

PENGUKURAN DIAMETER SILINDER MASIF MENGGUNAKAN RADIOGRAFI NEUTRON

Putranto Ilham Yazid

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENGUKURAN DIAMETER SILINDER MASIF MENGGUNAKAN RADIOGRAFI NEUTRON. Telah dilakukan pengukuran diameter benda uji dari grafit dan aluminium yang menyimulasikan pelet bahan bakar reaktor dengan memanfaatkan teknik radiografi neutron. Benda uji diradiografi neutron pada daya reaktor 500 KW selama 2 jam dengan memakai layar Indium sebagai konverter. Bayangan yang dihasilkan di atas film yang telah dipapari oleh layar Indium tersebut diukur kehitamannya dengan densitometer, dalam arah tegak lurus sumbu silinder. Data pengukuran kehitaman kemudian diperhalus dan diperbanyak secara numerik. Garis tengah benda uji dihitung dengan cara menentukan titik belok dari kurva yang diperoleh dari penghalusan data tersebut. Hasil percobaan menunjukkan bahwa ketelitian yang diperoleh masih cukup baik, yakni dengan kesalahan berkisar 1,5 sampai 9,5 %.

ABSTRACT

MEASUREMENT OF SOLID CYLINDRICAL MATERIAL USING NEUTRON RADIOGRAPHY. Two solid cylindrical samples of graphite and of aluminium, which simulate the reactor fuel pellets, were neutron radiographed at the reactor power of 500 KW in two hours, with using the Indium as converter screen. The film images resulted from exposing the converter to the X-ray film were measured across the cylindrical axis image using densitometer for getting the density data. The results are then converted to transmittance data. Using the piecewise second order polynomial interpolation, the transmittance data is smoothed and multiplied numerically. The sample diameters were determined by locating the inflection points of the smoothed data. The experiment showed that the error is within 9.5 %.

PENDAHULUAN

Pengukuran dimensi benda yang berradiasi tinggi, seperti : bahan bakar bekas, tidak dapat dilakukan dengan cara konvensional. Salah satu caranya adalah dengan menerapkan teknik radiografi neutron. Untuk menguasai teknik pengukuran benda-benda berradiasi tinggi dengan radiografi neutron, dalam penelitian ini dicoba mengukur dimensi benda uji berupa silinder masif yang terbuat dari grafit dan aluminium.

Hasil radiografi neutron, yang berupa gambar bayangan di atas film x-ray, diukur kehitamannya dengan densitometer. Pengukuran diameter benda uji dilakukan dengan metode yang dikembangkan oleh Wade J. Richards [1] dari ORNL, yakni dengan cara menentukan titik belok dari kurva transmitansi yang diperoleh dari pengukuran kehitaman film hasil radiografi neutron. Cara ini selain mudah dilakukan juga menjanjikan ketelitian yang tinggi, asalkan data pengukuran cukup banyak dan teliti.

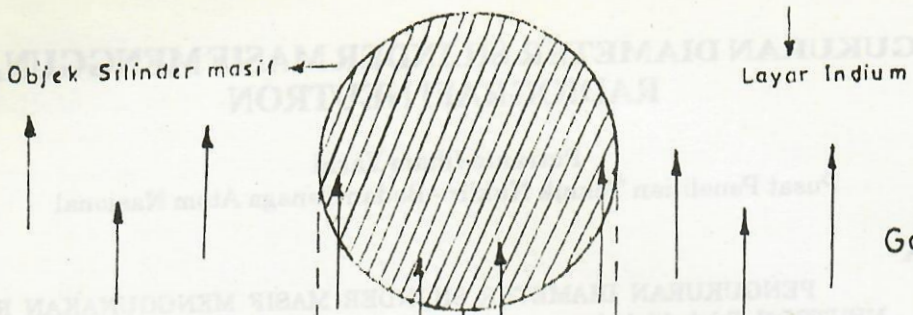
TEORI

Kurva Transmitansi $T(x)$ dari Radiografi Neutron Terhadap Benda Berbentuk Silinder Masif

