

## Penentuan Perubahan Tebal dengan Metode Variasi Densitas Film

• Suparno, •• Maknur, Rangkoo, •• Sutrasno, •• Bagiyono, •• Endra, Susila  
Pusat Pendidikan dan Pelatihan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

### Abstrak

Perubahan tebal pada suatu material dapat ditentukan berdasarkan persamaan hubungan antara perubahan tebal material dengan densitas film hasil radiografi. Densitas yang dijadikan sebagai acuan adalah densitas pada bagian material yang terdapat perubahan tebal, pada bagian material nominal, dan pada badan IQI tipe lubang yang ditempatkan diatas material nominal. Penelitian dilakukan terhadap material carbon steel bentuk pelat dengan ketebalan 10 mm yang diberi celah datar bawah menggunakan mesin sinar X Rigaku Radioflex RF-250 dengan tegangan tabung 120 KV, dan digunakan IQI ASTM tipe lubang nomor 17. Hasil percobaan kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan caliper dan diperoleh perbedaan 15.93%. Hasil penelitian lebih lanjut dengan variasi tebal celah, variasi tebal penetrometer lubang, dan variasi tegangan tabung sinar X menunjukkan bahwa penerapan metode ini pada berbagai kedalaman celah dan berbagai tebal IQI diperoleh hasil dengan ketelitian yang hampir sama. Pengujian lebih teliti dapat dilakukan dengan meningkatkan tegangan tabung sinar X. Berdasarkan hasil yang diperoleh, ketelitian yang paling tinggi sebesar 2.3 % didapatkan pada tegangan tabung 150 KV. Penelitian ini merupakan penelitian awal yang perlu dikaji lebih lanjut dengan penerapan metoda statistik dan dikembangkan untuk material lain dengan bentuk geometri yang berbeda baik dengan atau tanpa pelindung (cladding).

### Pendahuluan

Uji tak rusak khususnya radiografi, memiliki peranan penting dalam pengendalian mutu suatu produk baik dalam masa fabrikasi maupun dalam masa layanan (*in-service*). Penggunaan radiografi secara konvensional digunakan sebagai alat untuk mengetahui ada tidaknya suatu cacat dalam material dan penerimaan suatu cacat berdasarkan kode atau spesifikasi yang sesuai. Dalam perkembangannya, penerapan radiografi tidak hanya sekedar untuk keperluan tersebut, tetapi dapat juga digunakan untuk keperluan khusus misalnya penentuan tebal dinding (*wall thickness*), penentuan kedalaman cacat, dan lain-lain.

Dalam metode uji radiografi, telah dikembangkan beberapa teknik untuk penentuan tebal dinding. Dalam makalah ini diperkenalkan salah satu teknik radiografi untuk pengukuran perubahan tebal dinding material pelat baja yang disebut metode variasi densitas. Dalam kehidupan sehari-hari, perubahan tebal biasanya terjadi pada

pipa akibat adanya korosi, erosi, dan lain-lain. Untuk keperluan praktiknya sulit membuat perubahan tebal sesuai dengan kondisi yang sebenarnya, karena itu perubahan tebal dibuat dengan cara memberikan celah datar bawah (*flat bottom hole*) pada pelat. Teknik penyinaran radiografi dilakukan secara sederhana dengan teknik *Single Wall Single Image* (SWSI). Perhitungan perbedaan tebal (kedalaman celah) ditentukan berdasarkan densitas film hasil radiografi pada bagian material yang mengalami perubahan tebal, densitas pada bagian material nominal (material yang tidak mengalami perubahan) dan densitas pada badan penetrometer tipe lubang tertentu yang ditempatkan pada material nominal.

### Prinsip Metode Variasi Densitas

Hubungan antara densitas film hasil radiografi (D) dengan logaritma paparan ( $\log E$ ) adalah eksponensial yang dinyatakan dengan persamaan [1] :

$$D = I_s e^{810gE} \dots\dots\dots (1)$$

dengan  $i$ , adalah kecepatan film dan  $t$  parameter yang berhubungan dengan gradien film.

