

Pengaruh Jumlah dan Energi Foton terhadap Kualitas Citra pada CUDA EGS

Sitti Yani^{1,a)}, Freddy Haryanto^{1,b)} dan Idam Arif^{1,c)}

¹Laboratorium Fisika Medis dan Biofisika,
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} sitti.yani@s.itb.ac.id (corresponding author)

^{b)} freddy@fi.itb.ac.id

^{c)} idam@fi.itb.ac.id

Abstrak

Simulasi Monte Carlo (MC) digunakan secara luas untuk mensimulasikan efek radiasi pengion pada beberapa aplikasi fisika medis misalnya radioterapi dan pencitraan sinar-X. Salah satu source code yang memanfaatkan algoritma MC adalah CUDA EGS (Computed Unified Device Architecture Electron Gamma Shower). CUDA EGS ini dapat mensimulasikan mekanisme transport foton dalam EGSnrc untuk mensimulasikan X-ray hamburan Compton dan Rayleigh yang muncul dalam aplikasi pencitraan. Dalam simulasi ini digunakan phantom inhomogenitas yang berupa silinder air dengan diameter 12 cm dan tinggi 12.8 cm. Di dalam phantom terdapat dua silinder terkecil (diameter 3 cm, panjang 10 cm) yang terdiri atas jaringan tulang dan adipose, dua bulatan teflon dengan diameter 1 cm dan batangan aluminium persegi dengan ketebalan yang bervariasi dari 1 mm sampai 4 mm. Sumber sinar-X yang digunakan merupakan sumber titik yang diletakkan 30 cm dari pusat phantom sepanjang sumbu utamanya. Image plane tegak lurus terhadap sumbu pusat phantom dan berada 30 cm di belakang pusat phantom. Image plane (detektor) terdiri dari pixel persegi sebanyak 512×512 pixel dengan panjang sisi 1 mm. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan besar energi foton yaitu pada energi 80 keV, 180 keV, 380 keV, 800 keV dan 1 MeV dengan jumlah history sebanyak 10⁹ foton. Sedangkan jumlah history foton yaitu 10⁵, 10⁶, 10⁸, 10⁹ dan 10¹⁰ dengan energi foton sebesar 180 keV. Semua citra yang dihasilkan oleh CUDA EGS menunjukkan jumlah dan distribusi dari foton yang sampai pada detektor. Jumlah dan distribusi foton tersebut digambarkan dalam nilai grayscale tiap pixel pada detektor. Semakin tinggi nilai grayscale pada hasil simulasi untuk tiap citra menunjukkan semakin banyak foton yang mampu menembus material dan sampai pada detektor. Waktu simulasi yang dibutuhkan akan semakin lama jika energi foton yang digunakan semakin besar. Dalam simulasi MC untuk transport foton semakin besar history yang digunakan maka hasil yang diperoleh semakin akurat.

Kata-kata kunci: CUDA EGS, Monte Carlo, Kualitas Citra

PENDAHULUAN

Simulasi Monte Carlo digunakan secara luas untuk mensimulasikan efek radiasi pengion pada aplikasi fisika medis, misalnya treatment radioterapi dan pencitraan sinar-X [1, 2]. Simulasi Monte Carlo dapat menghasilkan hasil yang akurat, tetapi sering kali membutuhkan waktu komputasi yang sangat lama. Seperti telah diketahui sebelumnya, paket simulasi Monte Carlo dengan tujuan banyak hal adalah EGSnrc, dimana *software* ini dapat mensimulasikan transport elektron dan foton yang melewati suatu geometri tak tentu dengan kisaran energi 1 keV sampai 10 GeV [3].

Pendekatan terbaru yang digunakan untuk mempercepat simulasi adalah menggunakan *graphics processing units* (GPU) dibanding penggunaan *central processing units* (CPU). Selama beberapa tahun terakhir, GPU telah dikembangkan dari mikroprosesor yang dikhususkan untuk graphics rendering menjadi programmable, highly parallel, prosesor multi-core yang dapat digunakan untuk simulasi dalam banyak hal. GPU modern terdiri dari ratusan core yang dapat mengeksekusi ribuan program tunggal secara simultan dengan data input yang berbeda. NVIDIA mengembangkan Compute Unified Device Architecture (CUDA), yang merupakan program interface GPU dengan bahasa C tingkat tinggi. Dengan menggunakan CUDA, dapat ditulis program yang dapat dieksekusi pada GPU NVIDIA dan memberikan banyak manfaat untuk arsitektur paralel [4].