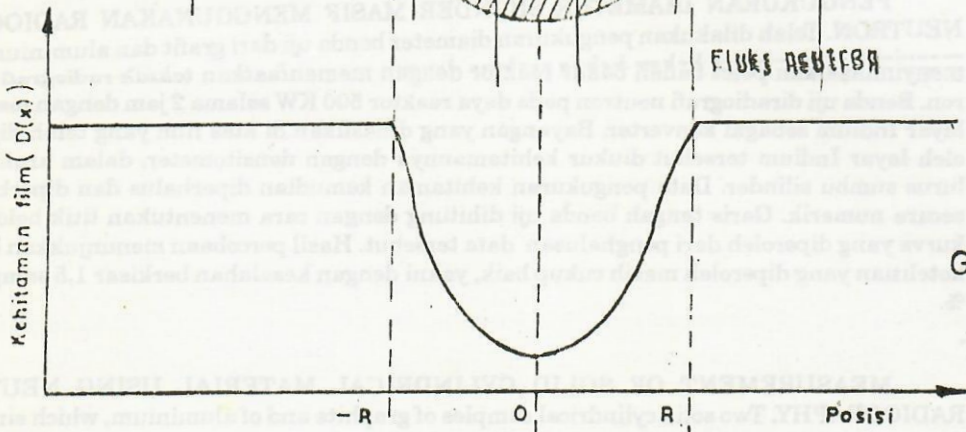
Radiografi neutron terhadap benda berbentuk silinder masif dapat digambarkan secara skematis seperti pada Gambar 1a. Layar dan benda disinari fluks neutron yang homogen dengan arah tegak lurus. Jika layar tersebut kemudian ditempelkan ke film, akan diperoleh kurva kehitaman film seperti tampak dalam Gambar 1b.

Bagian layar yang langsung disinari oleh neutron akan menghasilkan aktivitas radiasi yang tinggi sehingga kehitaman layar yang dihasilkan akan tinggi pula. Bagian layar yang terhalang benda akan berkurang aktivitasnya, yaitu semakin kecil ke arah pusat benda silinder. Berarti pula bahwa kehitaman film akan semakin rendah untuk tempat yang semakin mendekati pusat benda. Dalam analisis hasil radiografi neutron, suatu besaran lain yaitu transmitansi lebih memiliki arti fisis dibandingkan dengan kehitaman film.

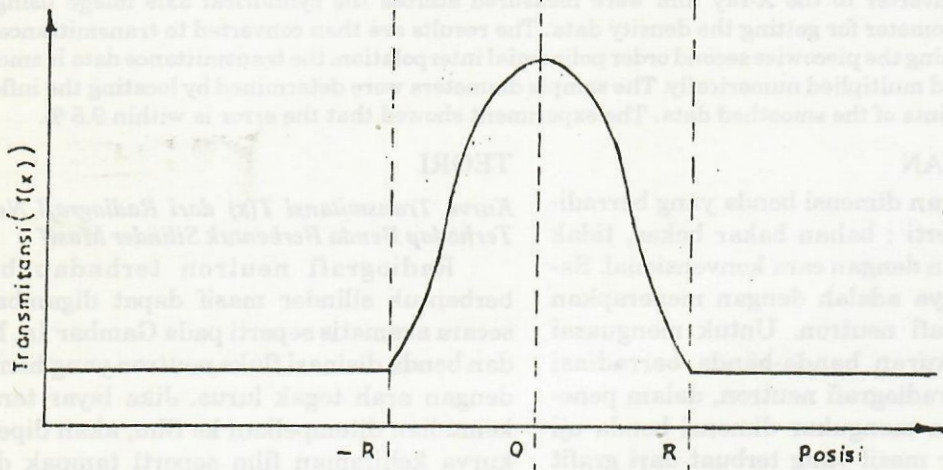
Kurva transmitansi yang dihasilkan oleh radiografi neutron terhadap benda silinder dapat



