

# Perkembangan Penggunaan Teknik Hamburan Compton Sinar Gamma pada Aplikasi Sistem Uji Tak-Merusak

Mona Berlian Sari<sup>1,a)</sup>, Kisna Pertiwi<sup>1,b)</sup>, dan Mitra Djamal<sup>1,c)</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Fisika Instrumentasi,  
Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>a)</sup> na.liansha@gmail.com (corresponding author)

<sup>b)</sup> kisnapertiwi@gmail.com

<sup>c)</sup> mitra@fi.itb.ac.id

## Abstrak

*Salah satu gejala fisis yang terjadi ketika foton sinar gamma berinteraksi dengan suatu material ialah hamburan Compton. Pada fenomena hamburan Compton, foton mengalami defleksi dari arah pergerakannya semula dengan sudut hamburan tertentu setelah berinteraksi dengan elektron di dalam material. Teknik hamburan Compton merupakan salah satu teknik yang digunakan pada aplikasi uji tak-merusak. Beberapa sistem uji tak-merusak menggunakan teknik hamburan Compton sinar gamma diterapkan pada uji ketahanan bahan, pendeteksian rongga, retakan, dan kebocoran pipa minyak maupun gas. Teknik hamburan Compton dapat juga diaplikasikan untuk mengukur densitas bahan. Paper ini mendeskripsikan perkembangan penggunaan metode hamburan Compton pada berbagai aplikasi khususnya uji tak-merusak selama lima tahun terakhir untuk menemukan kelebihan dan prospek penelitian menggunakan teknik hamburan Compton di masa depan. Pada umumnya penggunaan teknik hamburan Compton dipilih sebagai alternatif keterbatasan penggunaan metode transmisi pada pengukuran dimana akses dari dua sisi tidak mungkin dilakukan.*

*Kata-kata kunci: Hamburan Compton, sinar gamma, uji tak-merusak*

## PENDAHULUAN

Sinar gamma merupakan sinar radioaktif yang memiliki energi tinggi dengan panjang gelombang yang pendek dalam spektrum elektromagnetik. Sinar gamma diproduksi oleh transisi energi karena percepatan elektron. Dalam beberapa tahun terakhir sinar gamma banyak dimanfaatkan pada aplikasi uji tak-merusak untuk melakukan pengujian terhadap suatu bahan di bawah permukaan yang sulit untuk dideteksi secara visual tanpa menyebabkan kerusakan pada bahan yang diuji. Energi sinar gamma yang tinggi mengakibatkan foton yang dihasilkan mampu melakukan penetrasi hingga kelapisan bahan yang diteliti. Berbagai penelitian menggunakan sinar gamma telah banyak dilakukan seperti pengamatan perbedaan intensitas hamburan balik foton gamma berenergi 1,12 MeV dari target elemen yang berbeda seperti Zn, Al, Sn, Fe dan C serta campurannya [1], menentukan ketebalan bahan menggunakan hamburan sinar gamma <sup>137</sup>Cs [2], penggunaan sinar gamma dengan energi 662 keV dan 511 keV pada pengukuran koefisien atenuasi massa beton [3], pengukuran massa jenis fluida dalam pipa polietilen menggunakan <sup>137</sup>Cs [4], pemeriksaan ketahanan kawat baja pada jembatan menggunakan <sup>192</sup>Ir [5], dan penerapan teknik hamburan gamma dengan sumber gamma <sup>137</sup>Cs 5 mCi (185 MBq) untuk uji material [6].

Penelitian di bidang uji tak merusak menggunakan sumber sinar gamma pada umumnya menggunakan teknik transmisi. Teknik transmisi menerapkan hukum Lambert-Beer dengan membandingkan intensitas sinar gamma sebelum dan sesudah melewati sampel. Di satu sisi teknik ini memiliki berbagai keuntungan, misalnya sampel dapat diakses dari berbagai sisi serta koefisien atenuasi sampel dapat ditentukan. Namun, untuk kasus tertentu teknik pengukuran transmisi tidak dapat diterapkan seperti pada investigasi lapisan aspal. Sehingga diperlukan metode hamburan sinar gamma yang presisi dan efektif untuk objek dimana akses dari kedua sisi tidak mungkin dilakukan.