CUDA EGS merupakan implementasi CUDA untuk mensimulasikan mekanisme transport foton untuk Monte Carlo kode EGSnrc. EGSnrc merupakan paket simulasi Monte Carlo yang didesain untuk mensimulasikan transport pasangan elektron-foton yang melalui suatu geometri tak tentu dan CUDA merupakan framework pemrograman yang dikembangkan oleh NVIDIA untuk menulis program yang dapat mengeksekusi kode paralel pada Graphics Processing Units (GPU). Tujuan utama CUDA EGS adalah untuk menyediakan implementasi untuk mensimulasikan mekanisme transport foton dalam EGSnrc untuk mensimulasikan x-ray hamburan Compton dan Rayleigh yang muncul dalam aplikasi pencitraan. CUDA EGS ditemukan 20 sampai 40 kali lebih cepat dibanding EGSnrc yang keakuratannya sama dengan yang diperoleh dengan menggunakan EGSnrc.

Selain EGSnrc ini menerapkan mekanisme transportasi foton, CUDA EGS juga melacak jumlah history yang tersebar foton mengalami selama simulasi. Ketika foton meninggalkan geometri simulasi, foton ini dipropagasikan ke detektor virtual yang dispesifikasikan untuk pengguna, yang merekam jumlah foton total dan energi total yang didepositkan dalam setiap pixel. Hasil yang diperoleh berupa file binary serta gambar yang mengandung hasil ini [5].

METODOLOGI

CUDA EGS

CUDA EGS merupakan implementasi CUDA (Computed Unified Device Architecture) untuk mensimulasikan mekanisme transport foton untuk Monte Carlo kode EGSnrc. EGSnrc merupakan paket simulasi Monte Carlo yang didesain untuk mensimulasikan transport pasangan elektron-foton yang melalui suatu geometri tak tentu dan CUDA merupakan framework pemrograman yang dikembangkan oleh NVIDIA untuk menulis program yang dapat mengeksekusi kode paralel pada Graphics Processing Units (GPU). Tujuan utama CUDA EGS adalah untuk menyediakan implementasi untuk mensimulasikan mekanisme transport foton dalam EGSnrc untuk mensimulasikan X-ray hamburan Compton dan Rayleigh yang muncul dalam aplikasi pencitraan. CUDA EGS ditemukan 20 sampai 40 kali lebih cepat dibanding EGSnrc yang keakuratannya sama dengan yang diperoleh dengan menggunakan EGSnrc (Electron Gamma Shower National Research Council Canada) [4, 6].

Software CUDA EGS merupakan source tidak mengimplementasi-kan semua aspek EGSnrc. Terutama, hanya mekanisme transport foton EGSnrc yang diimplementasikan dalam CUDA EGS, sedangkan elektron atau positron tidak disimulasikan. Selain itu, hanya hamburan Klein-Nishina Compton yang diimplementasikan sedangkan hamburan bound-Compton juga tidak dilakukan. Namun, penjaralan foton, hamburan Compton dan Rayleigh diimplementasikan secara tepat berdasarkan mekanisme EGSnrc. Di samping itu, model data dan semua teknik simulasi dalam EGSnrc telah dilakukan, sehingga CUDA EGS dapat terus dikembangkan di masa depan untuk menerapkan aspek-aspek lain dari EGSnrc. CUDA EGS memiliki keunggulan dan kelemahan seperti pada Tabel 1 berikut [5].

