

KAJIAN APLIKASI METODE HAMBURAN COMPTON ENERGI GANDA UNTUK PENGUKURAN DENSITAS FLUIDA DAN UJI TAK MERUSAK PIPA

Syarip¹, Balza Ahmad² dan Pratiwan Nopianto²

¹ *Puslitbang Teknologi Maju (P3PM) - BATAN*

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281

² *Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik UGM*

Jl. Grafika 2, Yogyakarta

ABSTRAK

KAJIAN APLIKASI METODE HAMBURAN COMPTON ENERGI GANDA UNTUK PENGUKURAN DENSITAS FLUIDA DAN UJI TAK MERUSAK PIPA. Telah dilakukan penelitian simulasi aplikasi teknik hamburan Compton energi ganda pada uji tak merusak pipa untuk pengukuran densitas elektron fluida di dalam pipa dan menentukan letak serta ukuran kerusakan internal pada dinding pipa. Teknik yang dikembangkan ini menggunakan sebuah sumber radioaktif foton terkolimasi, yaitu Iridium-192 yang memancarkan sinar gamma dengan energi 317 keV dan 468 keV serta sebuah detektor titik. Untuk meminimalkan ukuran volume hambur, dipilih sudut hambur 90°. Kajian ini merupakan penelitian simulasi dengan menggunakan perangkat lunak MCNP versi 4B. Penentuan densitas elektron dilakukan untuk dua sampel fluida, yaitu air ringan (H₂O) dan air berat (D₂O). Data masukan disusun dan kemudian digunakan oleh perangkat lunak MCNP untuk menghasilkan respon detektor secara simulasi. Hasil ini kemudian diolah secara manual untuk menghitung densitas elektron pada setiap bahan, hasil kajian menunjukkan bahwa metode ini memberikan kesalahan maksimum 2,2 % untuk pengukuran densitas elektron fluida dalam pipa. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa metode ini dapat dipakai untuk evaluasi secara visual suatu obyek dengan cara menghitung tebal dinding pipa. Pada kasus tertentu, lokasi dan ukuran kerusakan pipa kemungkinan tidak dapat ditentukan dengan tepat.

Kata kunci : Metode hamburan compton energi ganda, uji tak merusak, software MCNP versi 4B

ABSTRACT

STUDY ON APPLICATION OF DUAL ENERGY COMPTON SCATTERING METHOD FOR MEASUREMENT OF FLUID DENSITY AND FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF PIPE. Research on utilization of dual energy Compton scattering method for non-destructive test (NDT) to measure the electron density of fluid inside a pipe and to locate or to determine size of defects in a pipe wall have been conducted. The method utilizes a sealed radioactive source of Iridium-193 produces incident beam of photons with energies of 317 keV and 468 keV and a single point detector. In order to minimize the dimension of the scattering volume, a 90° scattering angle (θ) was chosen. The metode of study is a simulation by using MCNP computer code version 4B. The determination of the electron densities of the fluids was done for light water (H₂O) and heavy water (D₂O). Input data were constructed and used by the MCNP code to produce simulated detector responses, the study result show that the method gives 2,2 % measurement error of electron densities in the fluids. The result also shows that the method is suitable for visual evaluation of the object by measure the pipe wall thickness. However, in a special case the location and the size of the defects may not be determined correctly.

Key words : Dual energi scattering method, non-destructive testing, MCNP software version 4B

PENDAHULUAN

Pengujian tak merusak (*Non Destructive Testing*, NDT) adalah suatu bentuk pengujian yang tidak merusak benda uji, komponen, produk atau konstruksi. Tujuan NDT adalah untuk mengetahui keadaan komponen mengandung cacat atau tidak. Selama 50 tahun terakhir ini, telah dikembangkan berbagai cara NDT untuk mendukung kegiatan inspeksi visual. Di antara metode uji tak merusak yang sudah digunakan secara meluas

seperti : metode ultrasonik, uji arus *eddy*, inspeksi partikel magnetik dan teknik radiografi [1].

Ultrasonik dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi cacat intern, tetapi kelemahan metode ini adalah sulitnya menentukan besar cacat dan tingkat kesulitan yang tinggi dalam implementasinya. Metode pengujian arus pusar (*eddy current inspection*) digunakan untuk inspeksi bahan-bahan yang menghantarkan listrik.

Kelemahan metode ini adalah hanya dapat digunakan untuk mendeteksi cacat pada atau dekat permukaan, dan untuk permukaan yang kasar, rasio gangguan sinyalnya sangat tinggi. Metode inspeksi dengan partikel magnetik hanya dapat digunakan untuk mendeteksi cacat di bawah permukaan yang tidak terlalu dalam dan terbatas untuk bahan-bahan feromagnetik. Teknik radiografi biasanya menggunakan sinar-x atau sinar- γ untuk menembus komponen yang diperiksa. Uji radiografi ini memiliki kelemahan yaitu hanya memberikan informasi posisi dan ukuran cacat pada bidang dua dimensi saja [1,2].

Pengembangan lebih lanjut dari uji radiografi adalah teknik hamburan radiasi. Informasi diperoleh dari radiasi yang dihamburkan bukan dari radiasi yang diteruskan. Pada metode ini lokasi hamburan dapat diketahui sehingga dapat diperoleh informasi dari titik ke titik di dalam obyek secara spasial. Metode hamburan ini dapat digunakan untuk mendeteksi massa jenis suatu obyek dari titik ke titik. Salah satu metode untuk menentukan densitas suatu bahan adalah dengan menggunakan hamburan Compton energi ganda foton yang dihasilkan oleh suatu sumber radioaktif. Metode hamburan Compton energi ganda menggunakan sumber radioaktif yang mempunyai dua energi. Pada penelitian ini akan dicoba penggunaan tersebut untuk menentukan densitas elektron fluida sekaligus untuk uji tak merusak (NDT) berupa pemeriksaan kerusakan internal pada pipa akibat korosi oleh fluida.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan sebuah program simulasi Monte Carlo yaitu *Monte Carlo N-Partikel* (MCNP) versi 4B untuk mensimulasikan pengukuran radiasi. Sedangkan bahan yang diuji dianggap homogen. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi bahan awal untuk penelitian lebih lanjut, khususnya penelitian dan pengembangan aplikasi metode NDT untuk uji komponen dan struktur reaktor nuklir.

TEORI

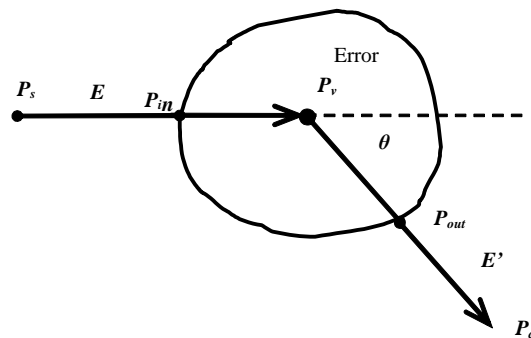
Metode Hamburan Compton

Hamburan Compton adalah tumbukan inkoheren antara foton dan elektron bebas atom dan hal ini tergantung E (energi foton) dan Z (nomor atom). Karena hamburan Compton adalah interaksi dengan elektron atom, maka kemungkinan interaksinya tergantung pada densitas medium. Oleh karena itu, hamburan Compton sesuai untuk pengukuran tidak merusak metode densitas. Untuk menjelaskan fenomena ini, ditinjau suatu sumber foton diletakkan di P_s dan dikolimasi sehingga hanya memancarkan radiasi ke satu arah saja (*pencil beam*) yaitu ke arah P_s-P_v . Foton mengalami atenuasi sepanjang P_m-P_v , kemudian selama di dalam elemen volume (*voxel*) P_v foton mungkin mengalami hamburan dengan probabilitas tertentu (fungsi σ) ke arah P_v-P_{out} , dan kemudian mengalami atenuasi sepanjang P_v-P_{out} setelah

terhambur. Sebagai akibat dari hamburan ini energi foton mengalami perubahan dari energi awalnya E_0 menjadi energi E' tergantung pada sudut hamburan θ mengikuti persamaan [3, 10] :

$$E' = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \dots\dots\dots (1)$$

dimana : E_0 dan E' adalah energi foton sebelum dan sesudah hamburan (MeV), θ sudut hamburan, dan $m_0 c^2$ energi diam elektron (0,511 MeV)