Sedangkan intensitas radiasi (I) menurun secara exponential terhadap tebal material (x), yang dirumuskan dengan persamaan

$$I = I_0 B e^{-\mu x} \dots\dots\dots (2)$$

dengan B adalah "build up factor" akibat hamburan. Dengan memasukkan E sebagai hasil kali antara intensitas (I) dengan waktu (t) diperoleh hubungan antara densitas film dengan tebal material sebagai berikut :

$$\log D = \log I_s + \log e^{810gE}$$

$$\log D = \log I_s + \log e \ln e^{810gE}$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \ln e^{810gE}$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log E$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log (10 t B e^{-\mu x})$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log 10 t + 0,434 \cdot 8 \log B + 0,434 \cdot 8 \log e^{-\mu x}$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log 10 t + 0,434 \cdot 8 \log B + 0,434 \cdot 8 \log e^{-\mu x}$$

$$\log D = \log I_s + 0,4348 \log 10 t + 0,4348 \log B + 0,4348 (0,434)(-\mu x)$$

$$\log D = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log 10 t + 0,434 \cdot 8 \log B - 0,434^2 \cdot 0,11 x$$

Jika  $\log D'' = \log I_s + 0,434 \cdot 8 \log 10 t + 0,434 \cdot 8 \log B$  adalah  $\log$  densitas film tanpa material, maka

$$\log D = \log D'' - 0,434^2 \cdot 0,11 x$$

$$\log e \ln D = \log e \ln D'' - 0,434^2 \cdot 8 \cdot 0,11 x$$

$$0,434 \ln D = 0,434 \ln D'' - 0,434^2 \cdot 8 \cdot \mu x$$

$$\ln D = \ln D'' - 0,4348 \cdot \mu x$$

Persamaan dapat dinyatakan secara lebih sederhana, yaitu

$$D = D_0 e^{-f \cdot \mu x} \dots\dots\dots (3)$$

D adalah densitas film yang diakibatkan oleh radiasi setelah menembus material dengan tebal x,  $f_{\text{eff}}$  adalah koefisien atenuasi efektif yang besarnya sama dengan 0,434 8 j.l.

Gambar I memperlihatkan material dengan tebal nominal ( $X_n$ ) mengalami perubahan tebal akibat erosi sehingga ketebalannya menjadi ( $X_c$ ). Material tersebut diradiografi dengan memasang IQI lubang di atas bagian material yang tidak tererosi. Densitas film yang dihasilkan setelah radiasi menembus bagian material nominal (material yang tidak

mengalami perubahan tebal) adalah

$$D_n = D_0 e^{-\mu_{eff} X_n} \quad (4)$$

sedangkan densitas film pada bagian material yang mengalami erosi adalah

$$D_e = D_0 e^{-\mu_{eff} X_e} \quad (5)$$

Dengan membandingkan persamaan (4) dan persamaan (5), diperoleh

$$\frac{D_n}{D_e} = \frac{e^{-\mu_{eff} X_n}}{e^{-\mu_{eff} X_e}}$$

$$D_n = D_e e^{-\mu_{eff} (X_n - X_e)}$$

$$D_n = D_e e^{-\mu_{eff} \Delta X}$$

$$\ln \frac{D_n}{D_e} = -\mu_{eff} \Delta X$$

$$\ln \frac{D_n}{D_e} = -\mu_{eff} \Delta X$$

$$\Delta W = \frac{\ln \frac{D_n}{D_e}}{-\mu_{eff}} \quad (6)$$

dcngan  $\Delta W$  adalah perubahan tebal, sedangkan  $X_n$  dan  $X_e$  masing-masing adalah

densitas film pada bagian nominal material dan densitas pada bagian material yang mengalami perubahan tebal.

