

METODE UJI TAK MERUSAK UNTUK UJI PASCA IRADIASI

Antonio Gogo, Jan Setiawan, Helmi Fauzi, Muhammad Fauzi
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

Penentuan metode uji tak merusak untuk uji pasca iradiasi telah dilakukan. Uji tak merusak merupakan tahap awal dari proses uji pasca iradiasi untuk mengetahui unjuk kerja dari bahan bakar nuklir. Bahan bakar nuklir yang akan diuji berupa pelat bahan bakar dan *short pin* dari *PWR fuel*. Uji tak merusak akan dilakukan di *hot cell* RSG-GAS dan IRM. Metode yang dipilih mampu; mendeteksi cacat pada permukaan atau sub permukaan, mengukur spektrum gamma, menyajikan data "visual" untuk observasi integritas, mengukur tebal atau diameter dari PEB maupun *short pin* PWR. Metode uji tak merusak di *hot cell* RSG-GAS adalah pengamatan secara visual dan pengambilan gambar, pengukuran tebal atau diameter serta kelengkungan, dan pengukuran spektrum gamma. Pengamatan cacat permukaan dan sub permukaan dengan ultrasonik dan *Eddy current* serta X-ray radiografi ("visual") dilakukan di *hot cell* IRM. Proses uji merusak seperti metalografi atau ceramografi dan uji fisiko-kimia serta uji sifat mekanik juga dilakukan di *hot cell* IRM.

Kata Kunci: uji pasca iradiasi, uji tak merusak, pelat elemen bakar nuklir, *short pin* PWR.

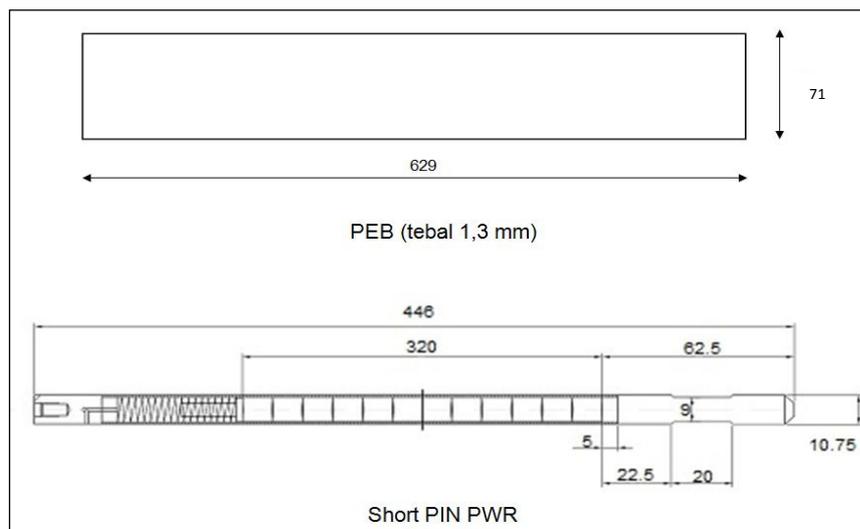
PENDAHULUAN

Uji Tak Merusak (UTM) digunakan pada eksperimen uji pada elemen bahan bakar nuklir pasca iradiasi. Pengujian tersebut merupakan pengujian awal dari rangkaian uji pasca iradiasi yang juga mencakup uji merusak. UTM terhadap bahan bakar pasca iradiasi dapat terdiri dari beberapa metode. Metode yang dipilih disesuaikan dengan kebutuhan data yang hendak diperoleh dan pertimbangan aspek ekonominya. Data UTM yang diperoleh dievaluasi atau dikomparasi dengan data pra iradiasi dan saling dikorelasikan untuk dapat memperoleh kesimpulan sementara tentang kinerja bahan bakar. Kinerja bahan bakar secara menyeluruh dapat disimpulkan setelah diperoleh data Uji Merusak (UM) lainnya, seperti: data mikrostruktur (metalografi/ ceramografi), data uji fisiko-kimia (*burn-up* analisis dan lainnya) serta data uji sifat mekanik. Korelasi antar data UTM dengan data UM sangat membantu dalam menyimpulkan kinerja suatu bahan bakar sehingga dapat digunakan pihak pabrikator bahan bakar untuk evaluasi aspek keselamatan dan aspek ekonomi.

Desain awal fasilitas UTM di *hot cell* IRM untuk benda uji berbentuk *rod* terutama untuk uji gamma *scanning*, *Eddy current*, ultrasonik dan X-ray radiografi. Hal ini juga yang menjadi pertimbangan utama untuk mencari kemungkinan melakukan UTM untuk bahan bakar berbentuk pelat di *hot cell* RSG-GAS guna mendukung litbang bahan bakar dispersi untuk reaktor riset dengan pengayaan rendah. *Hot cell* RSG-GAS juga dirancang untuk dapat melakukan pengukuran spektrum gamma dengan tersedianya kolimator untuk

detektor gamma serta perangkat untuk pemegang bundel elemen bakar RSG-GAS (*MTR-fuel*) yang dapat digerakan secara teratur (dengan program). Kondisi tingkat paparan dan kontaminasi di *hot cell* RSG-GAS rendah sehingga keperluan untuk melakukan persiapan UTM seperti gamma spektrometri maupun pengukuran tebal pelat dapat dilakukan. Pengamatan visual dapat dilakukan melalui jendela *hot cell* langsung, dan perekaman gambar dilakukan dengan kamera biasa. Pengamatan visual serta pengambilan gambar di *hot cell* RSG-GAS juga dimaksudkan untuk menjaga originalitas data pengamatan, sebelum dikirim ke *hot cell* IRM. Di *hot cell* IRM proses uji pasca iradiasi dapat dilanjutkan dengan investigasi cacat permukaan atau sub permukaan dengan ultrasonik atau *Eddy current* serta dilengkapi dengan data "visual" x-ray radiografi.