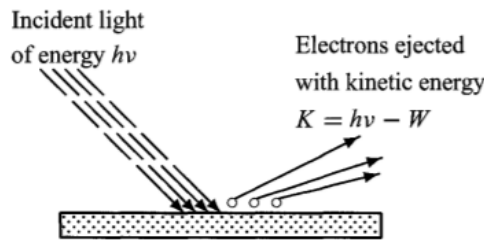
### TEKNIK HAMBURAN COMPTON

Sinar gamma merupakan salah satu sinar radioaktif yang kemampuan penetrasinya paling dalam dibandingkan sinar radioaktif lainnya, seperti alfa dan beta. Interaksi radiasi sinar gamma dengan materi dapat diungkapkan sebagai koefisien atenuasi  $\mu$  dan peluang interaksi persatuan panjang per densitas atom bahan,  $\sigma$  [7, 8]

$$\sigma = \frac{\mu}{N} = \mu \frac{A}{\rho N_A} \tag{1}$$

dengan  $N$  adalah densitas atom bahan,  $\rho$  adalah densitas bahan absorpsi,  $A$  adalah massa atom dan  $N_A$  adalah bilangan Avogadro.

Ketika sinar gamma berinteraksi dengan suatu material maka akan terjadi beberapa gejala fisis seperti efek fotolistrik, hamburan Compton, hamburan Rayleigh, produksi pasangan dan sebagainya. Efek foto listrik adalah suatu gejala terpancarnya elektron dari sebuah bahan yang disinari. Ilustrasi fenomena efek fotolistrik dapat dilihat pada Gambar 1. Efek fotolistrik adalah interaksi foton dengan atom pada bahan yang mengakibatkan terjadinya loncatan elektron. Energi yang dibawa oleh foton digunakan untuk melepaskan elektron dari logam yang berenergi  $W$  (yang disebut fungsi kerja, yang nilainya bergantung pada bahan) dan sisanya diberikan kepada elektron sebagai energi kinetik  $K$  untuk bergerak dengan kecepatan  $v$  [9].



Gambar 1. Ilustrasi fenomena efek fotolistrik [8]

Elektron orbital dari atom terpelempar oleh tumbukan sinar gamma dan energi gamma menjadi elektron bebas dengan energi kinetik fotoelektron  $E_{pe}$  ialah

$$\tag{2}$$

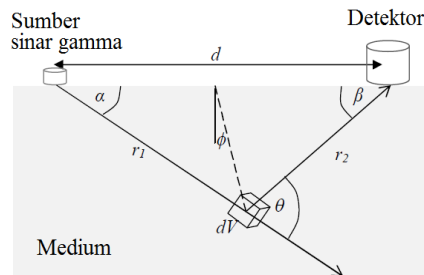
dengan  $E_b$  adalah energi ikat fotoelektron pada kulit atom. Energi radiasi hanya sebagian saja diserap untuk mengeluarkan elektron dari atom (fotoelektron) sedangkan sisanya akan terpancar sebagai radiasi terhambur. Efek Compton terjadi pada elektron-elektron bebas atau terikat secara lemah pada lapisan kulit terluar pada penyinaran dengan energi radiasi yang lebih tinggi yaitu berkisar antara 10 sampai 100 MeV [5]. Pada hamburan Compton, radiasi yang diinduksikan pada material akan memancarkan elektron dan kehilangan beberapa energi. Pada interaksi ini, foton berenergi  $E_\gamma$  (MeV) mengalami defleksi dari arah pergerakannya semula dengan sudut hamburan  $\theta$  setelah berinteraksi dengan elektron bahan. Energi foton terhambur  $E_{sc}$  (MeV) dituliskan dalam persamaan (3) [10, 8]

$$E_{SC} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{0.511}(1 - \cos\theta)} \tag{3}$$