Gambar 1. Representasi skematik teknik hamburan Compton [3]

Pada detektor P_d , arah hamburan dapat ditentukan dengan menggunakan kolimasi arah untuk radiasi hamburan yang dapat berupa kolimasi mekanik (kolimator biasa) maupun dengan kolimasi elektronik (misalnya diskriminasi energi dengan *Single Channel Analyzer*). Selain itu juga dapat dilakukan dengan mengukur energi radiasi hamburan E' tersebut dan kemudian menggunakan persamaan (1) untuk menentukan sudut hamburannya. Dengan demikian dapat diukur berapa foton yang dihamburkan di titik P_v . Jadi selama perjalanannya di dalam materi, foton tersebut mengalami atenuasi sebelum dan sesudah terhambur. Respon detektor, $S(E,\theta)$ dari sudut hamburan θ pada titik P_v , dengan mengabaikan hamburan multipel dan atenuasi oleh udara, dapat ditulis sebagai berikut [4, 10] :

$$S(E,\theta) = k(E,\theta) f_i \rho_v^e f_s \dots\dots\dots (2)$$

dimana : f_i dan f_s adalah faktor atenuasi radiasi insiden dan hamburan, $k(E,\theta)$ konstanta kalibrasi sistem (cm), adalah densitas elektron pada titik P_v (e/cm^3). $k(E,\theta)$ dapat dirumuskan sebagai :

$$k(E,\theta) = S_0 D \sigma(E) \frac{p(\cos \theta)}{2\pi R^2} \eta(E') \dots\dots\dots (3)$$

dimana : S_0 adalah kuat sumber per satuan luas, D lebar voxel (cm), $\sigma(E)$ tampang lintang hamburan pada energi E , $p(\cos \theta)$ adalah kemungkinan hamburan foton pada sudut θ , R adalah arak dari titik hamburan dengan detektor, dan $\eta(E')$ adalah efisiensi detektor pada energi E'

Faktor atenuasi insiden dan hamburan (dan) dapat dirumuskan sebagai berikut [3] :

$$f_i = \exp \left[- \int_{P_n}^{P_s} \mu_t(r, E) dr \right] = \exp \left[- \int_{P_n}^{P_s} \sigma_t(r, E) \rho^e(r) dr \right] \dots \dots \dots (4)$$

$$f_s = \exp \left[- \int_{P_t}^{P_{out}} \mu_t(r', E') dr' \right] = \exp \left[- \int_{P_t}^{P_{out}} \sigma_t(r', E') \rho^e(r') dr' \right] \dots \dots \dots (5)$$

dimana : $\mu_t(r, E)$ adalah koefisien atenuasi linier pada energi foton E pada titik r (cm^{-1}), $\rho^e(r)$ densitas elektron pada titik r ; dan $\sigma_t(r, E)$ tampang lintang atenuasi total dari foton pada energi E per satuan densitas elektron bahan pada titik r . Sedangkan persamaan yang menunjukkan jumlah elektron dalam suatu atom bahan adalah [4]:

$$N_e = Z \times N_a \dots \dots \dots (6)$$

$$N_a = \frac{m}{A} N_A \dots \dots \dots (7)$$

dimana : N_e jumlah elektron dalam suatu atom, N_a jumlah atom suatu bahan, m massa bahan, A nomor massa bahan, Z nomor atom bahan, dan N_A bilangan Avogadro. Berdasarkan persamaan di atas, jumlah elektron dalam suatu atom tergantung pada massa bahan dan nomor massa. Massa bahan tergantung pada densitas bahan, sehingga jumlah elektron dalam suatu atom tergantung pada densitas bahan tersebut

Metode Energi Ganda

Metode ini berdasarkan pada teori bahwa banyaknya foton yang terhambur sebagai hasil dari interaksi Compton pada suatu bahan per-satuan volume sebanding dengan densitas elektron bahan tersebut. Metode penentuan densitas elektron suatu bahan ditentukan dengan pengukuran flux foton terhambur dari sinar foton insiden energi ganda [5]. Metode ini menggunakan hamburan Compton pada suatu sudut yang tetap, dari sebuah sumber yang memancarkan dua energi foton sekaligus yaitu E_1 dan E_2 . Metode ini

diaplikasikan pada bahan yang terdiri dua komponen seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.

Sinyal terhambur tergantung pada tampang lintang dimana tampang lintang efektif untuk tiap material Σ^{eff} , dihitung sebagai rata-rata tampang lintang atenuasi linier sinar insiden dan sinar hamburan yang diukur secara eksperimental pada dua energi untuk masing-masing material. Sinyal hamburan dari masing-masing energi dapat diekspresikan sebagai [2,3] :

$$S_1 = K_1 \exp \left(- \Sigma_1^{eff} (E_1) d_1 \right) \rho \exp \left(- \Sigma_2^{eff} (E_1) d_2 \right) \dots \dots (8)$$

$$S_2 = K_2 \exp \left(- \Sigma_1^{eff} (E_2) d_1 \right) \rho \exp \left(- \Sigma_2^{eff} (E_2) d_2 \right) \dots \dots (9)$$

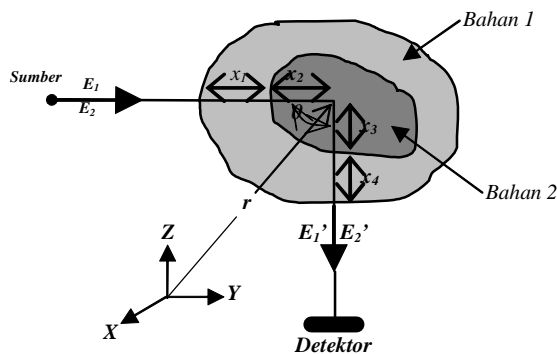
dimana : E_1 dan E_2 adalah energi sinar insiden, ρ densitas elektron dari bahan 2, Σ^{eff} adalah koefisien atenuasi linier efektif, d_1 dan d_2 panjang lintasan total dari sinar insiden dan hamburan melewati bahan pertama dan kedua, K_1 dan K_2 adalah konstanta sistem untuk energi E_1 dan E_2 . Panjang lintasan total dari sinar insiden dan hamburan melewati bahan pertama dan kedua ini tidak diketahui tetapi jumlahnya adalah tetap yaitu [3]

$$D = d_1 + d_2 \dots \dots \dots (10)$$

Kegunaan teknik ini adalah bahwa teknik tersebut meniadakan reorientasi sistem sumber-detektor selama pengukuran densitas elektron. Seperti terlihat pada Gambar 2, suatu sumber radioaktif dengan energi ganda diletakkan di depan obyek. Sebuah detektor diletakkan di sisi yang lain sehingga membentuk sudut 90° dengan sumber radiasi. Jumlah foton terhambur yang tercacah oleh detektor dari sebuah elemen volume pada titik r adalah [5, 6, 7] :

$$dI_s(r) = \frac{I(r)}{A(r)} \cdot \exp \left[- \mu_1(E) \cdot x_1 \right] \cdot \exp \left[- \mu_2(E) \cdot x_2 \right] \cdot \rho_e(r) \cdot \Omega(r) \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) \cdot \exp \left[- \mu_2(E') \cdot x_3 \right] \cdot \exp \left[- \mu_1(E') \cdot x_4 \right] \cdot \epsilon(E') \cdot dV(r) \dots \dots (11)$$

dimana : $I_s(r)$ adalah jumlah foton terhambur ke detektor per-satuan volume untuk posisi yang dicatat oleh r ; $I(r)$ jumlah foton insiden di udara pada posisi yang dicatat oleh r , $\mu_1(E)$ koefisien atenuasi linier bahan 1 untuk energi foton insiden E , $\mu_2(E)$ koefisien atenuasi linier bahan 2 untuk energi foton insiden E , $\rho_e(r)$ densitas elektron bahan 2 pada suatu titik di volume hambur, $dV(r)$ elemen volume pada suatu titik r , $d\sigma/d\Omega(E, \theta)$ tampang lintang diferensial hamburan Compton. θ sudut antara berkas foton datang dan terhambur (yang terdeteksi), $\Omega(r)$ sudut tetap pada posisi yang dicatat oleh r dan oleh muka detektor, $\mu_1(E')$ koefisien atenuasi linier bahan 1 untuk energi foton terhambur E' , $\mu_2(E')$ koefisien atenuasi linier bahan 2 untuk energi foton terhambur E' , $\epsilon(E')$ efisiensi detektor untuk energi terhambur E' , x_1, x_2, x_3, x_4 : masing-masing adalah panjang