Dari kegiatan sebelumnya telah ditetapkan pengujian bahan bakar pelat di IRM tidak lagi dalam satuan bundel/ berkas, tetapi hanya berupa pelat (PEB) dan untuk jenis batang/ *rod* hanya berupa *short pin PWR*. Kedua bentuk dan dimensi dari objek uji pasca iradiasi elemen bakar nuklir tersebut disajikan pada Gambar 1. Dengan demikian maka peralatan uji pasca iradiasi termasuk peralatan UTM akan menyesuaikan dengan bentuk dan dimensi dari objek uji.



Gambar 1: Dimensi PEB dan *short pin* PWR (dalam mm)
Bentuk dan dimensi PEB dan *short pin* PWR

Tulisan ini membahas tentang penentuan metode uji tak merusak dari proses uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar pasca iradiasi dengan bentuk dan ukuran sesuai Gambar 1, sebagai pertanggungjawaban dari penulis untuk kegiatan tahun 2015.

METODOLOGI

Uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar nuklir merupakan upaya untuk mengetahui keandalan atau kinerja bahan bakar itu sendiri setelah digunakan di reaktor (diiradiasi). Kelongsong atau *cladding* dari bahan bakar merupakan *barrier* pertama dari pertahanan berlapis. Keutuhan/integritas harus tetap terjaga selama diiradiasi maupun saat disimpan pasca iradiasi. Ciri dari keutuhan tersebut antara lain, tidak adanya cacat pada permukaan maupun sub permukaan, spektrum gamma masih dalam distribusi normal, tidak adanya perubahan dimensi yang signifikan dan sebagainya. Hal ini sudah diperoleh pada awal proses uji pasca iradiasi (UTM) sehingga cacat atau anomali lainnya sudah dapat diketahui sehingga lokasi yang akan dicuplik (*sampling*) dapat ditentukan, untuk proses uji pasca iradiasi selanjutnya. Uji tak merusak dalam proses uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar nuklir dapat digunakan untuk:

1. memastikan adanya cacat permukaan dan sub permukaan;
2. menyajikan data "visual", untuk melihat keutuhan/integritas struktur *cladding* dan bahan bakar;
3. menyajikan data hasil pengukuran spektrum gamma;
4. menyajikan data hasil pengukuran dimensi terutama tebal untuk PEB dan diameter untuk *rod*.

Dimensi dan bentuk dari objek uji serta kondisi *hot cell* dengan kelengkapannya juga dijadikan pertimbangan dalam menentukan metode UTM yang akan dipilih.

TEORI^[1]

Fenomena gas fisi, tidak hanya mengenai lepasannya saja, tetapi termasuk seluruh urutan proses penyebabnya, sudah dimodelkan dalam *code* kinerja bahan bakar. Kehadiran produk fisi gas dapat menyebabkan pembengkakan bahan bakar yang cepat selama *power transients*, dan hal ini dapat menyebabkan PCI dan kegagalan *rod* bahan bakar. Pada *burnup* tinggi, kuantitas gas yang dilepaskan dapat menimbulkan tekanan yang melebihi batas aman. Pemodelan efek PCI selama operasi *transient* juga merupakan objek penelitian bagi banyak kelompok penelitian. Aspek lain yang dapat terjadi pada *cladding* bahan bakar, yaitu korosi dan hidridisasi. Konfirmasi terhadap pemodelan tersebut perlu dilakukan dengan eksperimen. Dengan demikian metode uji/pengukuran eksperimental yang memadai perlu disiapkan.

Pola distribusi radionuklida juga dapat mengindikasikan unjuk kerja elemen bakar nuklir selama digunakan di reaktor. Pola distribusi dari radionuklida tertentu seperti Cs-134 dan Cs-137 dapat juga mengindikasikan pembelahan yang terjadi secara normal atau tidak. Ketidak sesuaian pembelahan dapat menimbulkan pemanasan lokal yang

berlebih. Pola distribusi ini dapat diperoleh dengan pengukuran spektrum gamma dari elemen bakar uji. Pada umumnya penentuan distribusi hasil belah bahan bakar nuklir dilakukan dengan menggunakan spektrometer gamma. Pengamatan yang dilakukan dengan cara manual, yaitu mengkombinasikan antara gerak elemen bakar dan pengamatan spektrum gamma untuk mencacah aktifitas radionuklida pemancar radiasi gamma. Prinsip kerja alat Spektrometer Gamma berdasarkan identifikasi spektrum energi dari radiasi sinar gamma yang dipancarkan oleh bahan radioaktif yang dianalisis. Spektrum radiasi tersebut dapat menunjukkan nilai intensitas pada setiap tingkat energi sehingga puncak energi dari radiasi sinar gamma yang datang dapat ditentukan.

Aspek penting kinerja bahan bakar yang perlu diperhatikan dalam peningkatan derajat bakar adalah penambahan volume bahan bakar (*swelling*) yang berakibat pada bertambahnya ketebalan pelat bahan bakar. *Swelling* pada bahan bakar dispersi terutama disebabkan oleh akumulasi hasil fisi, baik gas maupun padat, dan fasa hasil interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar dengan matrik aluminium. Mengingat lebar saluran pendingin di antara dua pelat bahan bakar RSG-GAS hanya sekitar 2,55 mm, maka pertambahan ketebalan yang terjadi pada pelat bahan bakar dikhawatirkan akan mengganggu aliran pendingin yang menyebabkan kenaikan temperatur operasi bahan bakar. *Swelling* juga menyebabkan perubahan konduktivitas panas daging bahan bakar. Kenaikan temperatur bahan bakar akan memperbesar laju *swelling* sehingga pelat bahan bakar semakin bertambah tebal dan gangguan terhadap aliran pendingin juga meningkat (berlangsung *feedback effect*). *Swelling* yang berlebihan dapat merusak integritas kelongsong sehingga hasil fisi dapat terlepas ke pendingin atau lingkungan ^[2]. Pengamatan visual serta pengukuran tebal terhadap PEB uji dapat membuktikan adanya *swelling* atau tidak.

Uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar nuklir merupakan upaya untuk mengetahui keandalan atau kinerja bahan bakar itu sendiri setelah digunakan di reaktor (diiradiasi). Data pabrikan (spesifikasi dan uji pra iradiasi) serta riwayat di teras reaktor sangat diperlukan untuk melengkapi data uji pasca iradiasi guna menentukan kinerja bahan bakar nuklir. Beberapa parameter uji tersebut antara lain terkait langsung dengan integritas dari elemen bahan bakar, seperti cacat dan perubahan dimensi pada *cladding*, (UTM dan UM), dan fraksi bakar dari inti bahan bakar (UTM dan UM).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses uji pasca iradiasi diawali dengan proses pengambilan sampel uji berupa PEB/ *short pin* PWR dari kolam reaktor ke *hot cell* RSG-GAS, kemudian dilakukan uji awal pasca iradiasi berupa visual untuk mengamati adanya cacat atau anomali lainnya pada

permukaan, pengukuran dimensi (tebal dan diameter) serta gamma *scanning* dengan gamma spektrometer. Kemudian sampel uji ditransfer ke *hot cell* IRM lewat KH-IPSB3. Uji tak merusak di *hot cell* IRM berupa uji ultrasonik/ *Eddy current* serta X-ray radiografi. Setelah uji tak merusak maka dapat dilakukan uji merusak. Pada penyajian hasil dan pembahasan, hanya tentang uji tak merusak.

Penanganan (*Handling*)^[4]

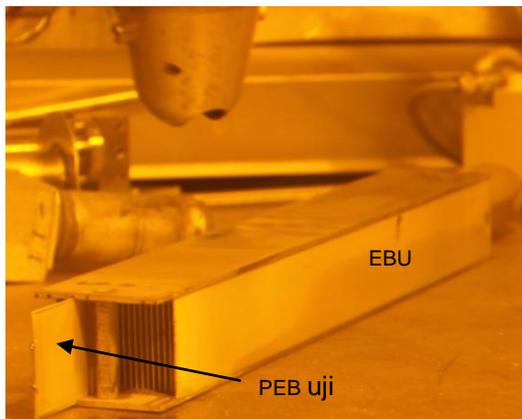
Proses iradiasi dan uji pasca iradiasi terhadap *MTR-fuel* tidak dalam satuan bundel tetapi dalam satuan pelat. Pelat Elemen Bakar yang diuji (PEB uji) sebanyak 3 buah dan panjangnya 629 mm (lebih panjang dari PEB normal 625 mm), disisipkan ke Elemen Bakar Uji (EBU) tanpa proses rol gencet sedangkan 18 PEB *dummy* pada EBU dirakit dengan teknik rol gencet. PEB uji tingkat muat tinggi disisipkan pada alur 3, 7 dan 19^[2] sehingga tidak terhalang *handle* EBU. Pada ujung posisi atas/ *handle*, dilubangi dan diberi kawat sehingga dapat ditarik keluar dari EBU. Pemberian kawat ini dilakukan apabila pengambilan PEB uji dari EBU dilakukan di kolam reaktor. Proses pengambilan PEB uji di kolam reaktor termasuk penyisipan pelat *dummy* (relatif sulit dilakukan). Apabila PEB uji diambil dari EBU di *hot cell*, maka penggunaan kawat ini tidak diperlukan, karena PEB uji dapat ditarik langsung dari EBU dengan menggunakan manipulator. Setelah dilakukan iradiasi dan pendinginan, maka dapat dilanjutkan dengan pengambilan EBU dari kolam reaktor dan dibawa ke *hot cell* RSG-GAS serta dilanjutkan dengan pengambilan PEB uji (Gambar 2). Proses awal uji pasca iradiasi PEB uji dilakukan di *hot cell* RSG-GAS, berupa pengamatan visual dan pengambilan gambar, pengukuran tebal pelat serta penyapuan dan pengukuran spektrum energi gamma.

Kotak PEB (Gambar 2) digunakan sebagai wadah pemindahan dari *hot cell* RSG-GAS ke *hot cell* IRM atau sebaiknya apabila diperlukan. Kapasitas tampung Kotak PEB disesuaikan dengan kapasitas PEB uji di dalam EBU, yaitu sebanyak 3 (tiga) pelat utuh. Dengan demikian maka proses penanganan pemindahan PEB uji lebih mudah dan terlindungi dari cacat tambahan selama penanganannya. Langkah kerja proses transfer material uji pasca iradiasi dari RSG-GAS ke IRM, telah disusun pada SOP 006.003/PL 00 01/BBN 3.2.

Metoda Baku Pengamatan Visual^{[3] [5] [1]}

Tujuannya adalah untuk mendapatkan data hasil pengamatan visual pelat elemen bakar nuklir/ rod elemen bakar berupa cacat pada permukaan, adanya perubahan bentuk (kelengkungan dsb.) dan dimensi. Lingkup pengujiannya meliputi pengamatan

kelengkungan, lapisan oksida pada permukaan pelat/*rod* elemen bakar pasca iradiasi. Peralatan dan bahan yang dipakai meliputi:



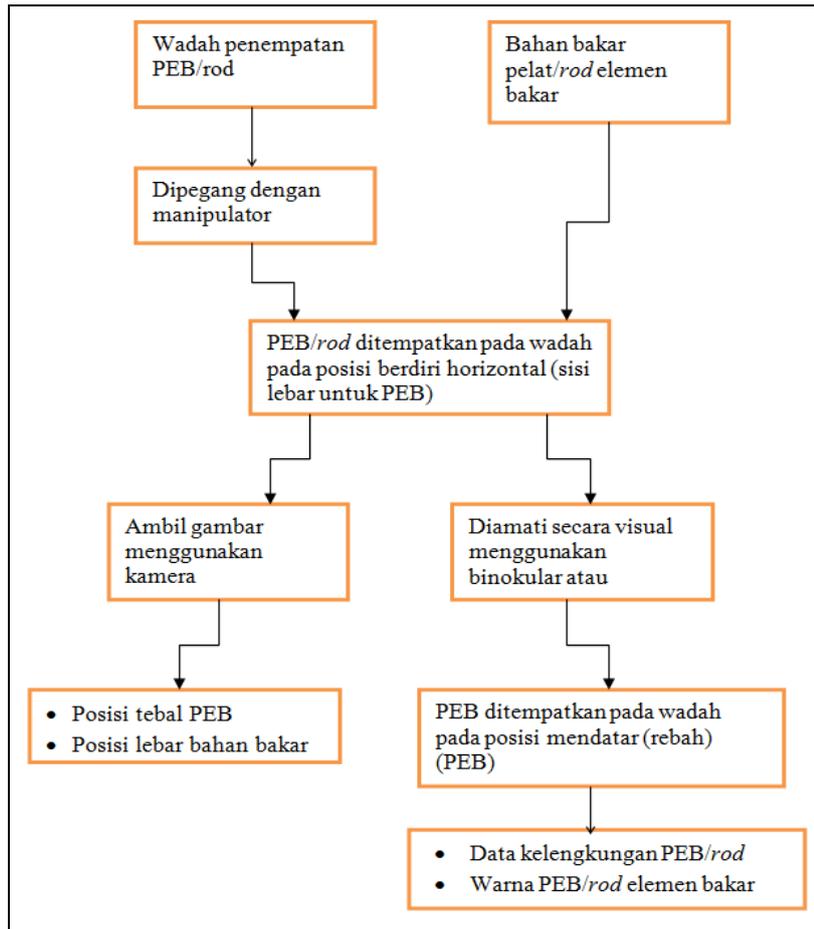
Gambar 2. PEB uji pada EBU
di *hot cell* reaktor



Gambar 3. Kotak PEB wadah
transfer PEB uji

- wadah penempatan PEB atau *short pin PWR* yang dilengkapi pengukur panjang dan tinggi/lebar, dan bila perlu dapat dilengkapi dengan lampu penerangan tambahan serta wadah tersebut dapat dipegang dengan manipulator;
- pengamatan kelengkungan dapat juga diamati dengan menempatkan PEB secara mendatar diatas permukaan yang rata;
- kamera digital dengan lensa makro, dengan pengatur *shutter speed* (kecepatan rana), bukaan aperture (diafragma), dan ISO (sensitifitas penerimaan cahaya pada kamera yang diatur sesuai kebutuhan);
- teropong binokular atau monokular dengan jarak fokus pendek sekitar 1,2 meter;
- tripod untuk dudukan kamera;

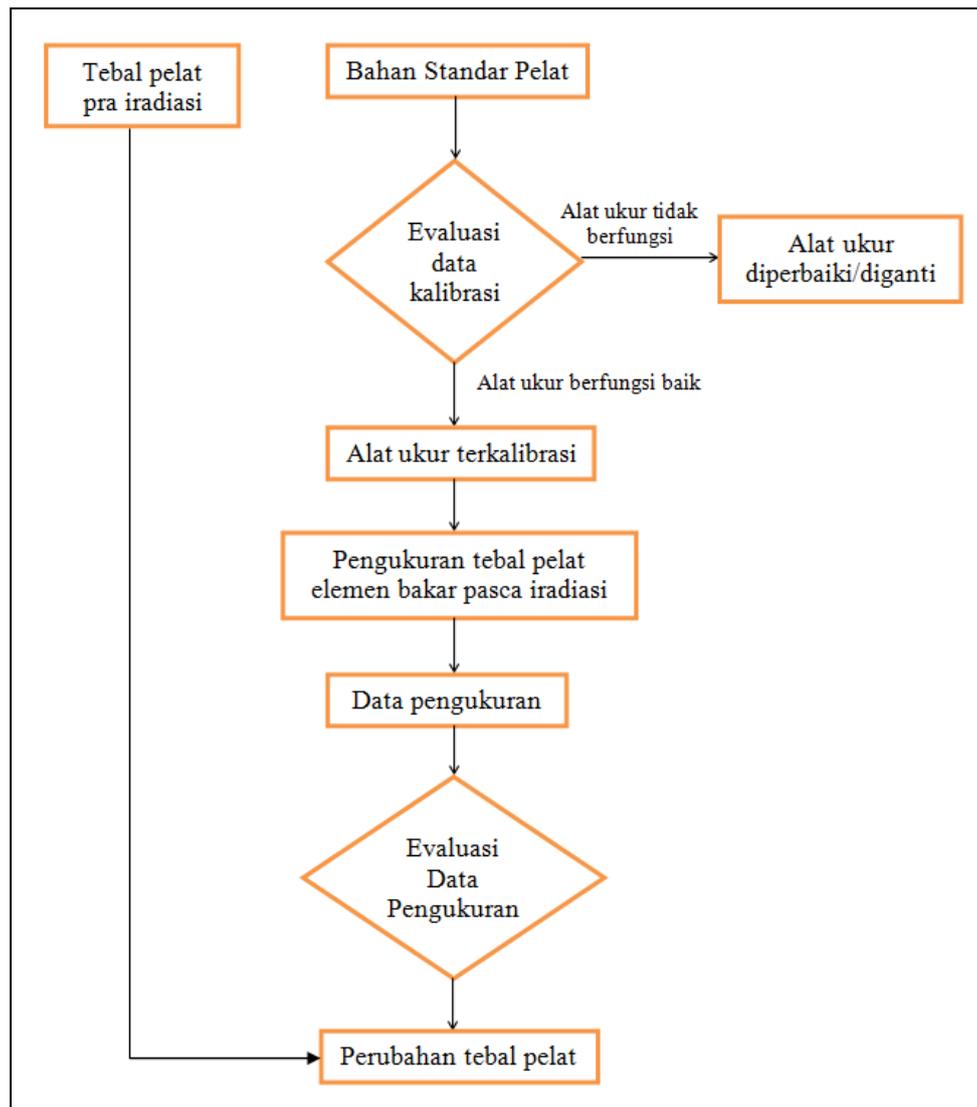
Pengamatan dapat dilakukan langsung dengan menggunakan binokular atau monokular dengan minimum fokus 1,2 meter. Dengan minimum fokus tersebut maka bercak/ noda/ cacat yang sangat kecilpun dapat jelas terlihat. Perekaman gambar dapat dilakukan dengan kamera tertentu yang langsung ditempelkan ke kaca *hot cell*. Keberadaan bercak pada PEB uji dapat dengan jelas terlihat. Hal yang sama tentu dapat juga dilakukan untuk bahan bakar berbentuk *rod*. Kualitas gambar dengan resolusi tinggi tentu terbatas untuk disajikan pada tulisan ini. Agar diperoleh parameter pengambilan gambar yang optimum, perlu dilakukan eksperimen dengan menggunakan tripod dan *remote* kamera. Langkah kerja dari Metoda Baku Pengamatan Visual disajikan pada Gambar 4, dan pengamatan visual dan pengambilan gambar tertuang dalam SOP 009.003/PL 00 01/BBN 3.2: Pengamatan Visual PEB dan *short pin PWR/rod*.