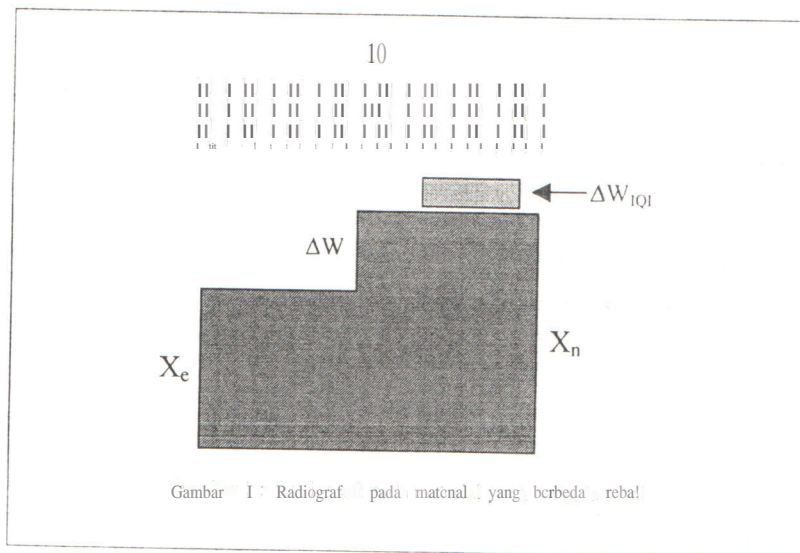
Koefisien atenuasi efektif ( $\mu_{eff}$ ) diperoleh dari hasil percobaan. Dengan membandingkan densitas film dari tebal material nominal dengan densitas pada penetrometer lubang, diperoleh persamaan berikut :

$$\mu_{eff} = \frac{\ln \frac{D_n}{D_e}}{\frac{L \cdot W_{IQI}}{Q}} \quad (7)$$

Oengan  $IQI$  adalah densitas film pada badan penetrometer lubang, dan  $L \cdot W_{IQI}$  adalah tebal penetrometer lubang yang digunakan.

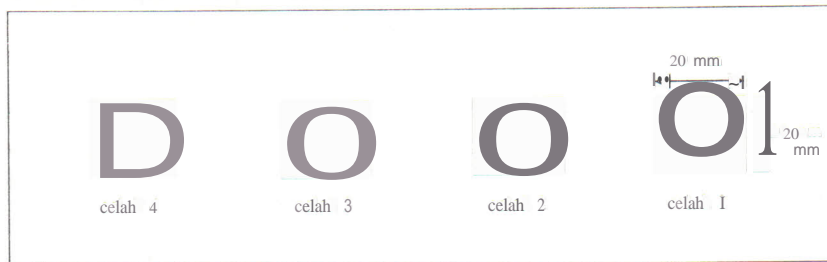
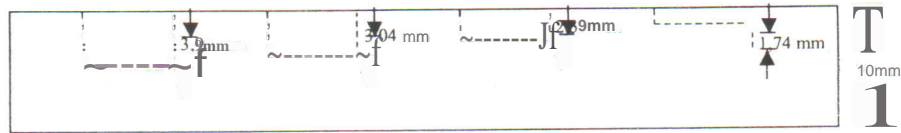
### Ekspcrimen

Benda uji dibuat dari sebuah pelat dengan tebal 10 mm. Perubahan tebal dibuat dengan memberikan celah di bagian bawah (*flat bottom hole*) segiempat dengan kedalaman berbeda, yaitu celah 1 = 1,74 mm, celah 2 = 2,39 mm, celah 3 = 3,04 mm, celah 4 = 3,99 mm, seperti ditunjukkan dalam gambar 2.