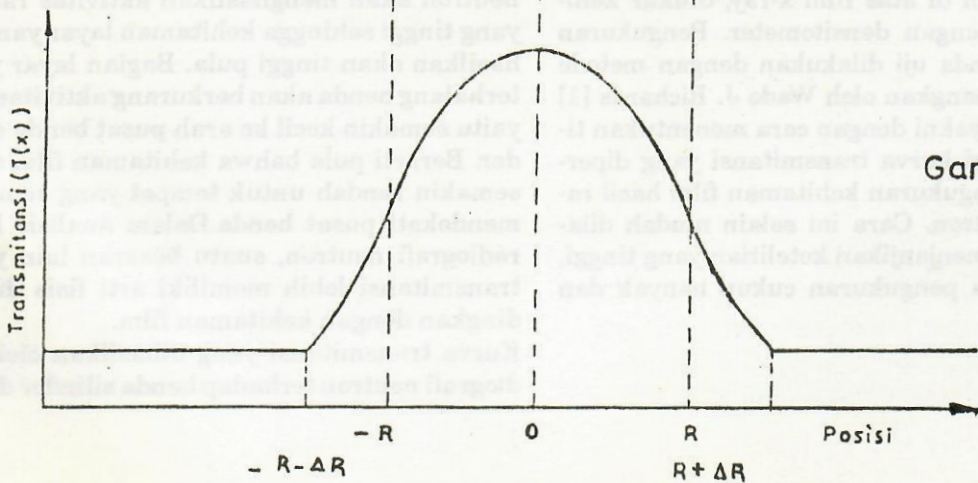
Gambar 1a.



Gambar 1b.



Gambar 1c.



Gambar 1d.

dilihat pada Gambar 1c, yang diperoleh dari kurva kehitaman film dengan bantuan hubungan berikut :

$$T(x) = 10^{-D(x)}$$

$T(x)$ = transmitansi pada titik x

$D(x)$ = kehitaman film pada titik x

Kurva transmitansi seperti pada Gambar 1c, hanyalah diperoleh dalam keadaan ideal, yaitu bahwa transmitansi mulai meninggi tepat pada posisi dimana benda berada ($x = -R$ atau $x = +R$). Sebaliknya, dalam keadaan yang sebenarnya, kurva transmitansi yang diperoleh dari radiografi neutron suatu benda berbentuk silinder masif adalah seperti nampak pada Gambar 1d. Transmitansi sudah mulai menaik pada titik sebelum titik di mana benda berada, yakni pada $x = -R - \Delta R$ dan $x = R + \Delta R$. Hal ini disebabkan semata-mata oleh proses konversi yang terjadi di dalam layar, akibat interaksi antara neutron dengan benda yang diradiografi dan layar itu sendiri.

Kenyataan ini akan mempersulit penentuan dimensi benda karena harga R sukar sekali ditentukan berdasarkan kurva transmitansi. R bergantung pada jenis material benda yang diradiografi, jenis layar dan juga jenis film [2]. Selain itu R tidak bisa diformulasikan secara tepat. Untuk itu perlu pendekatan [3].

Akan tetapi masih ada satu hal yang menguntungkan bagi kita yakni bahwa kurva transmitansi pada titik $x = -R$ ataupun $x = +R$ adalah merupakan titik ekstrim, yakni titik belok.

Pada titik-titik tersebut berlaku hubungan :

$$\frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=-R} = \text{maksimum}$$

$$\text{dan } \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=R} = \text{minimum} \text{ serta}$$

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} \Big|_{x=R} = 0$$

$$\text{dan } \frac{d^2T(x)}{dx^2} \Big|_{x=-R} = 0$$

Cara inilah yang digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan diameter benda berbentuk silinder masif berdasarkan gambar film radiografi neutron.

