

## Kajian Metode Uji Fatik Bahan Kelongsong dan Struktur Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset Pasca Iradiasi

Sri Ismarwanti, Hanifah Dwiyantri, Siti Saleha, Setia Permana, Guswardani, Jan Setiawan, Sungkono

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

### ABSTRAK

Uji fatik adalah salah satu uji mekanik yang dilakukan untuk struktur bahan bakar reaktor riset. Beban siklik pada struktur bahan bakar reaktor menyebabkan kegagalan fatik. Beban siklik tersebut menyebabkan kelelahan siklus rendah (*low cycle fatigue*). Instalasi radiometalurgi adalah instalasi yang digunakan untuk uji pra dan pasca iradiasi bahan dan bahan bakar reaktor nuklir. Metode yang digunakan harus mampu mengakomodir alat dan bahan yang akan digunakan. Oleh karena itu perlu dilakukan kajian metode pengujian fatik bahan struktur bahan bakar reaktor riset. Hasil dari kajian ini akan menjadi acuan awal untuk pengujian fatik di fasilitas uji pasca iradiasi di PTBBN. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengujian pasca iradiasi dilakukan pada *low cycle fatigue* menggunakan acuan ASTM E606 dengan modifikasi pada spesimen yang digunakan. Bahan yang akan dilakukan pengujian *low cycle fatigue* adalah bahan yang terlebih dahulu dipreparasi menjadi spesimen uji yang kemudian dilakukan iradiasi.

**Kata Kunci:** *low cycle fatigue*, instalasi radiometalurgi, uji pasca iradiasi

### PENDAHULUAN

Kegagalan pada struktur bahan bakar reaktor nuklir dapat disebabkan karena fatik atau lelah. Komponen struktur mengalami pembebanan siklik ketika sistem bergerak dari satu set tekanan, suhu, momen dan beban gaya ke rangkaian beban lainnya. Konsekuensi dari jenis perubahan beban siklik ini mirip dengan kelelahan siklus rendah. Siklus fatik terdiri dari dua jenis yaitu Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) dan Fatik Siklus Tinggi (*High Cycle Fatigue*). *Low Cycle Fatigue* (LCF) terjadi dengan jumlah siklus dibawah  $10^5$  pada kondisi plastis. Siklus ini dirancang dengan mengabaikan keseluruhan efek fatik atau dengan mengurangi level tegangan yang diizinkan. *High Cycle Fatigue* (HCF) terjadi dengan jumlah siklus antara  $10^3$  sampai  $10^7$  dan di luar kondisi elastis. Mekanisme fatik terjadi dalam 3 fase yaitu permulaan retak (*crack initiation*), penyebaran retak (*crack propagation*) dan *fracture* [1]. Permulaan retak diawali dengan adanya *crack initiation* yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dengan konsentrasi tegangan dipermukaan karena adanya

pembebanan berulang. Penyebaran retak berkembang menjadi *microcracks* yang kemudian membentuk *macrocracks* yang akan berujung pada kegagalan. Perpatahan terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen. Penelitian fatik komponen reaktor telah lama dilakukan [2-10]. Radiasi neutron menyebabkan terjadinya *hardening* dan *embrittlement* pada bahan sehingga fatik siklus rendah berkurang. Oleh karena itu pengujian pasca iradiasi dilakukan pada fatik siklus rendah. Untuk mendukung pengujian ini diperlukan metode yang sesuai dengan peralatan yang telah ada di Instalasi Radiometalurgi (IRM). Pemilihan spesimen uji menjadi perhatian utama, karena ketersediaan *holder* yang terbatas.