Gambar 2. Geometri sistem sumber-detektor metode hamburan Compton energi ganda [5]

lintasan yang dilewati foton, dan $A(r)$ adalah luas berkas pada titik r

Dengan cara mengintegrasikan persamaan (11) maka didapatkan jumlah foton secara keseluruhan yang terdeteksi oleh detektor [5] :

$$I_s = \exp[-\mu_1(E) \cdot x_1] \cdot \exp[-\mu_1(E') \cdot x_4] \cdot \rho_e \cdot S \cdot \exp[-\mu_2(E) \cdot x_2] \cdot \exp[-\mu_2(E') \cdot x_3] \quad (12)$$

dimana $s = \int \frac{I(r)}{A(r)} \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) \cdot \Omega(r) \cdot \epsilon(E') \cdot dV(r) \dots\dots (13)$

S adalah intensitas hamburan rata-rata per elektron yang tergantung kepada geometri hambur. Apabila persamaan (12) disederhanakan dengan $d_1 = x_1 + x_4$ untuk bahan 1 sedangkan untuk bahan 2, $d_2 = x_2 + x_3$. Intensitas foton terhambur disajikan dalam bentuk [5] :

$$I_s(E) = \exp(-\mu^{EFF}(E) \cdot d) \cdot \rho_e \cdot S(E) \dots\dots (14)$$

dimana $d = d_1 + d_2$ adalah panjang lintasan total (lintasan insiden dan hamburan) pada suatu material. Sedangkan koefisien atenuasi efektif untuk material 1 dan material 2, μ_1^{eff} , μ_2^{eff} disajikan pada persamaan (15). Untuk foton hamburan tunggal, koefisien atenuasi efektif adalah rerata dari koefisien atenuasi linier, seperti ditunjukkan oleh [5] :

$$\mu_1^{EFF} = \frac{\mu_1(E) + \omega \mu_1(E)}{1 + \omega} \dots\dots (15)$$

dimana ω adalah konstanta proporsional bahwa $x_j = \omega \cdot x_j$. Cara penulisan serupa dapat digunakan untuk koefisien atenuasi efektif untuk material kedua μ_2^{eff} .

Persamaan (14) merupakan persamaan umum sehingga untuk setiap energi foton dapat dirumuskan seperti di bawah ini [5]:

$$I_s(E_1) = \exp(-\mu_1^{EFF}(E_1) \cdot d_1) \exp(-\mu_2^{EFF}(E_1) \cdot d_2) \cdot \rho_e \cdot S(E_1) \dots\dots (16)$$

$$I_s(E_2) = \exp(-\mu_1^{EFF}(E_2) \cdot d_1) \exp(-\mu_2^{EFF}(E_2) \cdot d_2) \cdot \rho_e \cdot S(E_2) \dots\dots (17)$$

Sistem ini terdiri tiga persamaan dengan tiga parameter yang belum diketahui yaitu (ρ_e , d_1 , d_2). Untuk mengetahui ketiga parameter tersebut yaitu dengan cara mendapatkan sinyal detektor untuk masing-masing energi $I_s(E_1)$ dan $I_s(E_2)$ (pengukuran langsung), dengan sebelumnya μ^{eff} dan S diperkirakan dahulu. Untuk mendapatkan densitas elektron (bahan 2) maka persamaan (16) dapat diubah bentuknya dengan menempatkan densitas elektron di ruas sebelah kiri sehingga persamaan tersebut menjadi [5]:

$$\rho_e = \frac{I_s(E_1)}{S(E_1)} \cdot \exp\{\mu_1^{EFF}(E_1) \cdot d_1 + \mu_2^{EFF}(E_1) \cdot (D - d_1)\} \dots\dots (18)$$

dimana :

$$d_1 = \frac{\{\mu_2^{EFF}(E_2) - \mu_2^{EFF}(E_1)\} \cdot D - \ln\left\{\frac{I_s(E_1) \cdot S(E_2)}{I_s(E_2) \cdot S(E_1)}\right\}}{\{\mu_2^{EFF}(E_2) - \mu_2^{EFF}(E_1)\} - \{\mu_1^{EFF}(E_2) - \mu_1^{EFF}(E_1)\}} \quad (19)$$

persamaan (18) ini khusus digunakan untuk menentukan densitas elektron bahan 2 dimana bahan kedua diselubungi oleh bahan pertama, menggunakan teknik hamburan Compton energi ganda. Apabila densitas elektron suatu bahan telah diketahui maka densitas bahan tersebut dapat dihitung dengan persamaan [4]:

$$\rho = \frac{\rho_e A_{ef}}{Z_{ef} N_A} \dots\dots (20)$$

dengan $Z_{ef} = \sum_i w_i Z_i$, $A_{ef} = Z_{ef} \left(\sum_i w_i \frac{Z_i}{A_i} \right)^{-1}$, dan

$$w_i = \frac{N_i A_i}{M} \dots\dots (21)$$

ρ : densitas bahan, A_{ef} : berat atom efektif, Z_{ef} : nomor atom efektif, w_i : fraksi berat unsur ke-i, N_i : jumlah atom unsur ke-i dalam senyawa atau campuran, Z_i : nomor atom unsur ke-i, A_i : berat atom unsur ke-i, L : jumlah unsur dalam senyawa atau campuran, dan M : berat molekul

Sumber Radiasi dan Detektor Foton

Karakteristik sumber radiasi yang dapat digunakan untuk teknik pengukuran densitas elektron dengan hamburan Compton harus memperhitungkan beberapa hal yaitu : besarnya energi foton sumber harus berada dalam jangkauan energi dimana efek Compton dominan, dan mampu untuk melakukan penetrasi melalui obyek yang dicitrakan [3]. Beberapa jenis radionuklida yang sering digunakan sebagai sumber radiasi foton dalam pencitraan menggunakan hamburan Compton ini a.l. : Co-60, Cs-137, Ir-192, Gd-153, dsb. Detektor yang digunakan perlu memiliki efisiensi deteksi yang tinggi, juga ukuran celah (*aperture*) dari detektor harus kecil sehingga dapat mendeteksi sinyal dengan volume hamburan yang kecil dan dengan sendirinya akan meningkatkan resolusi dari sistem pencitraan tersebut. Beberapa detektor yang sering digunakan dalam pengukuran densitas elektron menggunakan teknik hamburan Compton a.l. jenis NaI(Tl), CdTe, GeLi, dan HPGGe [3]

Program MCNP

Monte Carlo N-Particle (MCNP) merupakan sebuah kode transport yang berdasarkan pada metode Monte Carlo. MCNP merupakan program perhitungan yang menirukan secara teoretis suatu proses statistik atau acak, dapat digunakan dalam beberapa mode

transport seperti neutron, foton, elektron, gabungan foton-neutron, foton-neutron-elektron, dan foton-elektron [6].

Geometri sistem dijelaskan dalam *cell card*, yang terdiri atas nomor sel dan nomor bahan pada sel tersebut. Permukaan-permukaan yang membatasi sel-sel ditulis dalam *surface cards*. Beberapa bentuk permukaan untuk sel telah disediakan oleh MCNP seperti bentuk bola, silinder, atau *plane*. *Data cards* berisikan informasi mengenai mode transport (neutron, N; foton, P; elektron E), parameter sel, permukaan sel, spesifikasi sumber (arah, energi, sumber partikel, sel sumber, posisi, faktor pembobotan, waktu), jenis perhitungan yang diinginkan (arus permukaan, fluks permukaan, perkiraan panjang jejak, fluks pada detektor, perkiraan panjang jejak dari deposisi energi, perkiraan panjang jejak dari deposisi energi fisi, dan distribusi energi dari pulsa yang dibuat dalam detektor) dan spesifikasi bahan.