Penentuan Titik Belok

Karena harga transmitansi $T(x)$ yang diperoleh dari hasil pengukuran adalah diskrit, yaitu berupa data $T(x_i)$ pada tiap-tiap titik pengukuran dan adalah sangat sukar bahkan tidak mungkin menentukan suatu fungsi analitis yang mendekati data tersebut, dipakai cara beda hingga dari Gregory-Newton dengan 7 titik

dalam menentukan harga-harga $\frac{dT(x)}{dx}$ dan

$\frac{d^2T(x)}{dx^2}$, yakni :

$$\frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=x_i} = T'_i = \frac{1}{60h} [-T_{i-3} + 9T_{i-2} - 45T_{i-1} + 45T_{i+1} - 9T_{i+2} + T_{i+3}] \quad (1)$$

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} \Big|_{x=x_i} = T''_i = \frac{1}{180h^2} [2T_{i-3} - 27T_{i-2} + 270T_{i-1} - 490T_i + 270T_{i+1} - 27T_{i+2} + 2T_{i+3}] \quad (2)$$

dimana :

$$h = x_{i+1} - x_i$$

$$T_{i-3}, T_{i-2}, \dots, T_{i+2}, T_{i+3}$$

adalah harga transmitansi di titik-titik $x_{i-3}, x_{i-2}, \dots, x_{i+2}, x_{i+3}$

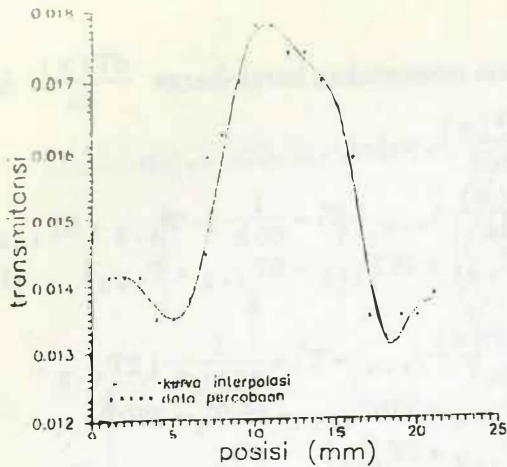
Metode ini dianggap cukup memadai asalkan data yang tersedia cukup banyak dan halus.

Penghalusan data

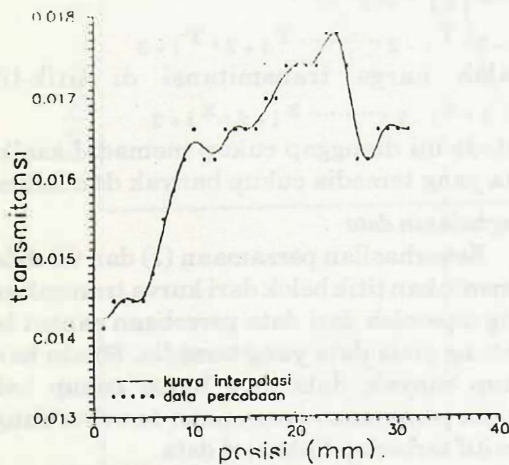
Keberhasilan persamaan (1) dan (2) dalam menentukan titik belok dari kurva transmitansi yang diperoleh dari data percobaan sangat bergantung pada data yang tersedia. Selain harus cukup banyak, data juga harus cukup halus karena persamaan-persamaan tersebut sangat sensitif terhadap fluktuasi data.

Kedua persyaratan di atas tidak bisa dipenuhi dalam penelitian ini karena pertama, data yang diperoleh sangat sedikit, yakni masing-masing hanya 21 dan 31 titik pengukuran. Hal ini disebabkan karena pengukuran kehitaman film hanya dilakukan dengan densitometer yang memiliki lebar celah minimum 1 mm, sehingga pengukuran yang dilakukan secara manual hanya bisa dilaksanakan tiap selang 1 mm. Kedua, data yang diperoleh ternyata amat berfluktuasi seperti nampak dalam Gambar 3a dan 3b (lihat halaman berikut). Penyebabnya antara lain adalah mutu film yang buruk, proses pengembangan film yang kurang sempurna dan juga karena ketidakteraturan fluks neutron dalam koli mator radiografi neutron.