Sedangkan sebagian energi lainnya diberikan kepada elektron penghambur atau elektron recoil  $E_e$ . Besarnya  $E_e$  (MeV) ditentukan dari persamaan (4)

$$E_e = E_\gamma - E_{SC} \tag{4}$$

Peluang terjadinya hamburan Compton per atom dari material absorber bergantung pada jumlah elektron sebagai target hamburan dan meningkat secara linier dengan nomor atom ( $Z$ ) bahan absorber. Pengukuran spektrum energi gamma diklasifikasi dalam dua jenis pengukuran yaitu transmisi dan hamburan. Pada peristiwa hamburan gamma (hamburan inkoheren), foton terhambur mengalami perubahan arah dan energi. Hamburan yang mungkin terjadi dapat berupa hamburan tunggal atau hamburan berulang. Pergerakan berkas foton dari sumber hingga dapat terdeteksi oleh detektor dapat diklasifikasikan dalam tiga tahapan proses. Pertama adalah proses atenuasi berkas foton oleh medium ketika pergerakan menuju titik interaksi, kedua adalah peristiwa hamburan foton oleh elemen volum, dan ketiga adalah proses atenuasi berkas foton terhambur menuju detektor oleh medium seperti dideskripsikan oleh Wirawan et al [4] melalui Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi hamburan foton gamma oleh volume  $dV$  [4]

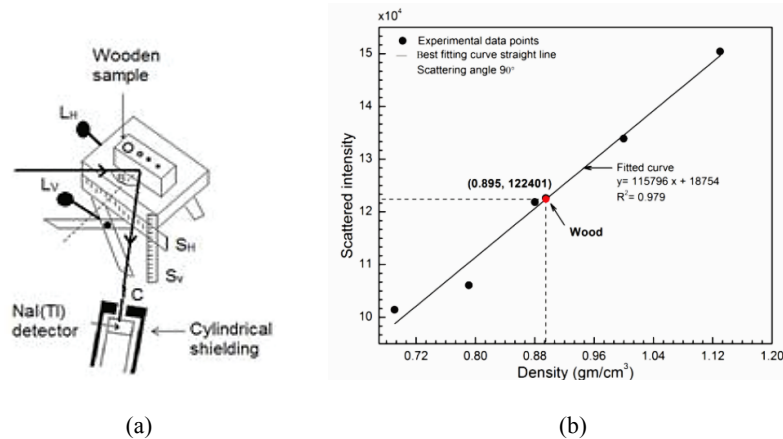
## APLIKASI TEKNIK HAMBURAN COMPTON

Penggunaan sinar gamma dalam investigasi material telah banyak dilakukan. Sinar gamma yang ditembakkan pada suatu bahan dan kemudian berinteraksi dengan bahan tersebut memberikan informasi mengenai karakteristik bahan. Umumnya puncak intensitas sinar gamma yang melalui udara dan bahan akan sangat berbeda sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan rongga dan retakan dibagian dalam suatu bahan. Salah satu aplikasi pengukuran yang populer dan banyak dilakukan adalah pendeteksian rongga dan retakan di dalam material padat seperti beton. Penelitian mengenai aplikasi sinar gamma untuk mendeteksi rongga pada beton telah dilakukan menggunakan berbagai sumber gamma, jenis detektor, serta program simulasi yang digunakan seperti penggunaan *software* PENELOPE-2008 untuk mensimulasikan pendeteksian sinar gamma pada baja dan ruang berlapis beton menggunakan sumber Co-60 tanpa detektor [11]. Kemudian, penggunaan detektor HPGe untuk inspeksi beton menggunakan *software* MCNP dan sumber sinar gamma  $^{137}\text{Cs}$  [12], sumber dan detektor ini digunakan juga untuk mendeteksi baja yang ditanamkan di dalam beton [9], serta Inspeksi beton bertulang menggunakan teknik hamburan Compton juga dilakukan menggunakan detektor semikonduktor CdTe dan sumber gamma  $^{241}\text{Am}$  dengan aktivitas 100mCi [13]. Selanjutnya, penggunaan detektor NaI(Tl) diterapkan untuk investigasi densitas beton menggunakan sinar gamma  $^{137}\text{Cs}$  [14], sumber gamma dan detektor ini digunakan juga untuk deteksi kecacatan besi batangan [2].