Gambar 4. Diagram alir dari metoda baku pengamatan visual

Metode baku penentuan tebal PEB [3] [6] [1]

Tujuannya adalah untuk mengukur ketebalan PEB pasca iradiasi. Lingkup pengujiannya meliputi kalibrasi peralatan dan pengukuran tebal PEB. Alat ukur yang digunakan dapat berupa *dial gage*, dengan *range* pengukuran 0-10 mm, *graduation* 0,01 mm dan dengan tingkat keakurasian +15 mikrometer atau 0,015 mm. Kalibrator berupa pelat yang disediakan di dalam *hot cell* dan proses kalibrasi dapat dilakukan setiap kali sebelum dilakukan pengukuran. Alat ukur tersebut dipasang pada meja ukur agar proses pengukuran di dalam *hot cell* dapat dilakukan (penanganan dengan manipulator) dan selama proses pengukuran, pelat elemen bakar ditekan dengan ujung manipulator di sekitar lokasi pengukuran untuk meminimalkan akibat dari kemiringan posisi pelat. Posisi titik pengukuran (koordinat, panjang dan lebar) dapat diketahui dengan memberikan mistar pada meja ukur ke arah panjang dan lebar.

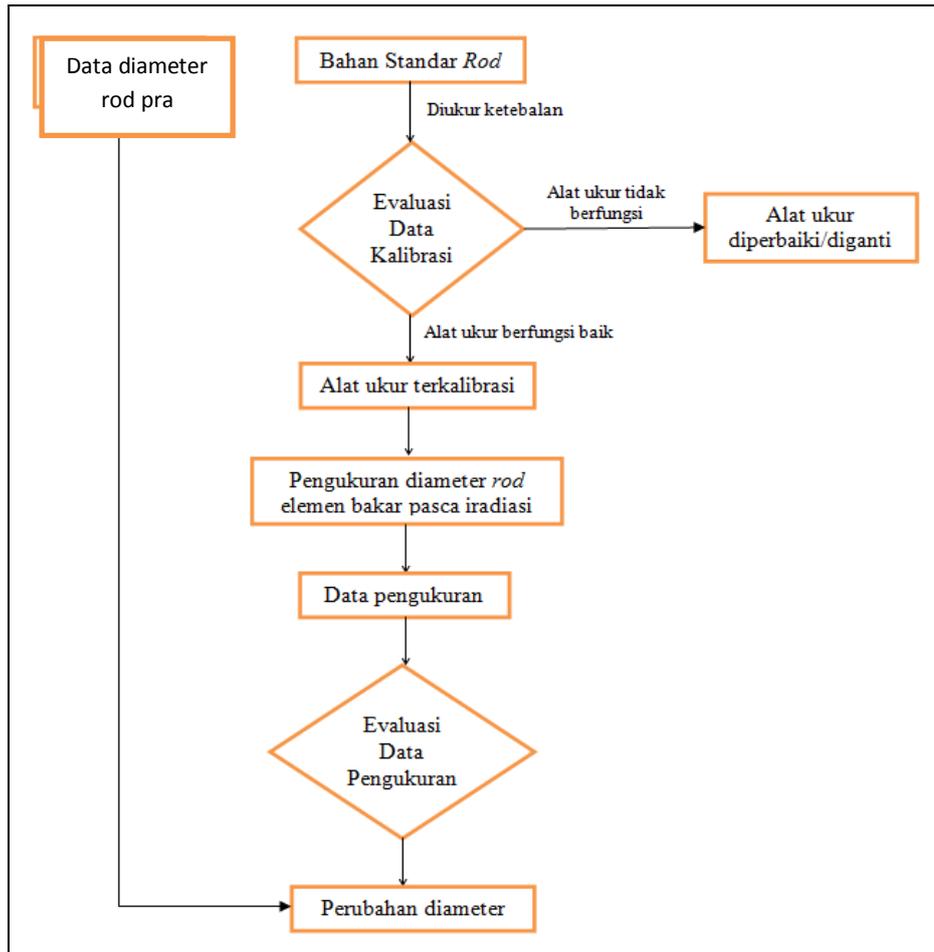


Gambar 6. Diagram alir dari metoda baku penentuan tebal PEB

Metode baku penentuan diameter *short pin PWR*

Tujuannya adalah untuk mengukur diameter *short pin PWR* pasca iradiasi. Lingkup pengujiannya meliputi kalibrasi peralatan dan pengukuran diameter *short pin PWR*. Peralatan ukur berupa *outside micrometer* dilengkapi dengan meja kerja. Kalibrator berupa *tube* yang disediakan di dalam *hot cell* dan proses kalibrasi dapat dilakukan setiap kali sebelum dilakukan pengukuran. Posisi titik pengukuran dapat diketahui dengan memberikan mistar pada meja ukur ke arah panjang dan pada pada kuadran ke berapa.

Metode ini tertuang dalam SOP No.: 007.003/PL 00 01/BBN 3.2, tentang: Pengukuran tebal pelat elemen bakar dan diameter *short pin PWR* di dalam *hot cell* dan diagram alirnya disajikan pada gambar berikut ini.