Untuk mengatasi permasalahan di atas penghalusan data amat diperlukan, selain untuk meredam fluktuasi data tersebut juga untuk memperoleh data tambahan berupa interpolasi di antara data yang terkumpul. Tiap-tiap titik data dihaluskan dengan cara mencari polinomial orde 2 yang terbaik berdasarkan metode kuadrat terkecil. Koefisien polinomial tersebut diperoleh dari 5 titik di sekitar titik data yang



Gambar 3a. Data percobaan dann hasil penghalusan data dari benda uji grafit.



Gambar 3b. Data percobaan dann hasil penghalusan data dari benda uji aluminium.

hendak dihaluskan. Apabila terdapat 5 titik data yang diperoleh dari lima titik pengukuran yang masing-masing berjarak Δx yakni: $T_{i-2} = T(x_{i-2})$, $T_{i-1} = T(x_{i-1})$, $T_i = T(x_i)$, $T_{i+1} = T(x_{i+1})$, dan $T_{i+2} = T(x_{i+2})$, seperti nampak pada Gambar 2, maka di dalam selang $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ berlaku hubungan $T(x-x_i) = a + b(x-x_i) + c(x-x_i)^2$ di mana :

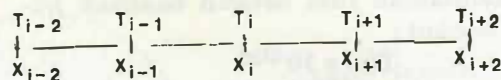
$$a = \frac{1}{35} \sum_{i=-2}^2 (17 - 5i^2) T_i$$

$$b = \frac{1}{10 \Delta x} \sum_{i=-2}^2 i T_i$$

$$c = \frac{1}{14 \Delta x^2} \sum_{i=-2}^2 (i^2 - 2) T_i$$

$$\text{dan } \Delta x = x_{i+1} - x_i$$

Dengan bentuk persamaan-persamaan di atas diperhaluslah titik data yang diperoleh dari percobaan. Selain itu dihitung pula harga interpolasi di titik tengah tiap selang pengukuran



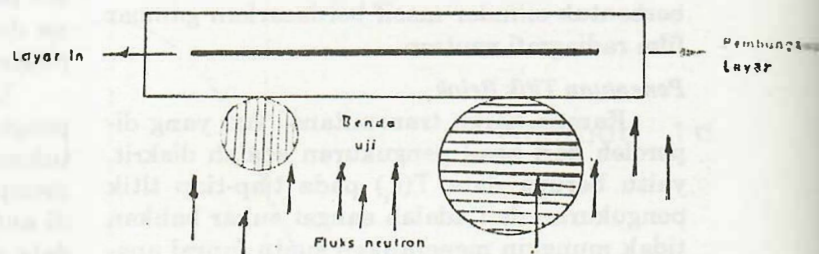
Gambar 2 : Titik-titik data.

data tersebut. Dengan mengulang proses penghalusan data beberapa kali, dimana setiap kali perhitungan dipakai hasil penghalusan data yang sebelumnya, diperoleh data yang lebih halus dan berjumlah jauh lebih banyak. Pengulangan dilakukan sampai batas maksimum data tercapai. Setelah itu penghalusan data kembali dilanjutkan, tetapi kali ini tanpa melakukan interpolasi. Ini dilaksanakan sampai data benar-benar halus, yakni tidak ada perbedaan antara hasil penghalusan terakhir dengan hasil penghalusan yang sebelumnya.

Semua proses penghalusan di atas dimaksudkan agar baik kurva data maupun turunannya benar-benar halus. Gambar 3a dan 3b menunjukkan contoh data percobaan dan hasil penghalusan data. Dari 21 titik data yang diperoleh dari pengukuran kehitaman film dari bayangan silinder grafit, didapat kurva penghalusan data yang terdiri dari 321 titik. Sedangkan 31 titik data hasil pengukuran bayangan silinder aluminium diperhalus dan diperbanyak sampai 481 titik.