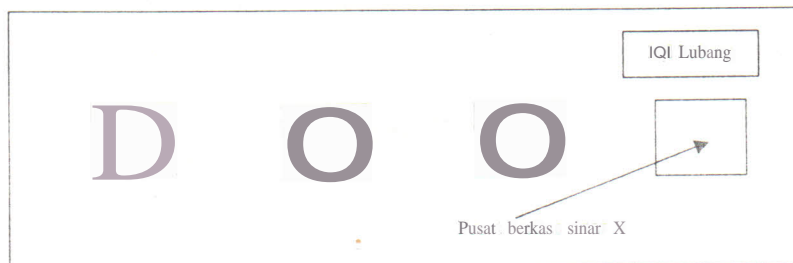
Gambar 1 : Radiograf pada material yang berbeda tebal

Tampak samping



Gambar 2 . Desain benda uji

Tampak atas



Gambar 3 : Posisi pusat berkas dan penetrometer pada benda uji

Uji radiografi dilakukan dengan teknik SWSf pada SFO 610 mm menggunakan mesin sinar x Rigaku Radioflex RF-250 EGM dengan tegangan 120 kV. Penetrometer lubang yang digunakan adalah nom or 17 dan ditempatkan pada jarak  $\pm 1$  em dari sisi lubang yang sejajar tabung sinar X. Peralatan disusun sedemikian rupa pusat berkas radiasi berada ditengah-tengah lubang yang menjadi perhatian. Lubang yang menjadi perhatian dalam pereobaan ini adalah lubang I.

Untuk mengetahui pengaruh perbeccaan tebal material dilakukan pereobaan cclengan konclisi KY dan IQf yang sama (120 KY, IQ: No. 17) pada celah I, celah 2, celah 3, dan celah 4. Pengaruh energi radiasi diamati dengan melakukan pereobaan pada celah I menggunakan IQf No. 17 dengan variasi energi 120 KY, 130 KY, 140 KY, dan 150 KY. Selanjutnya, pengaruh tebal IQf diamati cclengan melakukan pereobaan pada celah I menggunakan energi 120 KY dengan variasi pencrrarnerer No.10, 17, 25, 30.



**Hasil dan Analisa**

Perbedaan (variasi) densitas film basil radiografi dipengaruhi oleh 2 parameter yaitu kontras subyek dan kontras film. Kontras subyek dipengaruhi oleh perbedaan tebal, koefisien atenuasi linear (yang tergantung pada energi radiasi dan jenis material), dan radiasi hamburan. Sedangkan kontras film dipengaruhi oleh jenis film, densitas film, proses film dll. Kondisi percobaan dibuat sedemikian rupa faktor-faktor yang mempengaruhi kontras film dijaga tetap, antara lain jenis film, waktu penyinaran, dan proses film. Dengan demikian faktor yang mempengaruhi hasil percobaan hanya berasal dari kontras subyek.

Selain faktor diatas, khusus untuk radiografi sinar X harus diperhatikan adanya "efek heel" yang mana intensitas berkas radiasi yang dipancarkan dari focal spot tidak sama diberbagai area akibat adanya penyerapan diri oleh target. Untuk memperkecil

pengaruh efek tersebut, pusat berkas radiasi diarahkan pada celah yang menjadi perhatian, dan pengukuran densitas dilakukan disekitar pusat berkas pada arah tegak lurus terhadap sumbu tabung sinar X.

Tabel I menunjukkan hasil percobaan pada celah I dengan kedalaman 1,74 mm berdasarkan pengukuran caliper, diradiografi dengan sinar x 120 KV menggunakan IQI No. 17. Dari tujuh kali pengukuran diperoleh nilai perbedaan tebal (LW) rata-rata yang dihitung menggunakan persamaan 6 adalah 1,46 mm. Dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan caliper, terdapat perbedaan 15,93 %.

Untuk pengembangan penelitian, dilakukan beberapa percobaan dengan melakukan variasi kedalaman celah, tebal penetrameter, dan energi radiasi. Hal ini dilakukan karena faktor-faktor tersebut berpengaruh pada variable dalam persamaan yang diterapkan (persamaan 6 dan 7). Kedalaman celah mempengaruhi nilai  $\ln(D_n/D_c)$ , tebal penetrameter mempengaruhi nilai

Tabel I. Hasil penentuan kedalaman celah I dengan tegangan tabling sinar X 120 KV dan IQI No. 17