## **METODOLOGI**

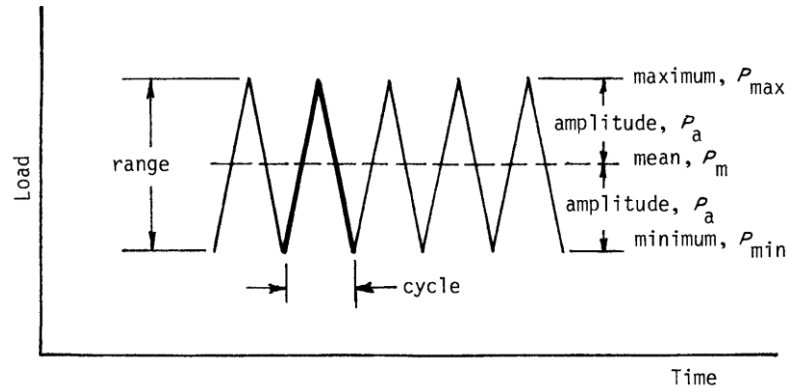
Kajian ini dilakukan dengan penelusuran pustaka untuk mendapatkan metode yang dapat diterapkan untuk pengujian low cycle fatigue bahan pasca iradiasi di IRM. Pembahasan diawali dengan pengujian fatik sesuai dengan ASTM E606-92. ASTM ini membahastentang *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing* yang mencakup penentuan sifat kelelahan bahan yang homogen menggunakan spesimen uji yang dibuat secara uniaksial terutama untuk pengujian kelelahan yang terkontrol regangan. Selain itu juga dilakukan penelusuran pustaka terkait dengan pengujian *fatigue* untuk bahan pasca iradiasi.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Uji *Fatigue* menurut ASTM E606 [11]**

ASTM E606 adalah mencakup penentuan sifat kelelahan bahan yang homogen menggunakan spesimen uji yang dibuat secara uniaksial terutama untuk pengujian kelelahan yang terkontrol regangan, namun ada beberapa bagian yang dapat memberikan informasi untuk pengujian terkontrol beban atau terkontrol stress. Berikut adalah beberapa istilah yang digunakan dalam pengujian fatik [12]. *Fatigue* atau kelelahan adalah proses perubahan struktur permanen *progressive localized* yang terjadi pada material yang mengalami kondisi tegangan dan regangan yang berfluktuasi pada beberapa titik atau titik dan yang dapat berujung pada retakan atau fraktur sempurna setelah cukup banyak fluktuasi. *Progressive* diartikan bahwa *fatigue* terjadi selama jangka waktu tertentu. *Cycle* atau siklus adalah satu urutan lengkap nilai beban (regangan) yang diulang di bawah pembebanan amplitudo konstan (regangan) seperti pada gambar 1, jumlah siklus disimbolkan dengan N. *Fatigue life* ( $N_f$ ) adalah

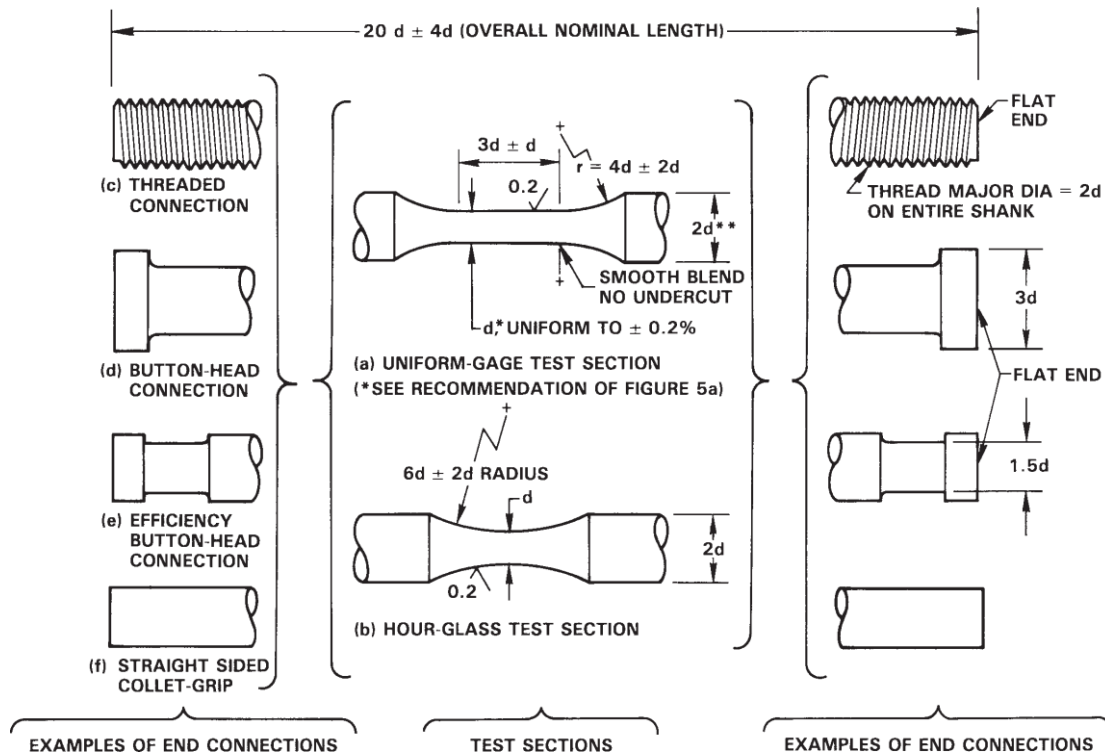
jumlah siklus tertentu yang diberikan pada spesimen sebelum kegagalan sifat tertentu terjadi. Faktor faktor yang mempengaruhi *fatigue life* adalah adanya tipe pembebanan, putaran, kelembaban, lingkungan (korosi), konsentrasi tegangan, suhu, kelelahan bahan, komposisi kimia bahan, tegangan-tegangan sisa dan tegangan kombinasi.



