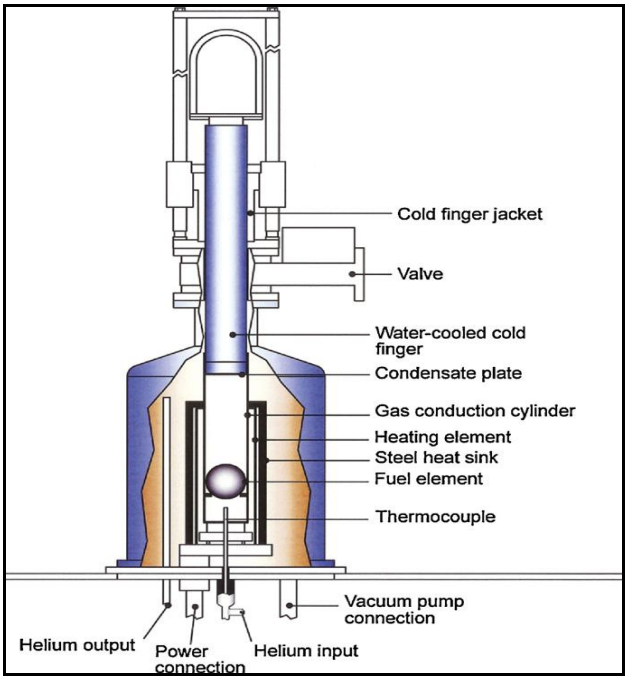


Gambar 7. Layout instalasi CCCTF [9]

- KÜFA [13]

  KÜFA (singkatan bahasa Jerman “Kühlfingeranlage”) adalah peralatan eksperimental untuk *spherical HTR fuel elements* dapat dipanaskan hingga temperatur 1800 ^{0}C pada *ambient pressure* dengan suasana gas Helium. Selama proses pemanasan, lepasan gas fisi dan produk fisi yang *volatile* dapat diukur. Pelepasan gas hasil fisi selama iradiasi merupakan indikator penting untuk menentukan kinerja bahan bakar dan kualitas pada kondisi operasional, dan merupakan bagian penting dari kualifikasi bahan bakar. Uji pemanasan (Fasilitas KÜFA, Gambar 8) adalah untuk menunjukkan integritas dan kinerja yang tepat dari bahan bakar HTGR pasca iradiasi pada kondisi kecelakaan. Sasaran utama dari penggunaan KÜFA adalah untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar pada kondisi kecelakaan pada temperatur tinggi karena integritas dari *coated particles* pada temperatur tinggi merupakan bagian yang sangat penting aspek keselamatan untuk reaktor temperatur tinggi. Secara khusus, tiga

kondisi lingkungan uji yaitu dengan, helium, udara dan uap. Temperatur bervariasi dari 1300 ^{o}C s/d 1800 ^{o}C direncanakan untuk menentukan respon kecelakaan dan penetapan batasan dari bahan bakar. Bahan bakar TRISO teriradiasi diekspos dalam kondisi tersebut selama 500 jam. Fasilitas eksperimen terdiri dari *furnace* dengan aliran gas untuk menjaga spesimen bahan bakar pada temperatur tertentu dengan sebuah *cold finger* sebagai perangkap produk fisi yang terkondensasi dan sebuah *cold trap* sebagai perangkap gas fisi. *Cold finger* dan *cold trap* dianalisis menggunakan spektroskopi gamma, dan *cold finger* dapat juga dilarutkan untuk analisis radiokimia.