Pengukuran material beton tergolong mudah karena sampel yang diukur dapat diakses dari dua sisi dimana objek dapat diletakkan di antara sumber dan detektor. Dengan menghitung intensitas sinar gamma sebelum dan setelah melalui objek maka informasi yang diinginkan dapat diperoleh. Namun pada kasus tertentu teknik ini tidak mungkin dilakukan seperti pada pengukuran lapisan aspal dimana detektor maupun sumber hanya dapat diletakkan pada bagian atas. Untuk mengatasi hal ini, digunakanlah teknik hamburan Compton. Beberapa penelitian menggunakan teknik hamburan Compton sinar gamma untuk inspeksi objek atau bahan padat telah banyak dilakukan.

Salah satu diantaranya ialah penentuan massa jenis dan kecacatan pada material kayu menggunakan teknik hamburan Compton sinar gamma dari sumber  $^{137}\text{Cs}$  yang dideteksi oleh detektor sintilasi NaI(Tl) [15]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan massa jenis kayu dan rongga yang terdapat di dalam kayu. Teknik hamburan sinar gamma dipilih karena meskipun teknik transmisi secara statistik memiliki akurasi yang baik dan efektif dari segi waktu, namun teknik transmisi tidak dapat diterapkan ketika akses terhadap dua sisi sampel tidak mungkin dilakukan. Sebaliknya, teknik hamburan menjadi alternatif yang tepat untuk *single-side access* dengan sensitivitas dan akurasi yang tidak kalah dari teknik transmisi. Pada penelitian ini foton sinar gamma  $^{137}\text{Cs}$  berenergi 662 keV dengan kekuatan 222-Gbq diradiasikan pada berbagai bahan kimia yang telah diketahui densitasnya. Bahan kimia yang diukur ialah heptana, etil alkohol, amonium hidroksida, asam oleat, air, dan gliserol. Pengukuran dilakukan selama 2 ks. Sumber sinar gamma yang diradiasikan dan detektor ditempatkan terpisah pada sudut  $90^\circ$  satu sama lain. Intensitas hamburan yang diukur untuk masing-masing bahan di *fitting* terhadap densitas bahan yang diketahui sebelumnya sehingga diperoleh persamaan

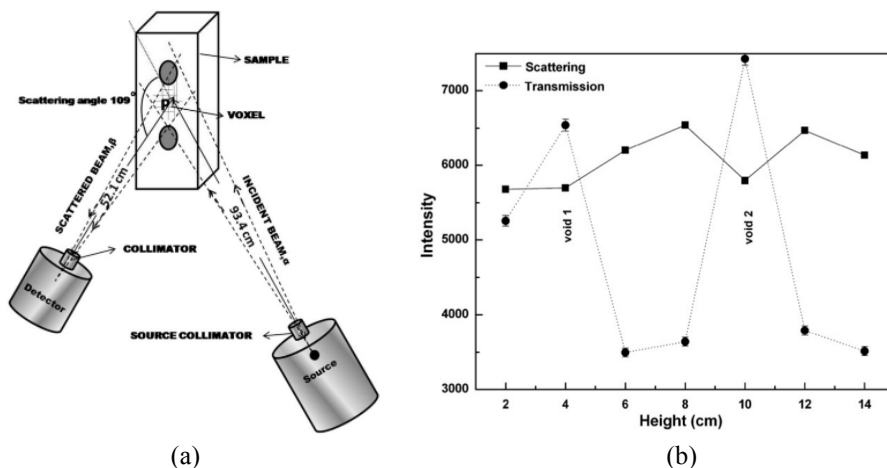
hubungan intensitas dan densitas bahan. Dengan menggunakan persamaan yang diperoleh, maka dengan set pengukuran yang sama, densitas kayu dapat ditentukan. Set eksperimen dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Set eksperimen (a) hasil *fitting* kurva dan persamaan regresi yang diperoleh (b) [15]

Penelitian menggunakan metode hamburan Compton lainnya telah banyak dilakukan menggunakan berbagai variasi sumber sinar gamma dan detektor yang berbeda satu sama lainnya. Pada umumnya penggunaan teknik hamburan Compton dipilih sebagai alternatif keterbatasan metode transmisi pada pengukuran dimana akses dari dua sisi tidak mungkin dilakukan. Aplikasi penggunaan teknik hamburan Compton pada inspeksi keberadaan rongga di dalam zat padat dilakukan oleh Shivaramu [16] menggunakan sumber sinar gamma <sup>137</sup>Cs dan detektor HPGe yang memiliki resolusi yang tinggi untuk menginspeksi struktur beton, mendeteksi kecacatan dan membedakan antara densitas dan komposisi material yang berbeda di dalam beton akibat keberadaan rongga dan baja ringan di dalam beton.