Satuan dasar yang digunakan dalam MCNP adalah panjang (cm), energi (MeV), waktu (*shake*, 10^{-8} detik), suhu (MeV, kT), densitas atom (atom/barn-cm), densitas (g/cm^3), tampang lintang (barn, 10^{-24} cm^2), jumlah pemanasan (MeV/tumbukan), dan rasio berat atom berdasarkan pada massa neutron.

Program XCOM

XCOM merupakan sebuah program yang mampu untuk menghitung tampang lintang dan koefisien atenuasi bahan dengan nomor atom kurang dari 100 pada jangkauan energi 1 keV sampai 100 GeV. Bahan yang dihitung tampang lintang dan koefisien atenuasinya dapat berupa unsur, senyawa maupun campuran. Data masukan yang diisi oleh pemakai, yaitu informasi mengenai bahan dan energi yang digunakan. Satuan keluaran dari XCOM ada tiga pilihan, yaitu cm^2/g , barn/atom atau kombinasi keduanya [6, 9].

Perhitungan ralat dilakukan menggunakan standar deviasi dari beberapa hasil simulasi. Nilai rerata diperoleh dengan rumus [4] :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \dots\dots\dots (24)$$

dimana : X_i adalah hasil simulasi ke-i, nilai rata-rata simulasi, dan N adalah banyaknya simulasi. Sedangkan standar deviasinya (σ) [4] :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \dots\dots\dots (25)$$

METODE PERCOBAAN

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : Perangkat komputer dengan

mikroprosesor : minimal frekuensi *clock* 100 MHz, memori : minimal 16 Mbyte, dan sisa ruangan *hard disk* : minimal 100 Mbyte. Perangkat lunak Monte Carlo MCNP versi 4B untuk mensimulasikan pengukuran hamburan Compton dalam suatu bahan. Perangkat lunak XCOM versi 3.1 untuk menghitung koefisien atenuasi linier bahan. Perangkat lunak Microsoft Excel untuk mengolah data dari hasil simulasi dan menghitung densitas elektron dan tebal dinding pipa.

Data masukan yang diperlukan oleh perangkat lunak MCNP adalah informasi mengenai bentuk geometri sistem, jenis bahan, serta sumber radiasi dan detektor yang digunakan. Pada penelitian ini, pengukuran dilakukan untuk 3 buah obyek dengan geometri serta bahan yang berbeda. Ketiga obyek tersebut adalah :

1. Obyek 1 adalah suatu obyek yang di dalamnya tidak terdapat kerusakan.
2. Obyek 2 adalah obyek 1 yang memiliki kerusakan internal berupa 4 buah cacat dengan ukuran berbeda yang semuanya tidak terletak pada kelipatan sudut 90° .
3. Obyek 3 adalah obyek 1 yang memiliki kerusakan internal berupa 4 buah cacat dengan ukuran berbeda di mana salah satu cacat terletak pada kelipatan sudut 90° .

Pengujian A : Menentukan Densitas Elektron Fluida

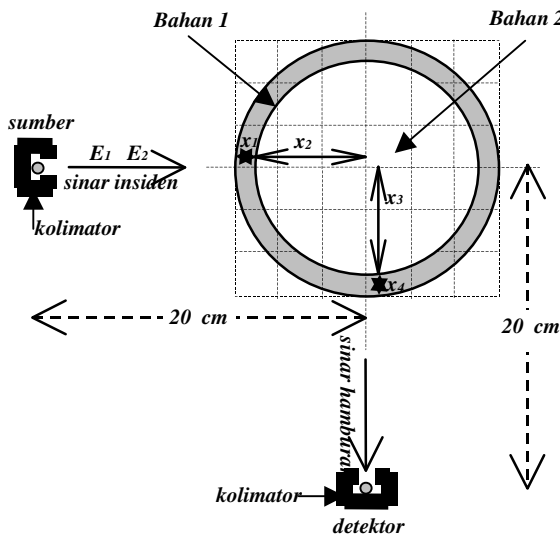
Skema bentuk geometri sistem dua dimensi pengujian A untuk obyek 1 dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4a. Konstanta sistem dihitung menggunakan obyek 1 yaitu obyek yang sudah diketahui bahwa tidak terdapat kerusakan di dalamnya.

Konstanta sistem tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan (18) yang terlebih dahulu mencari koefisien atenuasi linier bahan 1 dan bahan 2 dengan program XCOM dan juga mendapatkan intensitas hamburan untuk masing-masing energi gamma dengan cara mensimulasikan obyek 1 dengan program MCNP. Sebuah sumber foton yang diarahkan dengan suatu kolimator ke obyek dan sebuah detektor yang diletakkan di sisi lain obyek sehingga membentuk sudut 90° dengan arah pancaran sumber yang dimaksudkan untuk mengurangi besarnya volume hambur. Sumber radiasi yang digunakan adalah yang memancarkan dua energi foton sekaligus. Sumber ini diletakkan di sebelah kiri obyek, yaitu pada posisi 20 cm di sebelah kiri sumbu-y. Pipa berbentuk silinder dengan tebal 0,5 cm dialiri oleh fluida, jarak pusat silinder (pada koordinat 0, 0, 0) ke lingkaran terluar adalah 4.5 cm. Daerah di luar pipa merupakan udara yang diabaikan pengaruhnya terhadap pengukuran radiasi.

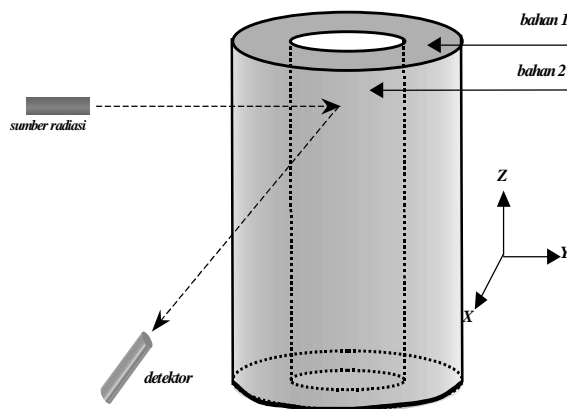
Pengujian B : Uji Tak Merusak untuk Obyek 2

Studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini adalah mendeteksi adanya cacat internal suatu pipa

terbuat dari logam akibat korosi. Skema pengujian dilukiskann pada Gambar 4b.



Gambar 3. Skema pengujian A untuk obyek (dua dimensi)



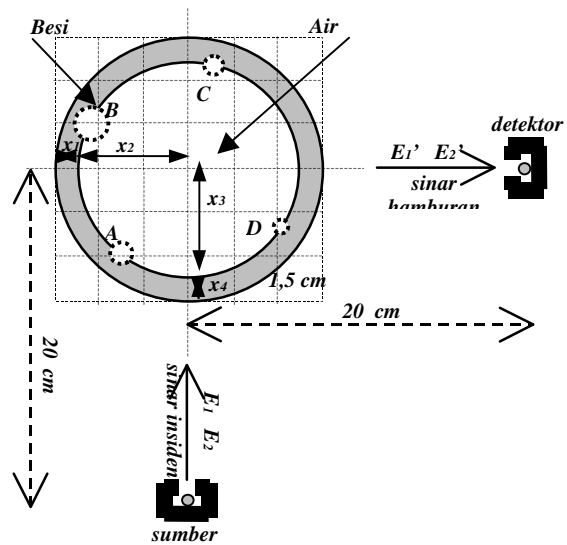
Gambar 4a. Skema pengujian A untuk obyek 1 pengukuran arah X-Y-Z (tiga dimensi)

Obyek 2 pada Gambar 4b di atas, mempunyai bentuk yang hampir sama dengan obyek 1. Pipa berbentuk silinder terbuat dari Fe, besi murni (bahan 1) yang mempunyai densitas bahan $7,87 \text{ g/cm}^3$ dengan tebal pipa $0,5 \text{ cm}$, sedangkan jarak pusat silinder (koordinat $0, 0, 0$) ke lingkaran terluar adalah $4,5 \text{ cm}$. Pipa dialiri oleh fluida berupa H_2O , air murni (bahan 2) yang mempunyai densitas 1 g/cm^3 . Daerah di luar pipa merupakan udara yang diabaikan pengaruhnya terhadap pengukuran radiasi. Pada obyek 2 ini terdapat cacat internal yang digambarkan sebagai bola-bola berisi air yang letaknya di permukaan dalam pipa yaitu : bola A terletak pada $(-2,8284, -2,8284, 0)$ dengan diameter $0,3 \text{ cm}$, bola B terletak pada koordinat $(-3,6252, 1,6905, 0)$ dengan diameter $0,35 \text{ cm}$, bola C yang terletak pada koordinat $(0,6946, 3,9392, 0)$ dengan diameter $0,25 \text{ cm}$, bola D terletak pada koordinat $(3,2766, -2,2943, 0)$ dengan diameter $0,2 \text{ cm}$. Sebuah sumber foton Ir-192 yang memiliki $E_{\gamma 1} = 317 \text{ keV}$

dan $E_{\gamma 2} = 468 \text{ keV}$ diarahkan ke obyek. Pada pengujian 2 ini dipakai sebuah detektor titik yang membentuk sudut 90° dengan arah pancaran sumber radiasi pada posisi $(20, 0, 0)$. Kerusakan tersebut akan ditentukan letaknya dengan cara memutar obyek dengan interval sudut 5° , yaitu dengan reorientasi obyek sebanyak 72 kali.