Data	D <sub>c</sub>	O <sup>n</sup>	σ <sub>1</sub>	$\ln(\sigma^2/D_c)$	μ <sub>eff</sub>	L <sub>1</sub> W mm	Perbedaan hasil %
1	3.82	279	2.54	-0.31	0.22	1.44	-17.24
2	3.74	2.80	2.57	-0.29	0.20	1.45	-16.67
3	3.78	2.80	2.57	-0.30	0.20	1.51	-13.22
4	3.76	2.80	2.56	-0.29	0.21	1.41	-18.97
5	3.83	2.83	2.59	-0.30	0.19	1.47	-15.52
6	3.93	2.95	2.72	-0.29	0.19	1.52	-12.64
7	3.82	2.84	2.60	-0.30	0.21	1.44	-17.24
Rata-rata				-0.30	0.20	1.46	-15.93

Tabel 2 : Hasil penentuan kedalaman 4 buah celah pada tegangan tabung sinar X 120 KV dan IQI No. 17

Celah	μ <sub>eff</sub>	$\ln(D_n/D_c)$	L <sub>1</sub> W Rumus mm	L <sub>1</sub> W Caliper (mm)	Perbedaan hasil %
1	0,20	-0,30	1,46	1,74	-15,93
2	0,20	-0,42	2,14	2,39	-10,46
3	0,20	-0,54	2,82	3,04	-7,27
4	0,20	-0,68	3,38	3,99	-15,29

$\ln(Dn/DlOI)$  dan  $\ln(Dn/Dl)$  yang berpengaruh pada nilai  $\ln(Dn/Dl)$ . Energi radiasi berpengaruh baik pada nilai perbandingan  $\ln(Dn/Dl)$  maupun  $\ln(Dn/DlOI)$  yang keduanya berpengaruh pada nilai  $\ln(Dn/Dl)$  dan  $\ln(Dn/DlOI)$ .

Tabel 2 adalah hasil percobaan dengan menggunakan penetrometer No. 17 dan tegangan tabung sinar X 120 KY pada beberapa kedalaman celah. Hasil percobaan menunjukkan bahwa perubahan kedalaman celah tidak mempengaruhi nilai  $\ln(Dn/Dl)$  dan menghasilkan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  dengan ketelitian yang tidak jauh berbeda, yaitu sekitar 10,46% sampai dengan 15,93%.

Tabel 3 adalah hasil percobaan dengan merubah tebal penetrometer untuk kedalaman celah dan KY yang sama. Dari Tabel 3 dapat diamati bahwa penggunaan penetrometer dengan tebal yang berbeda didapat nilai  $\ln(Dn/Dl)$  yang sedikit berbeda, yaitu 0,20 untuk IQI No. 10, 17, dan 0,18 untuk IQI No. 25, 30. Hasil tersebut menimbulkan keraguan karena secara teori nilai koefisien

atenuasi tidak dipengaruhi oleh perubahan tebal. Namun demikian, hasil perhitungan  $\ln(Dn/Dl)$  secara umum tidak jauh berbeda.

Tabel 4 adalah hasil percobaan untuk celah dan penetrometer yang sama, tetapi diradiografi dengan tegangan tabung sinar X yang berbeda. Dari data tersebut dapat diamati bahwa peningkatan energi menghasilkan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  yang semakin mengecil, dan menghasilkan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  semakin meningkat. Secara teori peningkatan energi akan menurunkan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  dan akan menurunkan kontras subyek yang berakibat menurunnya nilai  $\ln(Dn/Dl)$ . Jika penurunan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  dan nilai  $\ln(Dn/DlOI)$  seimbang, maka nilai  $\ln(Dn/Dl)$  tidak berubah berapapun energinya. Tetapi, dari data yang ada ternyata nilai  $\ln(Dn/Dl)$  meningkat, ini berarti bahwa penurunan nilai  $\ln(Dn/Dl)$  lebih besar daripada penurunan nilai  $\ln(Dn/DlOI)$ . Jika data tersebut benar, semakin akuratnya nilai  $\ln(Dn/Dl)$  akibat meningkatnya energi sulit dijelaskan dari rumus yang ada. Namun jika dikaitkan dengan teori hamburan, hasil tersebut dapat dibenarkan. Menurut teori tersebut, pada