Penggunaan detektor HPGe dan sumber sinar gamma <sup>137</sup>Cs dilakukan juga oleh Priyada [11] untuk inspeksi beton jenis Portland menggunakan program simulasi MCNP, hasil simulasi dibandingkan dengan eksperimen. Pada pengukuran ini beton diberikan rongga dengan diameter yang berbeda satu sama lain kemudian diukur intensitas hamburan yang terjadi. Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan penggunaan sumber sinar gamma <sup>137</sup>Cs dapat mendeteksi rongga pada kedalaman 7 cm dari arah sumber dan 5 cm dari arah hamburan. Kedalaman yang lebih dalam dapat dicapai dengan menggunakan sumber sinar gamma dengan energi yang lebih tinggi dan melakukan optimalisasi sudut hamburan untuk menghindari atenuasi. Set pengukuran yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Set eksperimen (a) dan hasil pengukuran transmisi dan hamburan (b) [11]

Penggunaan detektor HPGe dan sumber sinar gamma <sup>137</sup>Cs pada aplikasi teknik hamburan Compton digunakan juga untuk mendeteksi batang baja di dalam beton berukuran 150 mm x 100 mm x 100 mm oleh Margret et al [10]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Margret dideteksi baja dengan diameter 12 mm, 20 mm dan 30 mm. Hasil penelitian menunjukkan keberadaan baja dapat diinspeksi sampai pada kedalaman 60 mm saja. Inspeksi beton dilakukan juga oleh Boldo dan Appoloni [13] menggunakan teknik hamburan Compton untuk inspeksi ketahanan beton dari satu sisi menggunakan <sup>241</sup>Am berkekuatan 100 mCi dengan

detektor semikonduktor resolusi tinggi CdTe. Tiga buah beton berukuran 15 cm x 7.5 cm x 10 cm diisi oleh rongga, baja dan batu pada posisi yang tidak diketahui. Sampel diradiasikan sinar gamma. Hasil pengukuran menunjukkan inklusi dan rongga dapat ditunjukkan sampai kedalaman 20 mm di bawah permukaan sampel. Pada pendeteksian batu gravel yang ditanamkan di dalam beton, pengukuran tidak efektif karena atenuasi batu gravel yang tinggi sehingga tidak banyak hamburan yang dideteksi.

Aplikasi NDT menggunakan sumber sinar gamma dari  $^{137}\text{Cs}$  sangat banyak ditemukan. Pada umumnya memiliki kemampuan penetrasi sampai pada kedalaman tertentu. Untuk mengoptimalkan kedalaman yang dapat dideteksi, sinar gamma dari unsur radioaktif  $^{60}\text{Co}$  dapat menjadi alternatif lain.  $^{60}\text{Co}$  memiliki energi puncak fotolistrik pada level energi 1.17 MeV dan 1.33 MeV, lebih dari dua kali lipat energi fotolistrik yang dimiliki oleh  $^{137}\text{Cs}$ . Penggunaan sinar gamma  $^{60}\text{Co}$  dalam aplikasi NDT disimulasi oleh A. Tarim et al [17] menggunakan metode Monte Carlo untuk mensimulasi fungsi respon detektor NaI(Tl) dari sinar gamma  $^{60}\text{Co}$  yang diemisikan pada sampel beton. Pada penelitian ini direpresentasikan model detektor dan dianalisa distribusi energi foton yang dicapai sistem detektor. Dari hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan intensitas puncak hamburan tunggal, hamburan ganda, dan hamburan berulang menurun terhadap peningkatan ketebalan medium target.