Pengujian C : Uji Tak Merusak untuk Obyek 3

Pada pengujian C pipa Fe dialiri oleh fluida berupa D_2O (bahan 2) yang mempunyai densitas $1,105 \text{ g/cm}^3$. Pada pengujian ini digunakan obyek dengan 2 cacat internalnya yang saling membentuk sudut 90° . Obyek 3 pada pengujian C ini dapat dilihat pada Gambar 4c. Pada



Gambar 4b . Skema pengujian B untuk obyek 2

obyek 3 ini di dalamnya terdapat cacat internal yang digambarkan sebagai bola-bola berisi air berat (D_2O) yang letaknya di permukaan dalam pipa yaitu : bola A terletak pada $(-3,8637, -1,0353, 0)$ dengan diameter $0,2 \text{ cm}$, bola B terletak pada koordinat $(-2,8284, 2,8284, 0)$ dengan diameter $0,25 \text{ cm}$, bola C yang terletak pada koordinat $(0, 4, 0)$ dengan diameter $0,35 \text{ cm}$, bola D terletak pada koordinat $(4, 0, 0)$ dengan diameter $0,3 \text{ cm}$.

Bahan Sampel dan Sumber Radiasi

Sifat-sifat yang harus diketahui dari bahan sampel standar ini antara lain adalah densitas bahan, massa atom/molekul relatif bahan dan jumlah elektron dalam setiap atom/molekulnya (lihat pada Tabel 1.) Sebagai radiasi foton dipilih radioisotop Ir-192 yang memiliki energi gamma ganda yaitu $E_{\gamma 1} = 317 \text{ keV}$ dan $E_{\gamma 2} = 468 \text{ keV}$. Ir-192 tersebut dipilih karena memiliki waktu paruh yang cukup untuk melakukan pengujian bahan. Ir-192 juga memiliki beberapa energi gamma yang akan menghasilkan hamburan Compton yang dominan untuk bahan-bahan pipa dalam industri yang pada umumnya mempunyai nomor massa tinggi seperti besi.

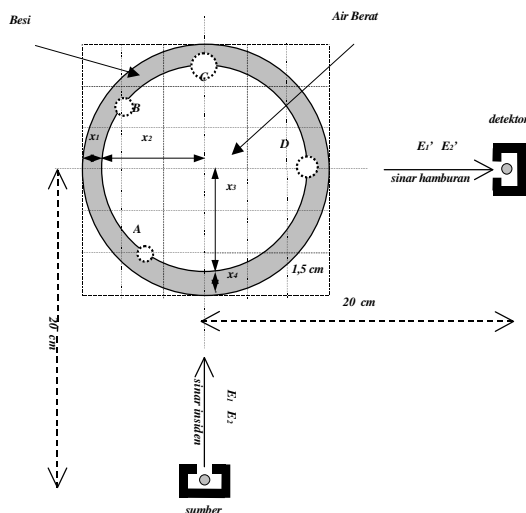
Proses Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan bentuk geometri sistem yang telah ditentukan di atas. Tahapan pertama yang harus dilakukan adalah membuat data masukan dengan bentuk geometri sistem, bahan-bahan, energi sumber dan variabel-variabel lain yang telah ditentukan. *Data Cards* pada file input berisi informasi nomor sel, nomor bahan, densitas (jika negatif dalam gr/cm^3 , jika positif dalam atom/cm^3), serta nomor permukaan yang membentuk sel tersebut. Pada pendefinisian sel, 'p' = foton, 'n' = neutron, 0 berarti diabaikan atau tidak penting karena berada di luar sistem, 1 berarti penting atau berada di dalam sistem.

Tabel 1. Bahan-bahan yang digunakan [7]

No	Bahan	Massa Jenis (g/cm^3)	Jumlah elektron/ cm^3	Koefisien atenuasi (cm^{-1})*
1.	Fe	7,87	8,48700E+23	0,8042353 0,6684306
2.	H ₂ O	1	3,34556E+23	0,1156400 0,0993240
3.	D ₂ O	1,105	3,32744E+23	0,1277822 0,1097530

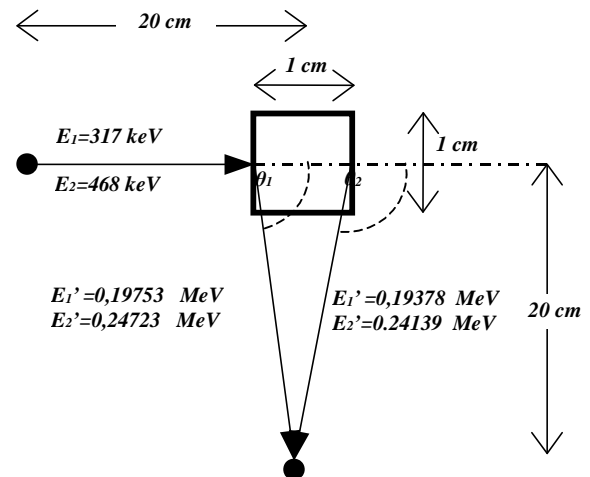
*) Koefisien atenuasi linear pada energi gamma 317 keV dan 468 keV hasil program XCOM



Gambar 4c. Skema pengujian C untuk obyek 3

Data lain yang harus diisikan adalah SCA (*single channel analyzer*) jendela energi, pada rentang berapa foton akan dicacah. Nilai energi tersebut ditentukan dengan menggunakan hubungan sudut-energi, yang diilustrasikan dengan Gambar 5.

Selanjutnya disusun *file input* dan program MCNP dijalankan, akan diperoleh nilai intensitas hamburan detektor (S_i), kemudian sumber radiasi gamma diganti dengan $E_{\gamma 2}$, untuk mendapatkan S_2 . Obyek



Gambar 5. Detektor jendela energi

diputar dengan interval 5° sampai mengelilingi obyek satu lingkaran penuh (360°).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Data

Setelah proses simulasi selesai dilakukan semuanya, data yang diperoleh diolah dengan Microsoft Excel untuk menghitung densitas elektron pada setiap titik yang dicuplik dengan memakai persamaan (19).

Perhitungan Koefisien Atenuasi Linier Efektif Bahan

Dengan menggunakan bantuan perangkat lunak XCOM versi 3.1 koefisien atenuasi efektif untuk masing-masing energi yaitu E_1 dan E_2 pada bahan 1 dan 2 dapat ditentukan. Koefisien atenuasi yang diperoleh dari perangkat lunak XCOM mempunyai dimensi (cm^2/g). Dalam penelitian ini digunakan pipa normal yang berarti $x_1 = x_4$ sehingga atenuasi linier (μ) sama dengan atenuasi linier efektif (μ_{eff}).

Perhitungan Konstanta Sistem

Konstanta sistem $S(E_1)$ dan $S(E_2)$ tergantung pada geometri sistem. Dengan menggunakan bahan standar yang sudah diketahui koefisien atenuasi efektif untuk masing-masing energi dan massa jenis elektronnya, maka dapat dihitung $S(E_1)$ dan $S(E_2)$ dengan persamaan (16) dan (17). $S(E_1)$ dan $S(E_2)$ adalah konstanta yang sifatnya tetap sehingga dapat digunakan untuk bahan-bahan yang lain selain bahan standar.