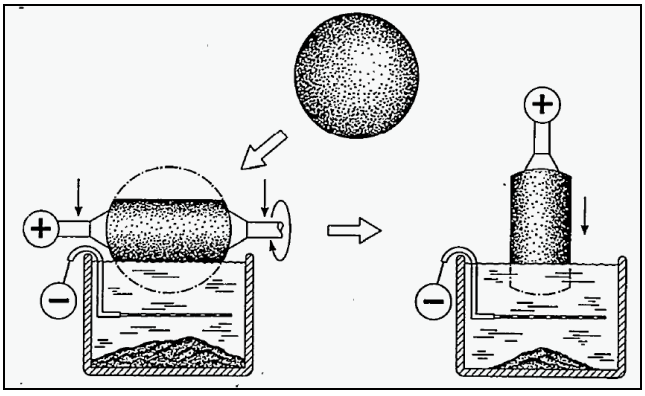


Gambar 8. Skema KÜFA di JRC-ITU[13]

Penggunaan CCTF maupun KÜFA memerlukan *hot cell* tersendiri dan dengan instalasi yang cukup rumit. Fasilitas di *basement* dari gedung IRM dapat dimanfaatkan untuk pembangunan *hot cell* baru untuk CCTF atau KÜFA atau dapat juga dalam bentuk kerjasama dengan *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) terkait penggunaan CCCTF atau dengan *The Joint Research Centre of Institute for Transuranium Elements, JRC-ITU* Karlsruhe (KÜFA).

Dekonsolidasi bahan bakar

Partikel dari bahan bakar berbentuk bola dapat diperoleh dengan proses *electric deconsolidation* (Gambar 9). Proses dekonsolidasi meliputi pencelupan bagian atas dan bawah dari bola untuk mendapatkan bentuk silinder, selanjutnya diputar 90^o dan diturunkan ke dalam larutan elektrolit berupa konsentrat asam nitrat dan penggunaan arus listrik (sekitar 7 volts pada 1 s/d 1,5 A untuk menjaga daya diantara 7 s/d 10 watt) melalui anoda yang dipasangkan di bagian atas bahan bakar, dan katoda dimasukkan ke dalam larutan. Proses dilakukan dengan menggunakan *tube quartz* sebagai wadah proses dengan bagian dasar berupa pelat berlubang. Hasil dari penggunaan arus listrik berupa oksidasi elektrolitik dan disintegrasi dari matrik karbon dari bahan bakar, yang menyebabkan partikel terlepas jatuh melewati pelat berlubang ke dalam cairan elektrolit. Partikel dikumpulkan, dipisahkan dari bagian lainnya yang lebih besar melalui proses penyaringan [15].



Gambar 9. Skema dekonsolidasi bahan bakar bola di KFA Juelich [14]

Proses dekonsolidasi dapat dilakukan di *hot cell* 102 atau 109. Penyediaan larutan elektrolit dan penanganan sisa larutan elektrolit agar menjadi perhatian khusus, terlebih di *hot cell* 102, sementara *hot cell* 109 memang dirancang untuk proses pelarutan yang menggunakan cairan tertentu. Keuntungan dilakukan di *hot cell* 102, *coated fuel particles* yang diperoleh dapat dilanjutkan dengan pengamatan visual 103 dengan kamera khusus seperti pada Gambar 12 dan gamma spektrometer seperti pada Gambar 11.

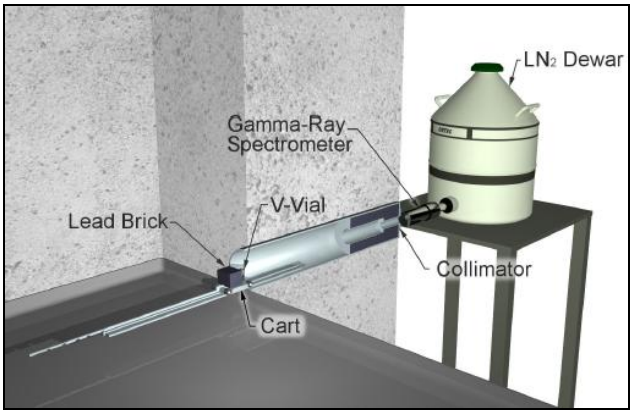
Coated fuel particles

Setelah proses *electric deconsolidation* dan *acid leaching* maka *coated fuel particles* dapat diperoleh. Spektrum gamma dari larutan hasil proses *leaching* dapat diukur, untuk mengetahui fraksi kegagalan dari setiap *fuel compacts* dan hasil tersebut