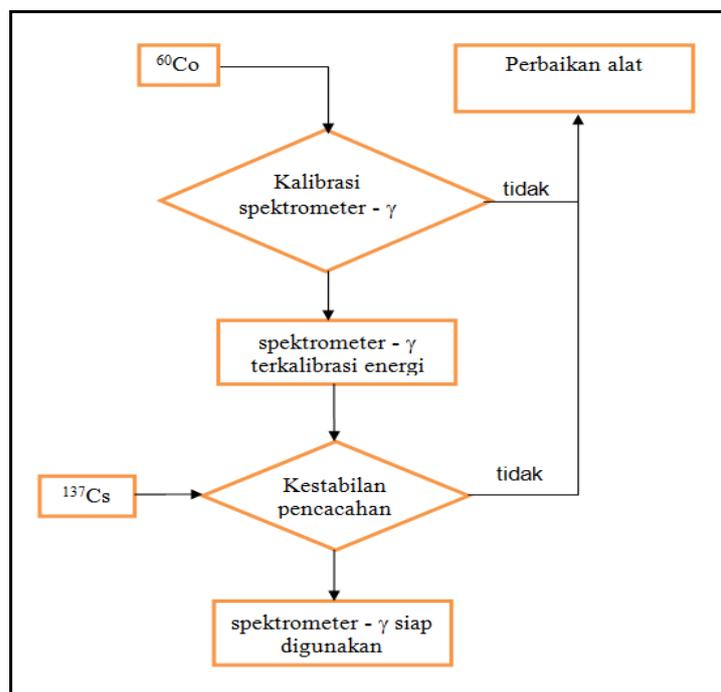


Gambar 7. Diagram alir dari metoda baku penentuan diameter *short pin PWR*

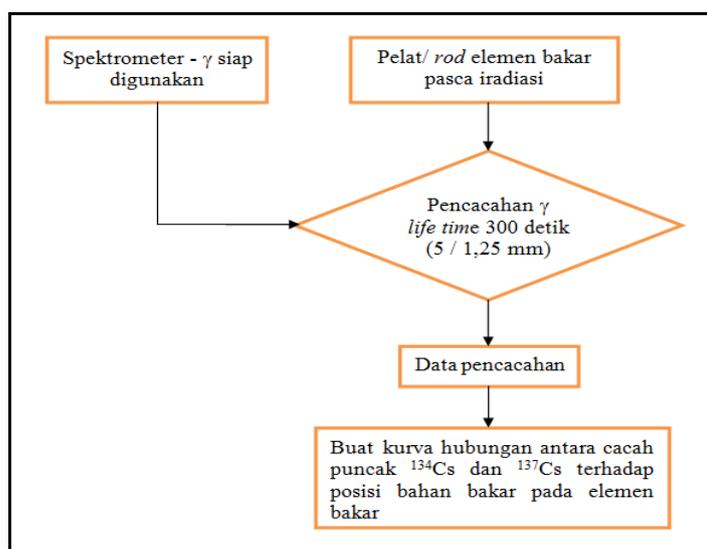
Metoda baku uji distribusi aksial aktivitas gamma ¹³⁷Cs [3] [7] [1]

Pengukuran spektrum gamma untuk mengamati distribusi hasil belah dan distribusi derajat bakar dalam pelat/ rod elemen bakar. Pengukuran spektrum gamma menggunakan Spektrometer gamma dengan menggunakan detektor HPGe sebagai pendeteksi spektrum gamma hasil belah dalam bahan bakar. Penggunaan standar Cobalt-60 dapat digunakan untuk kalibrasi energi, dan standar Europium-152 digunakan untuk kalibrasi efisiensi detektor. Penyapuan gamma dapat dilakukan pada setiap variasi jarak 5 mm, dengan waktu pencacahan 300 detik. Semakin kecil variasi jarak dan semakin lama waktu pencacahan pada setiap titik pengukuran, maka akan semakin mewakili pengukuran spektrum gamma pada seluruh panjang pelat. Satu putaran motor penggerak akan menggerakkan sejauh 1,25 mm (*pitch* ulir) yang berarti membutuhkan 4 putaran *stepping* motor penggerak untuk setiap variasi jarak 5 mm. Pengukuran lengkap sepanjang *meat* PEB uji membutuhkan waktu: $(625/5) \times 300$ detik = 625 menit atau 10 jam 25 menit.

Pengukuran spektrum gamma untuk bahan bakar berbentuk *rod* berupa *short pin* dari *PWR fuel* maupun *PHWR fuel* juga memungkinkan dilakukan, yaitu dengan menggunakan pemegang *rod* dengan ujung yang sama untuk dipasang ke kereta pembawa. Jarak titik pengukuran untuk *short pin PWR* 1,25 mm, yaitu sebesar satu putaran motor penggerak. Panjang *short pin PWR* pada bagian yang ada pelet adalah 320 mm (Gambar 1) sehingga waktu yang dibutuhkan $(320/1,25) \times 300$ detik = 1280 menit atau 21 jam 20 menit. Metode ini tertuang dalam SOP No.: 008.003/PL 00 01/BBN 3.2, tentang: Gamma spektroskopi PEB dan *short pin PWR*. Diagram alir kalibrasi dan gamma *scanning* disajikan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Diagram alir kalibrasi spektrometer gamma