Perhitungan Densitas Elektron

Sebelum menentukan densitas elektron pada titik yang diukur, terlebih dahulu harus menentukan d_i dengan menggunakan persamaan (19), yang dalam prakteknya d_i tidak diketahui. d_i merupakan jumlah dari x_1 dan x_4 .

Setelah menentukan koefisien atenuasi efektif untuk masing-masing energi, konstanta sistem dan d_j , maka dapat dihitung densitas elektron fluida dari sejumlah titik yang disimulasikan dengan menggunakan persamaan (18). Selanjutnya densitas elektron yang diperoleh dari hasil simulasi dibandingkan dengan densitas elektron yang dihitung dari komposisi elemental bahan sebagai persentase selisih. Densitas elektron hasil simulasi kemudian dicari reratanya menggunakan persamaan (23), sedangkan ralat perhitungan densitas rerata tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan (24).

Pengujian Tak Merusak

Perhitungan d_j dapat digunakan untuk uji tak merusak bahan yaitu dalam menentukan letak dan besarnya kerusakan di dalam obyek tersebut. Dalam hal ini obyek diputar setiap 5° berlawanan dengan arah jarum jam sampai kembali ke posisi semula. Perubahan besarnya nilai d_j pada setiap posisi obyek tersebut digunakan untuk menentukan letak serta besarnya kerusakan di dalam obyek.

Hasil Simulasi

Hasil Pengujian A : Penentuan Densitas Elektron Fluida

Untuk menentukan densitas elektron maka terlebih dahulu harus dilakukan serangkaian percobaan untuk mencari konstanta sistem. Karena konstanta sistem ini tergantung dari geometri obyek, maka harus dicari secara terpisah untuk obyek 2, dan obyek 3. Konstanta sistem ini dicari dengan menggunakan obyek 1 yang tidak mempunyai cacat di dalamnya. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konstanta sistem untuk setiap obyek penelitian

Bahan Penelitian	Konstanta Sistem	
	$S_1(E_1=317 \text{ keV})$	$S_2(E_2=468 \text{ keV})$
fluida H ₂ O	1,410371564E-26	4,591333777E-27
fluida D ₂ O	1,409106057E-26	4,598570289E-27

Bahan-bahan yang digunakan pada setiap obyek adalah sampel bahan yang telah diketahui koefisien atenuasi linier dan densitas elektron berdasarkan komposisi elemennya. Hal ini diperlukan untuk menguji kemampuan metode hamburan Compton energi ganda dalam menentukan densitas elektron bahan pada masing-masing kasus tersebut. Setiap obyek didesain dengan ukuran yang sama. Obyek 2 dengan pipa terbuat dari besi (Fe) dan fluida berupa air murni (H₂O). Obyek 3 dengan pipa yang terbuat dari besi (Fe) dan

fluida berupa air berat (D₂O). Untuk mengetahui densitas elektron fluida pada setiap kasus, maka diambil sebanyak 72 kali pencacahan dengan posisi penyinaran yang berbeda terhadap masing-masing obyek percobaan, di mana obyek diputar sebesar 5° berlawanan dengan arah jarum jam sampai kembali ke posisi awal.

Rangkuman hasil perhitungan densitas tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. Terlihat bahwa densitas elektron fluida untuk masing-masing kasus mempunyai nilai beda persentase yang bervariasi dengan rerata kesalahan perhitungan densitas elektron, untuk fluida H₂O adalah 1,143185%, untuk fluida D₂O adalah 2,187628%. Beda persentase densitas elektron yang bervariasi ini disebabkan pengaruh adanya cacat bahan karena korosi yang terjadi di dalam pipa, apabila sinar gamma melewati cacat yang lebih besar maka kesalahan perhitungan densitas elektron akan semakin besar. Densitas elektron yang dihitung berdasarkan hamburan Compton (ρ_{cs}) ini merupakan hasil rerata dari densitas elektron yang dihitung dari masing-masing posisi obyek dan kemudian dibandingkan hasilnya dengan densitas elektron yang dihitung berdasarkan komposisi elemental (ρ_{ec}).

Tabel 3. Perbandingan densitas elektron dengan metode hamburan Compton energi ganda dengan densitas elektron berdasarkan komposisi elemental

Bahan Penelitian	Konstanta Sistem	
	$S_1(E_1=317 \text{ keV})$	$S_2(E_2=468 \text{ keV})$
fluida H ₂ O	1,410371564E-26	4,591333777E-27
fluida D ₂ O	1,409106057E-26	4,598570289E-27

Keterangan : ρ_{ec} = densitas elektron berdasarkan komposisi elemental, dan ρ_{cs} = densitas elektron berdasarkan hamburan Compton,

$$\% \text{ beda} = \left(\frac{\rho_{cs} - \rho_{ec}}{\rho_{ec}} \right) \times 100 \%$$

Dari Tabel 3. dapat dilihat bahwa hasil penghitungan densitas elektron dengan menggunakan metode hamburan Compton energi ganda untuk ketiga kasus tersebut terjadi perbedaan dengan densitas elektron dari komposisi elementalnya sebesar 1,143185% sampai dengan 2,187628%. Perbedaan ini disebabkan oleh adanya kerusakan yang terdapat di dalam obyek sehingga mengakibatkan hasil penghitungan densitas elektron dengan metode hamburan Compton energi ganda menjadi kurang akurat. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk menentukan densitas elektron dengan kesalahan yang semakin kecil apabila di dalam obyek terdapat kerusakan yang semakin sedikit.

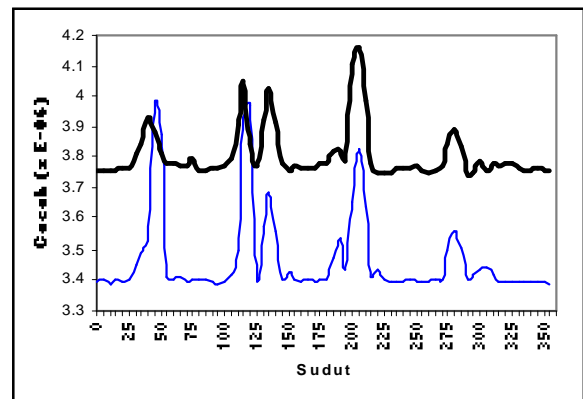
Hasil Pengujian B: Uji Tak Merusak untuk Obyek 2

Kerusakan internal akibat korosi fluida yang mengalir di dalam pipa didesain sebagai bola-bola yang berisi fluida yang letaknya di permukaan dalam pipa (vertikal di tengah-tengah sumbu-z) dengan diameter 0,2 cm, 0,3 cm, 0,25 cm dan 0,35 cm yang masing-masing secara berurutan terletak pada koordinat (X, Y, Z) sebagai berikut (3,2766,-2,2943, 0), (-2,8284, -2,8284, 0), (0,6946, 3,9392, 0) dan (-3.6252, 1.6905, 0).

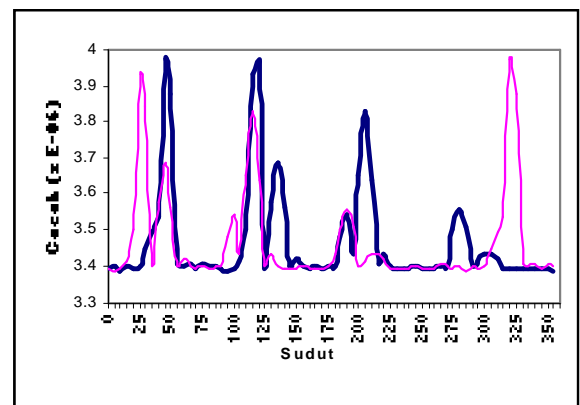
Data yang diambil dan diolah untuk menentukan kerusakan internal dari pengujian B ini adalah intensitas hamburan (I_s) keluaran detektor yang berupa respon detektor terhadap hamburan sinar gamma. Dalam bentuk grafik dengan sudut putar obyek sebagai sumbu-x dan respon yang dihasilkan oleh detektor sebagai sumbu-y dilukiskan pada Gambar 6. Gambar tersebut memperlihatkan hasil pencacahan hamburan Compton pada detektor yang terletak pada posisi (20, 0, 0) untuk energi gamma 317 keV dan untuk energi gamma 468 keV dari radioisotop Ir-192.