Gambar 1. Model siklus fatik.

ASTM E606 mengatur mengenai *strain control* yaitu kontrol mesin pengujian harus memungkinkan pergantian di antara batas regangan konstan. Jika perilaku material memungkinkan (misalnya, efek penuaan tidak menghalangi), stabilitas kontrol harus sedemikian sehingga regangan batas maksimum dan minimum dapat diulang selama durasi pengujian hingga dalam 1% dari kisaran antara batas kontrol maksimum dan minimum. Untuk kontrol regangan dalam kondisi umur panjang, kadang-kadang menguntungkan untuk menjalankan tes kontrol regangan semu di bawah kontrol beban. Pengujian fatik dapat dimulai dalam kontrol regangan dan beralih ke kontrol beban setelah stabilisasi siklik dari respon tegangan terjadi. Dalam kasus ini regangan harus dipantau (langsung atau tidak langsung) dan penyesuaian dilakukan dalam kontrol beban untuk mempertahankan batas regangan dalam 1% dari kisaran antara batas maksimum dan minimum. Dimensi juga telah ditetapkan yaitu seperti pada gambar 2 yang menunjukkan dua konfigurasi spesimen dasar. Gambar 2-a menunjukkan spesimen *uniform-gage* yang direkomendasikan. Ketika harus menggunakan konfigurasi *hour glass*, maka spesimen yang direkomendasikan adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-b. Kedua spesimen yang direkomendasikan ini memiliki penampang lingkaran padat dan diameter minimum 6,35 mm (0,25 in) di bagian uji. Desain koneksi ujung spesimen tergantung pada preferensi pengguna, sejumlah konfigurasi yang umum digunakan ditunjukkan pada gambar 2-c, 2-d, 2-e dan 2-f. Dalam melakukan preparasi spesimen *uniform-gage* harus berhati-hati saat

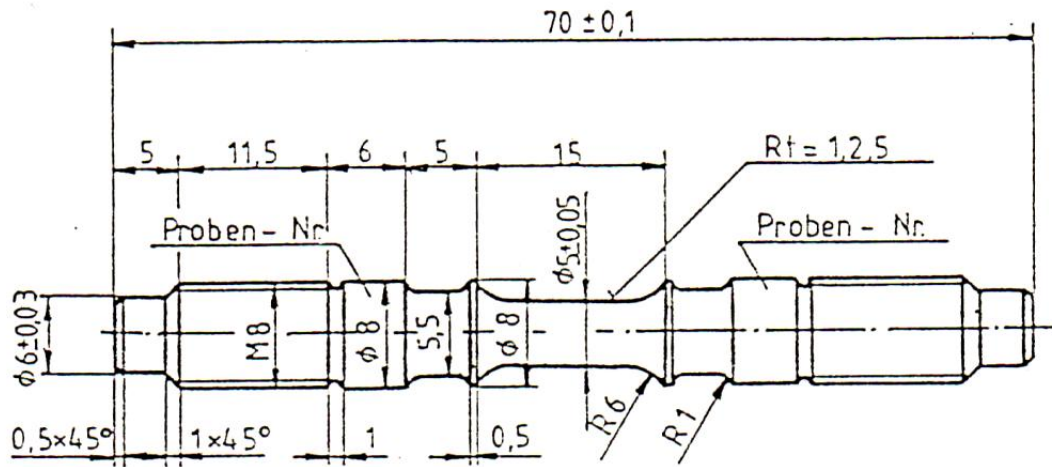
memadukan jari-jari bahu pada ujung spesimen dengan diameter minimum untuk menghindari *undercutting*.