dapat dikombinasikan dengan radiograf hasil radiografi sinar-x yang ditempatkan di *hot cell* 103. Perolehan data untuk observasi/investigasi lebih lanjut dapat berupa data distribusi produk fisi pada penampang lintang *coated fuel particles*, ceramografi, SEM dan EPMA, yang telah dirancang khusus untuk sampel berupa material teriradiasi. Analisis unsur dapat menggunakan energi dispersif spektroskopi sinar-x atau panjang gelombang dispersif spektroskopi sinar-x.

Spektrometer gamma untuk pengukuran spektrum gamma dari bahan bakar dapat dapat ditempatkan di *hot cell* 103. Kereta pembawa *coated fuel particles* dan penempatan satu butir tepat di depan celah kolimator agar dirancang khusus (Gambar 11). Posisi objek ukur spektrum gamma di *hot cell* 103 sudah dirancang khusus agar tidak dipengaruhi radiasi gamma dari dalam *hot cell*.

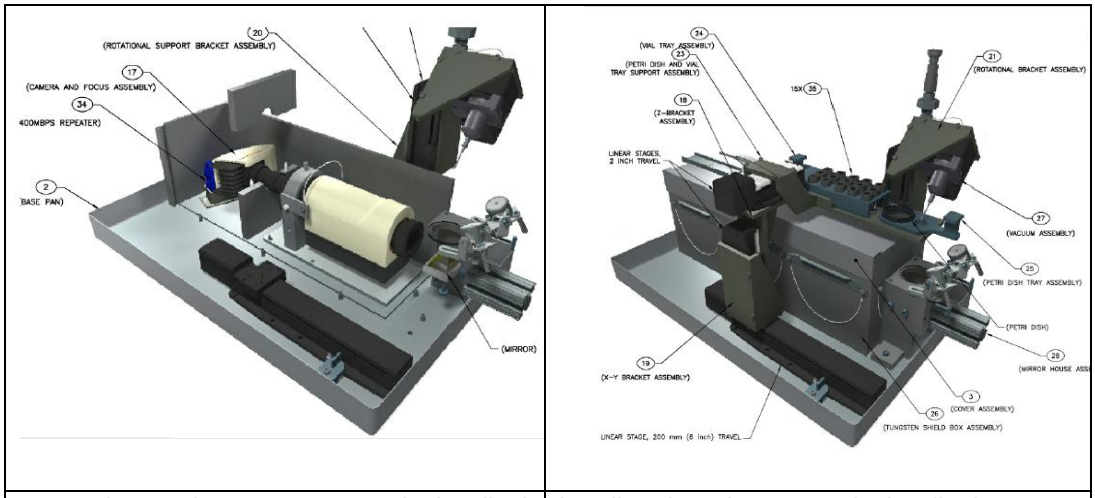
Gambar 10. *Coated fuel particles* dapat ditangani dengan penghisap berupa ujung jarum berlubang [15]



Gambar 11. Contoh gamma spektrometer untuk *coated fuel particles* [15]