Berdasarkan Gambar 6 tersebut, secara umum intensitas hamburan Compton yang berasal dari energi gamma $E_1 = 317$ keV mempunyai nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan intensitas hamburan dari energi gamma $E_2 = 468$ keV. Karena pada sudut hambur yang sama energi gamma terhambur dari E_1 lebih kecil daripada E_2 . Dari Gambar 6. tersebut juga dapat diketahui bahwa di dalam obyek 2 telah terjadi kerusakan yang ditandai dengan peningkatan intensitas hamburan hasil keluaran detektor. Peningkatan intensitas hamburan ke detektor tersebut disebabkan karena bahan yang terkorosi pada umumnya memiliki massa jenis lebih kecil dibandingkan dengan bahan pipa sehingga koefisien atenuasi bahan terkorosi juga semakin kecil. Akibatnya sinar gamma akan mengalami atenuasi yang lebih kecil saat melewati bahan pipa yang telah terkorosi daripada bahan pipa asli, sehingga kemungkinan untuk terhambur dan sampai ke detektor akan menjadi lebih besar. Untuk membedakan besarnya kerusakan yang terjadi di dalam pipa dapat dilihat pada intensitas hamburan yang dihasilkan detektor, kerusakan yang lebih besar ditandai dengan cacah yang dihasilkan detektor juga lebih besar. Peningkatan intensitas hamburan itu terjadi pada daerah di dalam obyek setelah obyek diputar sampai pada posisi $45^\circ, 115^\circ, 135^\circ, 190^\circ, 205^\circ, 280^\circ$ dan 300° berlawanan dengan arah jarum jam.

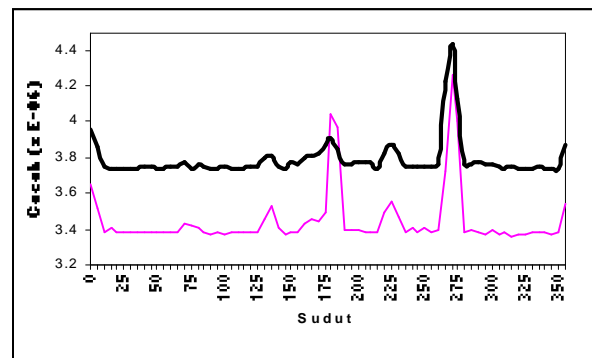
Jika hasil letak kerusakan ini dibandingkan dengan letak kerusakan pada desain awal obyek 2 maka terdapat beberapa kesalahan dalam menentukan letak kerusakan. Untuk mencari letak kerusakan dengan tepat, intensitas hambur untuk masing-masing energi gamma digeser sejauh 90° ke kiri. Hal ini mengacu pada detektor ditempatkan pada koordinat (20, 0, 0) sedangkan sumber terletak pada koordinat (0, -20, 0) sehingga membentuk sudut 90° terhadap titik hambur. Hasil penggeseran tersebut dapat dilihat pada Gambar 7a dan Gambar 7b.



Gambar 6. Hasil pencacahan hamburan Compton untuk pengujian B pada energi gamma = 317 keV (garis tipis) dan energi gamma = 468 keV (garis tebal)



(a) energi gamma = 317 keV



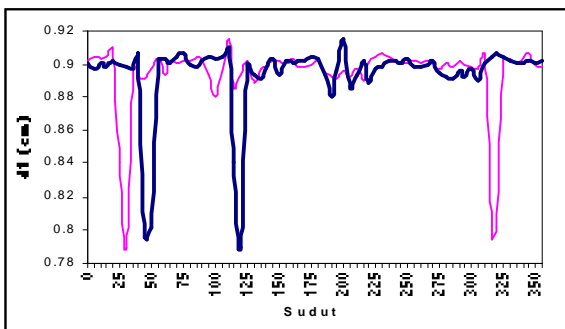
(b) energi gamma = 468 keV

Gambar 7. Hasil pencacahan hamburan Compton untuk pengujian B pada energi gamma = 317 keV dan energi gamma = 468 keV

Keterangan : grafik asli (tebal) dan grafik asli digeser ke kiri 90° (tipis)

Dari hasil penggeseran tersebut terlihat bahwa terdapat tiga kerusakan di dalam obyek yaitu terletak pada daerah setelah obyek diputar dengan posisi sudut $45^\circ, 115^\circ, 190^\circ$, sedangkan 305° (berdasarkan desain awal obyek 2) belum terlihat dengan cara ini. Urutan ukuran cacat dari besar ke kecil adalah $45^\circ, 115^\circ, 190^\circ$ berdasarkan Gambar 7a, sedangkan jika ditinjau dari Gambar 7b urutan ukuran cacat adalah $115^\circ, 45^\circ, 190^\circ$.

Untuk menentukan letak korosi sekaligus besarnya korosi di tempat cacat tersebut, dihitung d_i dari persamaan 16 yang merupakan hasil penjumlahan antara x_i dan x_s yaitu ketebalan pipa. Berdasarkan nilai d_i tersebut, dapat ditentukan letak dan besarnya korosi yaitu ditandai dengan adanya penurunan nilai d_i yang berarti berkurangnya ketebalan bahan pipa x_i dan/atau x_s , dilukiskan dengan Gambar 8. Terlihat bahwa untuk pengujian B ini korosi telah terjadi pada beberapa tempat, di antaranya pada posisi setelah obyek diputar sebesar 45° , 115° , 190° dan 305° berlawanan dengan arah jarum jam dengan ukuran korosi yang terbesar adalah pada posisi 115° .



Gambar 8. nilai d_i pada setiap posisi pengukuran untuk pengujian B

Keterangan : grafik asli (tebal) dan grafik asli digeser 90° ke kiri (tipis)

Dengan menggunakan nilai d_i untuk menentukan posisi dan ukuran cacat maka posisi kerusakan pada 305° dapat terlihat dengan jelas. Hasil akhir posisi dan ukuran korosi yang terjadi pada pengujian B dapat dilihat pada Tabel 4. Sesuai dengan Tabel 4, urutan posisi cacat yang didapatkan dari hasil penelitian dari besar ke kecil adalah 115° , 45° , 190° , 305° . Hasil yang diperoleh dari pengujian B ini telah sesuai dengan desain awal dari obyek penelitian, baik letak maupun ukuran cacatnya.

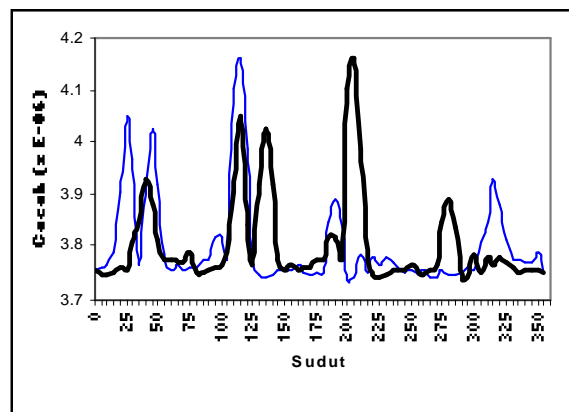
Dengan demikian, pada geometri ini metode hamburan Compton energi ganda mampu mendeteksi posisi cacat internal di dalam obyek dan sekaligus menentukan ukuran cacat dengan tepat.

Tabel 4. Lokasi dan ukuran cacat dari hasil penelitian untuk pengujian B

Cacat	Lokasi cacat	d_i (tebal pipa)	Ukuran	Diameter cacat
A	45°	0.796244118	Besar	0,3
B	115°	0.789355021	Paling besar	0,35
C	190°	0.879885330	Sedang	0,25
D	305°	0.889461645	kecil	0,2

Hasil Pengujian C : Uji Tak Merusak untuk Obyek 3

Pengujian C ini menggunakan besi murni (Fe) sebagai bahan pipa dan air berat (D_2O) sebagai fluida yang mengalir di dalam pipa. Pengujian C ini menggunakan obyek yang mempunyai 2 cacat korosi dengan ukuran yang berbeda yang membentuk sudut 90° antara keduanya. Hasil lengkap dari pencacahan hamburan gama dari obyek 3 ini disajikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 9. Dari hasil keluaran detektor sebagaimana Gambar 9. terdapat kenaikan intensitas hamburan yang menandakan adanya kerusakan yang terdapat di dalam obyek 3 untuk masing masing detektor terjadi pada sudut putar 0° , 135° , 180° , 225° , 270° dan 355° .