Tabel3 : Hasil penentuan kedalaman celah I dengan menggunakan IQI yang berbeda pada tegangan tabung sinar x 120 KY

No.IQI	$\ln(Dn/Dl)$	$\ln(Dn/DlOI)$	$t_{d,W}$ Rumus mm	$t_{d,W}$ Caliper (mm)	Perbedaan hasil %
10	0,20	-0,30	1,50	1,74	-13,79
17	0,20	-0,30	1,46	1,74	-15,93
25	0,18	-0,27	1,53	1,74	-12,07
30	0,18	-0,28	1,56	1,74	-10,34

Tabel4 : Hasil penentuan kedalaman celah I menggunakan IQI No. 17 dan tegangan tabung sinar X yang berbeda

KV	$\ln(Dn/Dl)$	$\ln(Dn/DlOI)$	$t_{d,W}$ Rumus mm	$t_{d,W}$ Caliper (mm)	Perbedaan hasil %
120	0,20	-0,30	1,46	1,74	-15,93
130	0,19	-0,30	1,56	1,74	-10,34
140	0,17	-0,28	1,67	1,74	-4,02
150	0,16	-0,28	1,78	1,74	+2,30

Keterangan 0)

Tanda minus (-), nilai  $t_{d,W}$  perhitungan lebih kecil dari nilai  $t_{d,W}$  berdasarkan pengukuran caliper  
Tanda plus (+), nilai  $t_{d,W}$  perhitungan lebih besar dari nilai  $t_{d,W}$  berdasarkan pengukuran caliper

rentang energi yang digunakan dalam radiografi, semakin besar energi radiasi menghasilkan hamburan internal yang semakin kecil, sehingga perbedaan densitas yang terjadi mendekati nilai yang sebenarnya dan ketelitian hasil akan lebih akurat.

Dari data yang ada dapat diamati bahwa untuk meningkatkan ketelitian dapat dilakukan dengan meningkatkan tegangan tabung (K V). Seperti ditunjukkan dalam Tabel 4, penggunaan tegangan tabung ISO KV menghasilkan ketelitian 2,3 %.

### Kesimpulan

Hasil pengukuran kedalaman celah (~W) pada material pelat carbon steel dengan tebal nominal 10 mm secara radiografi dengan metode variasi densitas menggunakan mesin sinar X Rigaku Radioflex RF-2S0 EGM

### Daftar Pustaka

- [1] Lee, Sung Sik.; Kim, H. Young., *Thikness evaluation using a new relationship between film density and penetrated thickness in radiography*, Proceeding of the International Symposium on Research Reactor and Neutron Scienc-In Commemoration of the 10<sup>th</sup> Anniversary of HANARO, Daejon, Korea, April 2008.
- [2] Bray, Don E.; Stanley, Roderic K., *Nondestructive Evaluation - A Tooll in Design, Manufacturing, and Service*, CRe Press, Inc., 1997
- [3] Cartz, Louis., *Nondestructive Testing*, ASM International, 1995.

pada tegangan tabung 120 K V, penetrometer ASTM tipe lubang Nomor 17, dan film AGFA 07, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan menggunakan rumus hubungan antara beda tebal dengan densitas film diperoleh nilai kedalaman celah sebesar 1,46 mm. Nilai tersebut berbeda 15,93% dibandingkan hasil pengukuran menggunakan caliper.
2. Penerapan teknik variasi densitas terhadap empat kedalaman celah yang berbeda menghasilkan rentang ketelitian yang tidak jauh berbeda.
3. Penerapan teknik variasi densitas dengan menggunakan empat IQJ ASTM tipe lubang dengan tebal berbeda menghasilkan ketelitian yang hampir sama.
4. Pada tegangan tabung yang berbeda (120 sampai ISO KV), didapatkan hasil penentuan kedalaman tebal yang semakin teliti dengan meningkatnya tegangan tabung.