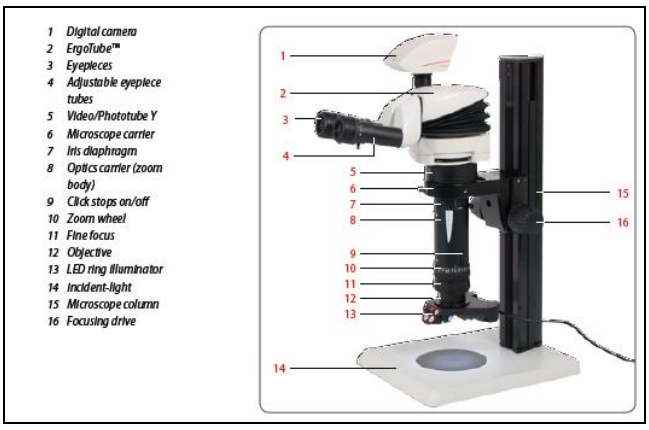
- Ceramografi dan pengamatan visual

  Sebagian potongan dari sampel *fuel compacts* dapat dipreparasi dan di-*mounting* di *hot cell* 104 dan 105 serta pengamatan secara visual terhadap penampang *coated fuel particles* dengan mikroskop optik di *hot cell* 107 (ceramografi). *Coated fuel particles* (diameter ± 1 mm) dapat juga diamati dengan kamera khusus (*digital microscope camera*). Kamera yang digunakan merupakan bagian dari kelengkapan mikroskop (Gambar 12 dan Gambar 13) yang dimodifikasi agar pengaruh radiasi gamma seminimal mungkin serta dilengkapi mekanisme penempatan sampel, yang dapat ditempatkan di *hot cell* 103. Alat *handling* khusus dengan sistem vakum, dapat digunakan untuk penanganan *coated fuel particles* di dalam *hot cell* dan ditempatkan di *hot cell* 102, 103, 104 dan 109.



a. Pandangan kamera tanpa perisai radiasi	b. Mikroskop dengan perisai radiasi

Gambar 12. Modifikasi kamera Leica untuk inspeksi visual *coated fuel particles*[15]



Gambar 13. Kamera Leica seri Z [16]

Peralatan uji lainnya

Terkait dengan aspek keselamatan, maka perlu ada fasilitas dan proses untuk mengukur unjuk kerja TRISO pada kondisi operasi normal dan kecelakaan. Kegiatan ini sebagai umpan balik kepada pihak pembuat bahan bakar terkait unjuk kerja kernel, pelapis dan *fuel compacts*. Data dari uji pasca iradiasi dan uji kecelakaan menjadi pelengkap pengukuran di teras reaktor sesuai kebutuhan untuk mendemontrasikan pemenuhan persyaratan ujuk kerja bahan bakar dan guna mendukung pengembangan dan validasi dari *computer codes*. Teknik uji tak merusak (NDT) dan uji merusak (DT) juga dapat dilakukan terhadap bahan bakar setelah diiradiasi dan setelah uji keselamatan. Teknik tersebut meliputi;

- pemindaian dan mikro analisis dengan mikroskop elektron (SEM) untuk karakterisasi distribusi produk fisi di dalam partikel, termasuk fakta adanya serangan kimia pada lapisan SiC;
- analisis kimia melalui proses *leach-burn-leach* guna menentukan fraksi kegagalan *coated fuel-particle,* dapat dilakukan di *hot cell* 109 serta laboratorium pendukung lainnya (R-135).

III. KESIMPULAN

Adanya Rencana pembangunan RDE dan pabrikasi bahan bakar RDE maka perolehan data uji pasca iradiasi terkait ketahanan, integritas dan kinerja bahan bakar baik dalam kondisi operasi normal maupun simulasi kondisi kecelakaan diperlukan guna perolehan lisensi penggunaan bahan bakar tersebut maupun operasi RDE. Fasilitas uji pasca iradiasi di IRM memungkinkan untuk penyediaan data tersebut dengan beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu: desain kapsul uji untuk *fuel compacts* dan pembongkarannya di *hot cell*, penanganan *coated fuel particles* di *hot cell* dengan sistem vakum, penggunaan kamera dengan pendukungnya yang didesain khusus untuk *coated fuel particles* agar pengaruh radiasi gamma seminimal mungkin serta dilengkapi mekanisme penempatan sampel, gamma spektrometer dengan mekanisme penempatan khusus *coated fuel particles* di depan kolimator. Alat uji ketahanan *fuel compacts* (simulasi kecelakaan) seperti CCCTF atau KÜFA memerlukan *hot cell* khusus yang dapat dibangun di *basement* gedung IRM. Observasi terhadap distribusi produk fisi pada penampang lintang *coated fuel particles* dapat dilakukan dengan SEM dan EPMA. Kedua alat ini dirancang khusus untuk sampel berupa material teriradiasi. Analisis unsur dapat menggunakan energi dispersif spektroskopi sinar-x atau panjang gelombang dispersif spektroskopi sinar-x.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Batan, Peraturan Kepala BATAN No.6 Tahun 2017 tentang Rencana Strategis BATAN Tahun 2015-2019, Jakarta.