Gambar 9. Hasil pencacahan hamburan Compton untuk pengujian C pada energi gamma = 317 keV dan energi gamma = 468 keV

Keterangan : energi gamma = 317 keV (tipis) dan energi gamma = 468 keV (tebal)

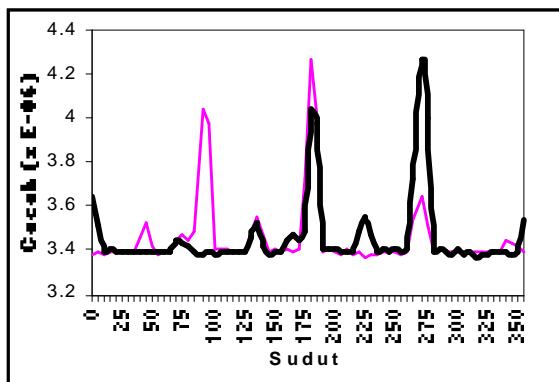
Setelah grafik digeser sebesar 90° ke kiri sebagaimana Gambar 10.a dan Gambar 10.b serta dengan mengamati puncak-puncak kurva kenaikan intensitas hamburan yang saling berhimpit diperoleh informasi kerusakan terjadi pada empat daerah yaitu setelah obyek diputar 75° , 135° , 180° , 270° sedangkan untuk urutan ukuran kerusakan dari besar ke kecil yaitu 270° , 180° , 135° , 75° . Pada langkah ini hasil yang diperoleh belum sesuai dengan desain awal yaitu pada ukuran kerusakannya.

Untuk menentukan posisi dan ukuran kerusakan yang terjadi di dalam pipa tidak mungkin hanya dengan mengamati perubahan intensitas hamburan hasil keluaran masing-masing detektor pada setiap posisi obyek. Oleh karena itu perlu informasi lain berupa ketebalan pipa (d_i), hasil perhitungan d_i pada setiap posisi obyek dapat digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 11. Dari Gambar 11. terlihat bahwa obyek telah terkorosi internal setelah pipa diputar sebesar 75° , 135° , 180° , dan 270° . Untuk mengetahui ukuran kerusakan itu dapat dilihat nilai d_i pada Tabel 5.

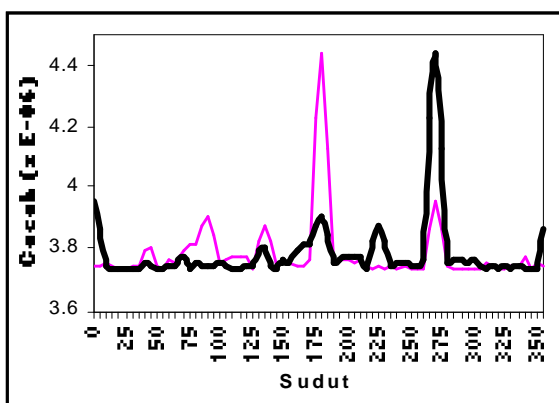
Tabel 5. Lokasi dan ukuran cacat dari hasil penelitian untuk pengujian C

Cacat	Lokasi cacat	d_i	Ukuran	Diameter cacat
A	75°	0.886143714	Kecil	0,2
B	135°	0.878157264	Sedang	0,25
C	180°	0.782891865	Paling Besar	0,35
D	270°	0.838465514	Besar	0,3

Setelah dibandingkan antara hasil penelitian dengan desain awal obyek maka dapat diambil kesimpulan bahwa pada geometri obyek ini metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk mendeteksi letak kerusakan serta menentukan ukuran kerusakan dengan tepat sesuai dengan desain awal obyek 3.



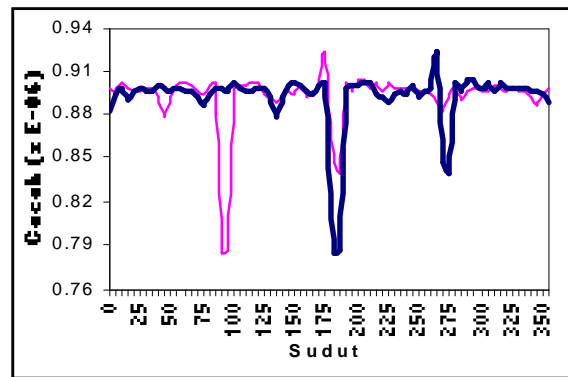
(a) energi gamma = 317 keV



(b) energi gamma = 468 keV

Gambar 10. Hasil pencacahan hamburan Compton untuk pengujian C pada energi gamma = 317 keV dan energi gamma = 468 keV

Keterangan : grafik asli (tebal) dan grafik asli digeser ke kiri 90° (tipis)



Gambar II.. nilai d_i pada setiap posisi pengukuran untuk pengujian C

Keterangan : grafik asli (tebal) dan grafik asli digeser 90° ke kiri (tipis)

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.:

1. Metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk menentukan densitas elektron fluida di dalam pipa. Pada dua kasus penelitian ini diperoleh persentase kesalahan di bawah 2% (2,1876%).
2. Kerusakan akibat korosi yang terjadi di permukaan dalam pipa menyebabkan nilai densitas elektron di setiap titik uji pada obyek terdeteksi sangat bervariasi.
3. Metode hamburan Compton energi ganda dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran kerusakan internal yang terdapat di dalam suatu obyek dengan tepat, dengan cara menghitung perubahan tebal bahan pada masing-masing posisi obyek.
4. Pada kasus, yaitu obyek yang memiliki beberapa cacat yang terletak pada lokasi dengan perbedaan sudut 90° , maka lokasi dan ukuran cacat yang terdapat di dalam obyek tersebut ada kemungkinan tidak dapat ditentukan dengan tepat.

DAFTARACUAN

- [1]. ABDELFAH, M., YACOUT, MICHAEL H., VAN HAAREN, DUNN W. L., *A Limited-scan Backscatter Technique for Detection of Hidden Corrosion*, **48** (10-12) (1997) 1313-1320
- [2]. ACHMAD, B, *Point-by-Point Partial Imaging for Non-Destructive Evaluation Using Radiation Scattering Technique*, Forum Teknik, **25** (1) Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, (2001)
- [3]. HUSSEIN, E.M.A., *Compton Scatter Imaging system*, Bioinstrumentation : Research Development and Applications, Butterworths Publications, Storeham, MA, D.L. Wise, (1990)

- [4]. TSOULFANIDIS, N. , *Measurement and Detection of Radiation*, Hermisphere Publishing Corporation, (1983) 141-151
- [5]. HUDDLESTON, A.L., WEAVER J.B., , *Dual-energy Compton-scatter Densitometry*, Pergamon, (1983) 1997-1002
- [6]. BRIESMEISTER, J.F., , *MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Manual Program, Version 4B, Los Alamos Laboratory, (1997)
- [7]. HUDDLESTON, A.L., SACKER, J.P., , *The Determination of Electron Density by the Dual-Energy Compton- Scatter Method*, Pergamon, **12**, (1984) 13-19
- [8]. HUDDLESTON, A.L., SACKLER, J.P., DUNN, S.T., *Multiple Scattering in Dual-Energy Compton Scatter Densitometry*, Elsevier Science Publishers B.V., (1987) 351-354
- [9]. KHIEM, L.H., KHAI, N.T., NGHIEP, T.D., MY, N.T., Monte Carlo Simulation For Reproducing Image Of An Object Using Compton Back Scattering Affect, *15th World Conference on Non-destructive Testing : Proceeding*, Rome, (2000)
- [10]. MIT Department of Physics, January , *Compton Scattering*, (2003) ([http://web.mit.edu/afs/athena/course/8/813/JLExperiment/Compton Scattering](http://web.mit.edu/afs/athena/course/8/813/JLExperiment/Compton%20Scattering))