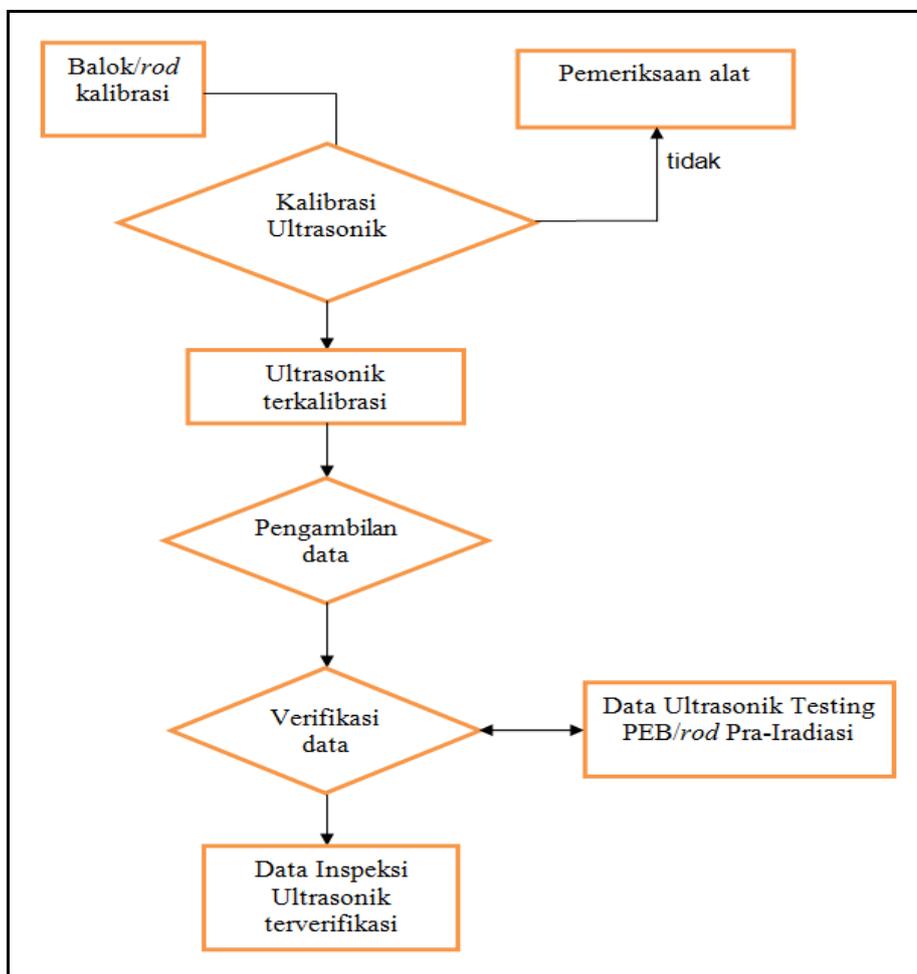


Gambar 9. Diagram alir gamma *scanning* dengan spektrometer gamma

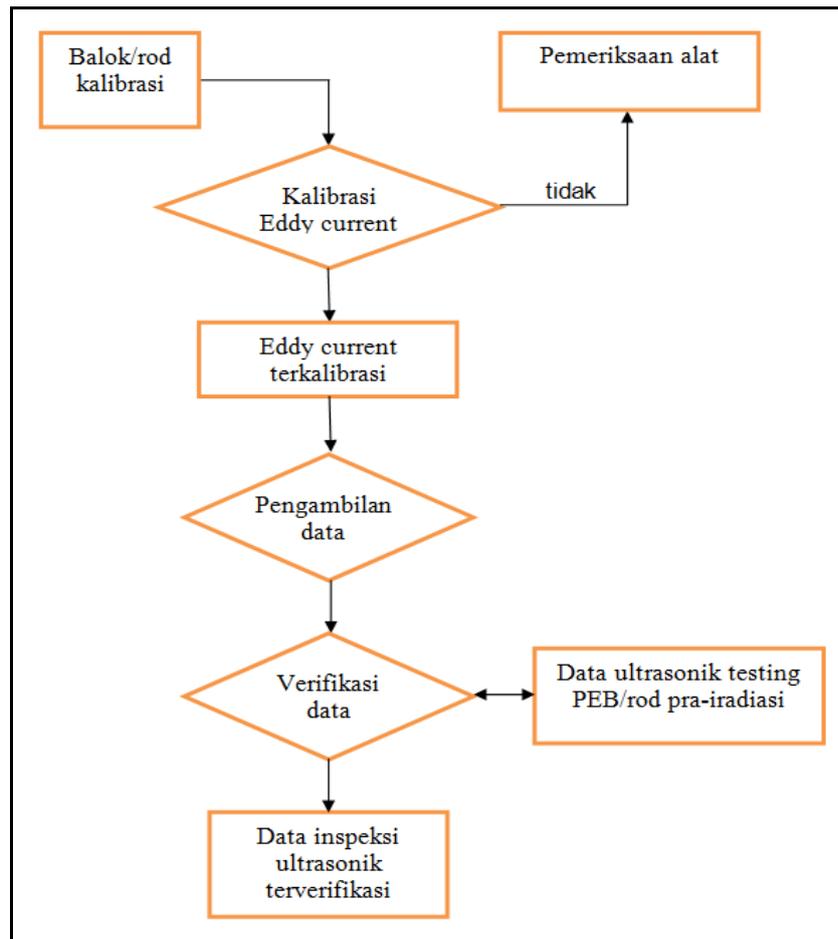
Metoda baku penentuan cacat permukaan dan sub struktur PEB pasca iradiasi

Penentuan Penentuan Cacat Permukaan dan Sub Struktur rod fuel PIN PWR Pasca Iradiasi dengan menggunakan *ultrasonic testing* dan *Eddy current*. Standar yang akan digunakan, yaitu; ASTM E 214 tentang *Standard Practice for Immersed Ultrasonic Examination by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves* dan ASTM E 213 tentang *Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing*.

Jenis probe, *immersed probe* untuk PEB: Sonoscan IW-5-10, diameter luar casing 13 mm dan diameter transduser 10 mm, tinggi 45 mm (maksimum terendam) sedangkan untuk *short pin PWR* Sonoscan IW-5-6, diameter luar casing 9,5 mm dan diameter transduser 6 mm, tinggi 45 mm (maksimum terendam). Dimensi bak rendaman adalah 760x 120x180 mm, dengan bahan SS-304; sekaligus untuk merendam V1- *Ultrasonic calibration test block* (aluminium).