Gambar 2. Dimensi spesimen pengujian fatik.

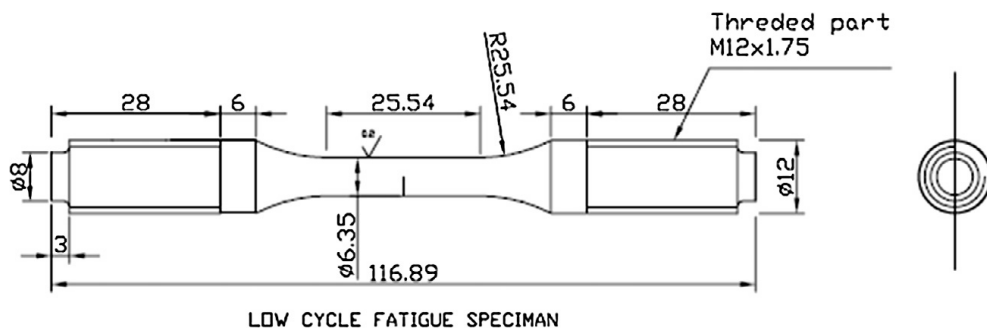
### Uji Fatik Pasca Iradiasi

Desain IRM telah dilengkapi dengan fasilitas pengujian *Low Cycle Fatigue* (LCF) dengan pembebanan aksial. Mesin yang telah terpasang di *hot cell* 110 adalah merek Schenk Trebel dengan kapasitas beban 100 kN dan dilengkapi dengan tungku dengan maksimum pemanasan  $1000^{\circ} \text{C}$  dan dilengkapi dengan *extensometer*. Dimensi specimen yang direkomendasikan seperti gambar 3 yaitu berbentuk rod.



Gambar 3. Dimensi spesimen uji LCF untuk di IRM [13].

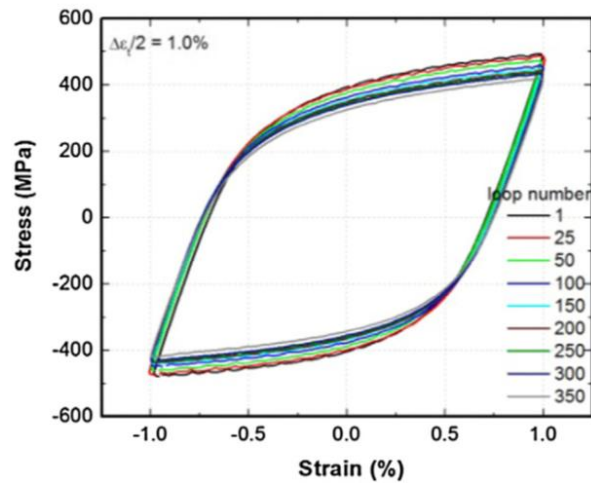
Dalam industri nuklir pengujian LCF banyak digunakan untuk memprediksi kegagalan yang terjadi pada bejana tekan reactor. Sharkar dkk, menguji bahan baja feritik karbon rendah dengan spesimen seperti pada gambar 4. Untuk mengetahui perilaku siklus dibuatlah *hysteresis loop* dari pengujian berupa kurva *strain-stress* seperti pada gambar 5. *Fatigue life* ditentukan dengan menggunakan formula Basquin, formula Coffin-Manson. Kombinasi dua formula tersebut menghasilkan *fatigue transition* yaitu menunjukkan kapan suatu material akan mengalami jumlah siklus yang sama dari jenis regangan elastis dan plastis. Dengan mengetahui *transition life* maka akan diketahui siklus yang mendominasi, siklus pada regangan elastis atau siklus pada regangan plastis sehingga dapat dipilih pendekatan prediksi umur yang tepat [8].



LOW CYCLE FATIGUE SPECIMAN

ALL DIMENSIONS ARE IN MM

Gambar 4. Spesimen uji fatik [3].



Gambar 5. Lingkaran histeresis tegangan-regangan.