[2] http://ebtke.esdm.go.id/post/2016/07/18/1282/pemerintah.susun.peta.jalan.pengembangan.nuklir. (diakses tanggal 12 Desember 2017)

[3] www.batan.go.id, (diakses tanggal 7 Februari 2017)

[4] Sunaryo, Geni Rina, RDE-Indonesia, IAEA Technical Meeting on the Status of Deep Burn Concepts for HTGR, IAEA HQ, Vienna, 7–9 December 2015, https://www.iaea.org/ NuclearPower/Downloadable/Meetings/2015/2015-12-07-12-09NPTDS /TM_Deep_Burn/A03_RDE_STATUS_GENI.pdf (diakses tanggal 22 Mei 2017).

[5] Suwoto dkk., Analisis Kuat Sumber Neutron dan Perhitungan Laju Dosis Neutron Teras Awal RDE, Urania Vol. 23 No. 1, Februari 2017: 1 - 68, p ISSN 0852−4777; e ISSN 2528- 0473.

[6] Herutomo, Bambang dan Yulianto, Tri. Model Evaluasi Kemampuan Lapisan Pelindung pada Partikel Bahan Bakar Dalam menahan Tekanan Gas Internal, Prosiding Presentasi Ilmiah DaurBahan BakarNuklir V, P2TBDU dan P2BGN-BATAN, Jakarta, 22 Pebruari 2000.

[7] Allen Todd. et al., “Materials challenges for nuclear systems”, Volume 13 | Number 12 *Elsevier ISSN:13697021.*Desember 2010. http (diakses tanggal 8 Agustus 2017).

[8] http://fortune.com/2016/02/04/nuclear-startup-x-energy (diakses tanggal 22 Mei 2017)

[9] IAEATECDOC-978, Fuel Performance and Fission Product Behavior in Gas Cooled Reactors, International Atomic Energy Agency, November 1997. (p. 125, 174-177).

[10] Kazuhiro SAWA et.al., R&D Status and Requirements for PIE in the Fields of the HTGR Fuel and the Innovative Basic Research on HIGH-Temperature Engineering, JAERI-Conf 99-0, JP9950653, September 1999.

[11] Idaho National Laboratory, NGNP Research and Development Status INL/EXT-10-19259 Revision 0 August 2010. http https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/989883 (diakses tanggal 22 Mei 2017).

[12] Shohei UETA , et.al., Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44, No. 8, p. 1081–1088 (2007).

[13] D. Freis et al, Accident testing of high-temperature reactor fuel elements from the HFR-EU1bis Irradiation, Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 2813– 2821, 16 May 2011.

[14] C.A Baldwin and M. J. Kania, IMGA Examination of Set #4 Fuel Under Project Work Statement FD-20 DOE-HTGR-8 8 3 8 1 ORNL/TM-11455 'Distribution Category UC-522', March 1990.

[15] Paul A. Demkowicz et al, AGR-1 Compact 4-1-1 Post-Irradiation Examination Results, Idaho National Laboratory Advanced Reactor Technologies Technology Development Office Idaho Falls, Idaho 83415 INL/EXT-15-36169, February 2016.

[16] Leica Micro System GmbH, User manual Leica Z6 dan Z16 APO, 2013. https://www.leica-microsystems.com/fileadmin/downloads/Leica%20Z16%20APO%20A/User%20Manuals/Leica_Z6-Z16APO-A_Manual_EN.pdf (diakses tanggal 07 Maret 2017).