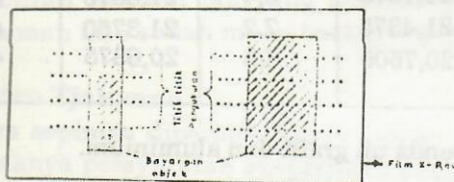
PERCOBAAN

Dalam penelitian ini dilakukan radiografi neutron terhadap benda uji berbentuk silinder masif yang terbuat dari grafit dan aluminium. Benda uji grafit memiliki garis tengah 1 mm dan Al berdiameter 2 mm. Kedua benda uji diletakkan ke dinding luar pembungkus layar radiografi neutron. Radiografi neutron dilakukan pada daya reaktor 500 KW selama 2 jam. Waktu irradiasi diambil dua jam untuk dapat memperoleh kehitaman film latar belakang yang cukup (≈ 2). Layar yang digunakan adalah Indium (Gambar 4).



Gambar 4 : Posisi benda uji dalam radiografi neutron

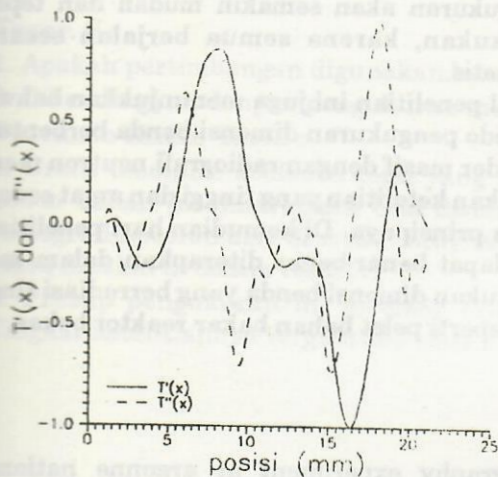
Setelah radiografi selesai dilaksanakan, reaktor dipadamkan dan layar serta benda uji disingkirkan dari kolimator radiografi neutron. Di dalam kamar gelap, film x-ray ditempelkan ke layar Indium tersebut selama ± 50 menit. Kemudian film tersebut dikembangkan. Hasilnya, berupa bayangan di atas film yang kemudian diukur kehitamannya dengan densitometer dalam arah tegak lurus sumbu silinder (Gambar 5).



Gambar 5 : Titik pengukuran kehitaman film

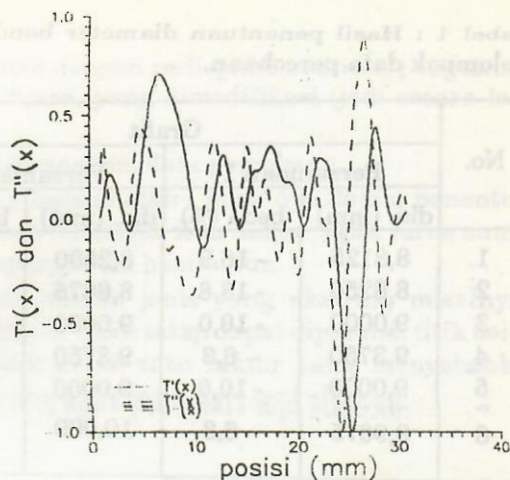
HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu contoh hasil perhitungan persamaan (1) dan (2) dapat dilihat pada Gambar 6a dan 6b, yang diperoleh berdasarkan kurva $T(x)$ pada Gambar 3a dan 3b.



Gambar 6a. Kurva turunan pertama dan kedua dari transmitansi dari benda uji grafit.

Jelas terlihat bahwa harga maksimum dan minimum dari $T'(x)$ tercapai pada saat $T''(x) = 0$. Hal ini merupakan keuntungan karena dengan memperhatikan kedua kurva tersebut dapat ditentukan dengan tepat dimana titik-titik belok berada, sehingga penentuan diameter benda uji dapat dengan mudah pula ditentukan. Kehalusan kurva $T'(x)$ merupakan bukti bahwa proses penghalusan data dengan cara yang telah diterangkan di atas adalah cukup akurat. Kurva $T''(x)$ nampak kurang memberikan informasi yang tepat tentang letak titik belok,



Gambar 6b. Kurva turunan pertama dan kedua dari transmitansi dari benda uji aluminium.

karena terdapat lebih dari 2 titik yang memiliki harga sama dengan nol. Akan tetapi dengan memperhatikan kurva $T'(x)$ dapat segera diperoleh letak titik belok yang sebenarnya. Hasil penentuan garis tengah benda uji yang diradiografi neutron dalam penelitian ini selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1. Dari masing-masing benda uji diperoleh 6 kelompok data (Tabel 1 dan 2, lihat halaman berikutnya).