Spesimen rod sistem ulir sangat direkomendasikan untuk pengujian fatik karena *holder* yang tersedia sesuai. Ukuran yang digunakan adalah sesuai dengan gambar 3. Terdapat bagian untuk meletakkan *extensometer*. Spesimen tersebut dipreparasi terlebih dahulu kemudian dilakukan iradiasi di dalam reaktor. Spesimen yang telah diiradiasi ini kemudian dilakukan pengujian LCF. Penggunaan specimen berbentuk rod sistem ulir untuk pengujian LCF di dalam *hot cell* mempunyai kendala tersendiri. Specimen berbentuk rod ulir menyebabkan kesulitan dalam *remote handling* ketika pemasangan ke *holder*. Pemegang spesimen mesin uji fatik didesain sangat presisi sehingga untuk memasang sampel memerlukan penanganan khusus Sehingga pemegang spesimen membutuhkan modifikasi untuk memudahkan *remote handling*.

## KESIMPULAN

Hasil kajian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa ASTM E606 telah mengatur ketentuan pengujian fatik dan peralatan yang ada di IRM mendukung untuk aplikasi standar tersebut. Spesimen uji yang digunakan berbentuk bentuk rod, ukuran dimensi sesuai dengan gambar 3. Namun perlu dilakukan pengembangan untuk *holder* dengan spesimen uji berbentuk rod tanpa ulir, agar memudahkan *remote handling*.

Metode pengujian untuk pasca iradiasi adalah diawali dengan preparasi spesimen sesuai gambar 3. Specimen tersebut diiradiasi di reactor nuklir, kemudian dilakukan pengujian LCF di IRM.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Pengujian ini didanai oleh DIPA PTBBN tahun anggaran 2019, terimakasih kami ucapkan kepada tim Hot Cell IRM yang telah memberi dukungan, sehingga kajian ini dapat dilaksanakan.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] H. E. Boyer, "Fatigue Testing," ed, 1986.
- [2] L. De Baglion and J. Mendez, "Low cycle fatigue behavior of a type 304L austenitic stainless steel in air or in vacuum, at 20 °C or at 300 °C: Relative effect of strain rate and environment," *Procedia Engineering*, vol. 2, pp. 2171-2179, 2010.
- [3] A. Sarkar, B. K. Kumawat, and J. K. Chakravartty, "Low cycle fatigue behavior of a ferritic reactor pressure vessel steel," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 462, pp. 273-279, 2015.
- [4] S. Fabritsiev and A. Pokrovsky, "The effect of helium accumulation and radiation damage on the weldability of 316-type steel," *Journal of nuclear materials*, vol. 258, pp. 1991-1996, 1998.
- [5] E. Van Osch, M. Horsten, M. De Vries, W. Van Witzenburg, R. Conrad, G. Sordon, *et al.*, "Low temperature irradiation experiments and material testing in Petten," *Journal of nuclear materials*, vol. 233, pp. 1541-1546, 1996.
- [6] R. Lindau and A. Möslang, "Low-cycle fatigue properties of the helium-implanted 12% Cr steel 1.4914 (MANET)," *Journal of nuclear materials*, vol. 179, pp. 753-756, 1991.
- [7] K. B. S. Rao, R. Sandhya, and S. Mannan, "Creep-fatigue interaction behaviour of type 308 stainless steel weld metal and type 304 stainless steel base metal," *International journal of fatigue*, vol. 15, pp. 221-229, 1993.
- [8] G. Dobman, "NDE for Material Characterization of Ageing Due to Thermal Embrittlement, Fatigue and Neutron Degradation," *Int. J. Materials and Product Technology*, vol. 26, 2006.

- [9] S. Mannan and M. Valsan, "High-temperature low cycle fatigue, creep-fatigue and thermomechanical fatigue of steels and their welds," *International journal of mechanical sciences*, vol. 48, pp. 160-175, 2006.
- [10] V. Shankar, M. Valsan, K. B. S. Rao, R. Kannan, S. Mannan, and S. Pathak, "Low cycle fatigue behavior and microstructural evolution of modified 9Cr–1Mo ferritic steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 437, pp. 413-422, 2006.
- [11] A. International, "E 606 – 92, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," ed. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 1998.
- [12] A. International, "E1823, Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing," ed. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 1996.
- [13] GCNF, "Low Cycle Fatigue," PTBBN, Ed., ed.