## KESIMPULAN

Pengukuran atau pengujian terhadap suatu bahan menggunakan teknik hamburan Compton memiliki berbagai keuntungan yaitu bahan yang diukur dapat diakses dari sisi yang sama sehingga hal ini dapat menjadi alternatif proses pengukuran dengan kondisi dimana akses dari kedua sisi tidak dapat dilakukan. Penggunaan sinar gamma efektif dalam pengukuran bahan yang tebal karena mampu melakukan penetrasi yang dalam terhadap objek yang diteliti. Penelitian lanjutan dapat dilakukan pada berbagai aplikasi. Salah satu diantaranya adalah penerapan teknik hamburan Compton pada pengukuran ketahanan jalan raya aspal menggunakan sumber sinar gamma.

## REFERENSI

1. A. D. Sabharwal, B. Singh, dan B.S. Sandhu, *Investigation of Multiple Backscattering and Albedos of 1,12 MeV Gamma Photons in Elements and Alloys*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **267** (2009)
2. A. Sharma, B.S. Sandhu, dan B. Singh, *Incoherent Scattering of Gamma Photons for Non-Destructive Tomographic Inspection of Pipeline*, Journal of Applied Radiation and Isotopes **68** (2010)
3. S.J. Stankovic, R.D. Ilic, K. Jankovic, D. Bojovic, dan B. Loncar, *Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Components of Different Type Materials*, Acta Physica Polonica A **117** (2010)
4. R. Wirawan, M. Djamal, A. Waris, G. Handayani, dan H. J. Kim, *Investigation of Incoherent Gamma-ray Scattering Potential for the Fluid Density Measurement*, Applied Mechanics and Materials **575** (2014)
5. Peng-Chi Peng dan Chung-Yue Wang, *Use of Gamma Rays in The Inspection of Steel Wire Ropes in Suspension Bridges*, NDT&E International **75** (2015)
6. N. Chankow, dan S. Pojchanachai. *A unit for inspection of materials using differential gamma-ray scattering technique*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **213** (2004)
7. E. M. A. Hussein, *Computed Radiation Imaging Physics and Mathematics of Forward and Invers Problems*, Elsevier, London (2011)
8. M.B. Sari, *Sistem Deteksi Ketidakseragaman Densitas di dalam Beton berbasis Hamburan Sinar Gamma Co-60 menggunakan Program Simulasi GEANT4*, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung (2017)
9. N. Zettili, *Quantum Mechanics : Concepts and Applications*. John Wiley and Sons: USA (2009)
10. M. Margret, M. Menaka, B. Venkatraman, dan S. Chandrasekaran. *Compton back scatter imaging for mild steel rebar detection and depth characterization embedded in concrete*, Jurnal Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **343** (2015)
11. R. Merk, H. Kroger, L. Edelhauser, dan B. Hoffman, *PENELOPE-2008 Monte Carlo simulation of gamma exposure induced by  $^{60}\text{Co}$  and NORM-radionuclides in closed geometries*, Jurnal Applied Radiation and Isotopes **83** (2013)

12. P. Priyada, R. Ramar, Shivaramu, *Application of Gamma Ray Scattering Technique for Non-Destructive Evaluation of Voids in Concrete*, Applied Radiation and Isotopes **74** (2013)
13. E.M. Boldo dan C.R Appoloni, *Inspection of reinforced concrete samples by Compton backscattering technique*, Jurnal radiation physics and Chemistry **95** (2015)
14. R. Wirawan, M. Djamal, A.Waris, G. Handayani, dan H.J. Kim, *Response Function of Collimated Detector for Non Axial Detector-Source Geometry*, Advanced Materials Research **772** (2003)
15. A. Tondon, S. Mohinder, B. S. Sandhu, and B. Singh, *A Compton scattering technique to determine wood density and locating defects in it*, AIP Conference Proceedings **1675** (2015)
16. Shivaramu, *A Gamma Scattering Technique for Inspecting Concrete Structures*, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad (2006)
17. A. Tarim, E.N. Ozmutlu, O. Gurler, S. Yalcin, O. Gundogdu, J.M. Sharaf, dan D.A. Bradley, *Monte Carlo modelling of single and multiple Compton scattering profiles in a concrete material*. Radiation Physics and Chemistry **85** (2013)