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil-hasil percobaan di atas dapatlah disimpulkan hal-hal berikut ini :

1. Ketelitian pengukuran garis tengah benda uji cukup baik, walaupun data pengukuran yang diperoleh sangat sedikit dan berfluktuasi. Sumber kesalahan antara lain adalah resolusi densitometer yang terlampaui kasar, minimum 1 mm, sehingga data yang diperoleh terlalu sedikit. Buruknya homogenitas fluks neutron, proses pengembangan film yang tidak sempurna, mutu film yang jelek serta pengukuran kehitaman film yang dilakukan secara manual turut menyumbang kesalahan hasil penentuan diameter benda uji tersebut.
2. Proses penghalusan data terbukti amat membantu analisis data, terutama dalam memperoleh kurva $T'(x)$ dan $T''(x)$. Hal ini jelas terlihat bahwa walaupun data yang didapat sangat berfluktuasi, tetapi hasil perhitungan $T'(x)$ dan $T''(x)$ memperlihatkan kurva yang halus. Sekaligus ditunjukkan pula bahwa metode penghalusan data yang dipakai dalam penelitian ini adalah cukup andal.

Tabel 1 : Hasil penentuan diameter benda uji grafit dan Al yang diperoleh dalam tiap-tiap kelompok data percobaan.

No.	Grafit				Aluminium			
	Persamaan 1		Persamaan 2		Persamaan 1		Persamaan 2	
	dia. (mm)	beda (%)	dia. (mm)	beda (%)	dia. (mm)	beda (%)	dia. (mm)	beda (%)
1	8,3125	- 16,9	8,2500	- 17,5	18,3750	- 8,1	18,4375	- 7,8
2	8,6250	- 13,8	8,6875	- 13,1	18,3125	- 8,4	18,2500	- 8,8
3	9,0000	- 10,0	9,0000	- 10,0	21,2500	6,3	21,2500	6,3
4	9,3750	- 6,3	9,3750	- 6,3	21,1875	8,4	21,6875	8,4
5	9,0000	- 10,0	9,0000	- 10,0	21,4375	7,2	21,3750	6,8
6	9,9375	- 6,3	10,0000	- 0,0	20,7500	3,8	20,6875	4,4

Tabel 2 : Rangkuman hasil pengukuran benda uji grafit dan aluminium.

Material	Minimum		Maksimum		Rerata	
	dia. (mm)	beda (%)	dia. (mm)	beda (%)	dia. (mm)	beda (%)
Grafit	8,25	- 17,51	10,00	0,00	9,0469 ± 0,5566	9,50
Aluminium	18,25	- 8,80	21,69	8,40	20,2917 ± 1,4704	1,50

3. Walaupun hasil pengukuran kehitaman film untuk benda uji aluminium terlihat sangat tidak simetris, akan tetapi hasil analisis data tetap menghasilkan akurasi yang cukup baik. Ini berarti bahwa ketidakseragaman fluks neutron, kualitas film maupun proses pengembangan film tidak begitu dominan terhadap hasil penentuan dimensi benda uji. Faktor yang paling penting adalah resolusi pengukuran data, yang berarti pula jumlah data pengukuran.

Dari hal-hal di atas dapatlah disarankan agar penggunaan mikrodensitometer dalam pengukuran kehitaman film sesegera mungkin

diwujudkan. Dengan peralatan tersebut selain resolusi pengukuran dapat dipertinggi, juga pengukuran akan semakin mudah dan tepat dilakukan, karena semua berjalan secara otomatis.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode pengukuran dimensi benda berbentuk silinder masif dengan radiografi neutron menjanjikan ketelitian yang tinggi dan amat sederhana prinsipnya. Di kemudian hari penelitian ini dapat benar-benar diterapkan dalam menentukan dimensi benda yang berradiasi tinggi, seperti pelet bahan bakar reaktor bekas.