Gambar 14. Diagram alir uji ultrasonik

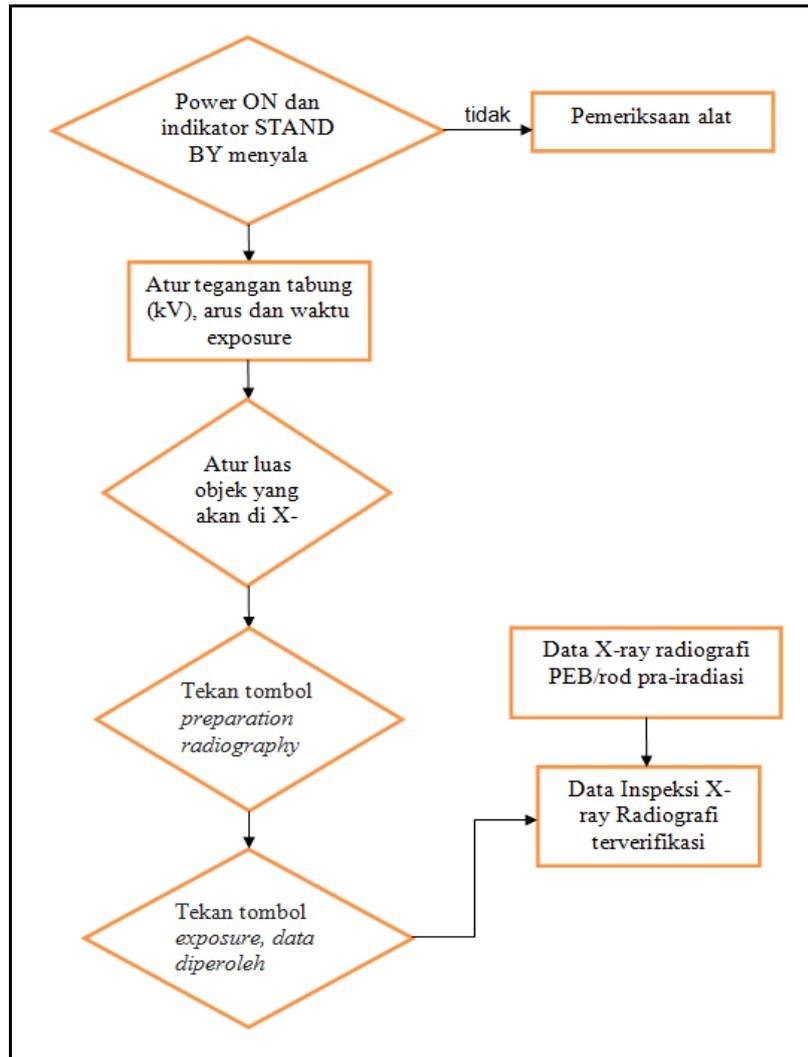


Gambar 15. Diagram alir uji Eddy current

Standar yang akan digunakan, yaitu; ASTM E 309 *Standard Practice for Eddy-Current examination of steel tubular products using magnetic saturation* dan ASTM E 1629 *Standard Practice for Determining the Impedance of Absolute Eddy-Current Probes*.

Metoda baku uji X-ray radiografi PEB dan *short pin PWR* pasca iradiasi

Standar yang akan digunakan yaitu: ASTM E 94 tentang *Standard Guide for Radiographic Examination*. X-ray radiografi pada *rod* dapat juga menunjukkan gap antar pelet masih normal atau tidak, juga adanya serpihan pelet yang dapat menyebabkan terjadinya PCI serta dapat juga menunjukkan kondisi pegas di ruang plenum apakah masih baik atau tidak. Setelah PEB atau *short pin PWR* dan penangkap citra berupa film atau lainnya sudah ditempatkan pada posisinya, maka langkah kerja uji X-ray Radiografi dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.



Gambar 14. Diagram alir X-ray radiografi

KESIMPULAN

Metoda UTM untuk uji pasca iradiasi di *hot cell* RSG-GAS meliputi uji;

- pengamatan secara visual untuk mengetahui adanya cacat permukaan atau sub-permukaan, korosi atau perubahan dimensi;
- pengukuran dimensi berupa ketebalan untuk PEB dan diameter untuk *short pin PWR* serta pengamatan kelengkungannya untuk mengetahui adanya perubahan dimensi;
- pengukuran spektrum gamma dengan *gamma scanning* berupa spektrometer gamma untuk mengamati distribusi hasil belah dan distribusi derajat bakar dalam pelat/ *rod* elemen bakar;

Metoda UTM untuk uji pasca iradiasi di *hot cell* IRM meliputi uji;

- pengamatan cacat dengan ultrasonik dan *Eddy current*, untuk mengetahui adanya cacat dipermukaan maupun pada sub permukaan;

- pengamatan "visual" cacat dengan x-ray radiografi, untuk mengamati integritas PEB maupun *short pin* PWR seperti gap antar pelet, keutuhan pelet, pegas pada daerah plenum dan lainnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pak Sungkono selaku Kepala Bidang Uji Radiometalurgi dan rekan kerja di IRM yang telah terlibat dalam membantu kegiatan penentuan metode UTM untuk uji pasca iradiasi, yang merupakan kegiatan 2015 serta yang juga telah membantu penulis dalam menyelesaikan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Antonio Gogo dkk., Uji Tak merusak Pelat Elemen Bakar Nuklir Pasca Iradiasi di RSG-GAS, Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir Volume XII, No. 1, April 2015, ISSN 0216-2695.
2. PTBN-BATAN, Laporan Analisis Keselamatan Inseri EBU Silisida Densitas 4,8 dan 5,2 gU/cm³ di Teras RSG-GAS, No.Ident: PR40 J19.001, 2008.
3. BUR-PTBN, Laporan Kegiatan IRM Tahun 2014, 2015.
4. Draft SOP 006.003/PL 00 01/BBN 3.2: Langkah kerja proses transfer material ui pasca iradiasi dari RSG-GAS ke IRM, 2016;
5. Draft SOP 009.003/PL 00 01/BBN 3.2: Pengamatan Visual PEB dan *short pin PWR/rod*, 2016.
6. Draft SOP No.: 007.003/PL 00 01/BBN 3.2, tentang: Pengukuran tebal pelat elemen bakar dan diameter *short pin PWR* di dalam *hot cell*, 2016;
7. Draft SOP No.: 008.003/PL 00 01/BBN 3.2, tentang: Gamma spektroskopi PEB dan *short pin PWR*, 2016.