DAFTAR PUSTAKA

1. Richards, Wade J. and Larson, H. A., Radiography experiment at argonne national laboratory, Nuclear Technology, vol. 76, Maret (1987)
2. Harms, A. A., Heindler, M. and Lowe, D. M., The physical basis for accurate dimensional measurement in neutron radiography, Materials Evaluation, April (1978)
3. Basham, S.J., Grieser, D.R. and Ray, J. W., Dimensional measurement of cylindrical specimens using neutron radiography, Materials Evaluation, Juni (1970)

DISKUSI

Z.Abidin :

1. Metode apa saja yang sudah dilakukan untuk mengukur diameter selain secara neutron radiografi ?
2. Ketelitian sampai 1,5 - 9,5 % terhadap data atau percobaan lain yang dinilai ampuh .
3. Ketidaktelitian apa yang memberikah kontribusi kesalahan terbesar ?
4. Bagaimana bila silinder masifnya tidak homogen, apakah tak menjadi masalah ? (ingat hamburannya).

Putranto Ilham Yazid :

1. Untuk benda-benda berradiasi tinggi, selain metode dengan radiografi neutron, pengukuran diameter juga pernah dilakukan dengan alat ukur biasa, yang dimodifikasi (jadi secara langsung).
2. Ketelitian kesalahan 1,5 - 9,5 % adalah berasal dari analisis data percobaan.
3. Sulit memperkirakannya. Akan tetapi yang paling logis adalah (misalnya dalam penentuan diameter) bahwa posisi pengambilan data/pengukuran terutama film harus tegak lurus sumbu silinder. Ketidaktepatan posisi ini akan sangat mempengaruhi hasil ukur.
4. Asalkan objek tidak memiliki ketidakhomogenan massa jenis yang ekstrim, misalnya : berlubang, maka bisa diharapkan bahwa pada tepi silinder akan tetap dapat diperoleh titik belok. Hamburan neutron lah yang sebenarnya merupakan salah satu faktor yang menyebabkan kehitaman film sudah mulai berkurang pada jarak yang agak jauh dari tepi silinder.

Hendro Tjahyono :

Secara sepintas diperoleh kesan bahwa metode pengukuran diameter ini agak rumit dengan banyaknya persyaratan eksperimen yang harus dipenuhi dan diperlukannya pengolahan hasil eksperimen melalui manipulasi matematik/statistik maupun numerik, ketelitian yang dihasilkanpun tidak lebih baik dari alat-alat ukur konvensional yang biasa digunakan. Jadi apakah memang ada suatu alasan yang sangat kuat mengenai pentingnya metode ini sehingga tetap digunakan sampai saat ini, terimakasih.

Putranto Ilham Yazid :

Memang ada, contohnya; mengukur diameter pelet yang berada di dalam kelongsong bahan bakar bekas pakai. Tentu hal ini tidak mungkin dilakukan secara konvensional (metode ukur langsung), tanpa merusak kelongsong tersebut. Contoh lain tentu masih banyak.

Tegar. S :

1. Apakah pertimbangan digunakan benda uji grafit + aluminium ?
2. Dibandingkan dengan pengukuran menggunakan x-ray, bagaimana tingkat ketelitiannya ?

Putranto Ilham Yazid :

1. Grafit memiliki koefisien total yang besar sedangkan aluminium kecil. Dengan memakai kedua bahan ini diharapkan bisa disimpulkan bahwa metode pengukuran diameter dengan radiografi neutron bisa dipakai untuk segala jenis material. Selain itu kedua material tersebut biasa dipakai di dalam reaktor.
2. Prinsip pengukuran ini memang bisa diaplikasikan langsung kepada radiografi neutron. Tingkat ketelitiannya tergantung pada kondisi percobaannya.