Tabel 1. Keunggulan dan Kelemahan CUCA EGS [5]

Keunggulan	Kelemahan
Semua parameter input ditentukan dalam satu file input	Elektron atau positron tidak disimulasikan
Pilihan Command line membuatnya mudah untuk menjalankan beberapa simulasi secara paralel pada GPU yang berbeda dengan bilangan acak yang berbeda dengan menggunakan file input yang sama	Hamburan Compton terikat tidak dilakukan, hanya hamburan Compton Klein-Nishina
<i>Phantom</i> didefinisikan oleh file *.egsphnt dan karakteristik media oleh file PEGS4	Relaksasi atom tidak dilakukan
Jumlah foton total dan energi total yang	Multithreading pada multiple GPU tidak

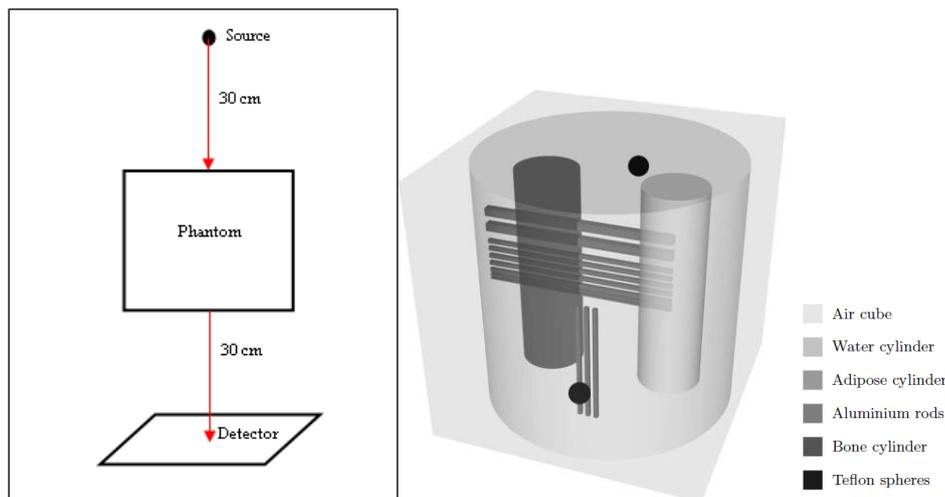
disimpan pada tiap pixel detektor dicatat	dilakukan, tetapi dapat dicapai secara manual
File output yang berbeda dibuat untuk foton primer, Compton scatter, Rayleigh scatter, multiple scatter dan foton total	Diperlukan NVIDIA GPU dengan kapabilitas CUDA 2.0 atau lebih
CUDA EGS didukung oleh sumber monoenergetik dan sumber dengan spektrum energi yang ditentukan	Hanya <i>Windows</i> yang mendukung <i>software</i> ini, tetapi mungkin dapat dilakukan pada platform yang lainnya.

CUDA EGS merekam jumlah dan total energi foton yang mencapai detektor. File output dipisahkan berdasarkan kategori primary, Compton, Rayleigh, multiple scatter dan total interaksi yang masing-masing dilabelkan dengan p, c, m, r dan t [5].

- Primary: foton yang tidak mengalami hamburan sama sekali
- Compton: foton yang mengalami hamburan Compton sekali
- Rayleigh: foton yang mengalami hamburan Rayleigh sekali
- Multiple: foton yang mengalami hamburan lebih dari sekali
- Total: semua foton yang mencapai detektor

Setup Simulasi

Setup simulasi dan bentuk phantom inhomogenitas yang digunakan pada penelitian ini seperti terlihat pada Gambar 1. Phantom inhomogenitas yang belum divoxelisasi yang berupa silinder air dengan diameter 12 cm dan height embedded in an air cube dengan panjang sisi 12.8 cm seperti pada gambar 1b. Dua silinder terkecil (diameter 3 cm, panjang 10 cm) terdiri atas jaringan tulang dan adipose, yang sama dengan dua bulatan teflon dengan diameter 1 cm dan batangan aluminium persegi dengan ketebalan yang bervariasi dari 1 mm sampai 4 mm, yang diletakkan di dalam silinder air. Sumber sinar-X merupakan sumber titik yang diletakkan 30 cm dari pusat phantom sepanjang sumbu utamanya. Sumber titik dikolimasi ke permukaan phantom. Image plane tegak lurus terhadap sumbu pusat phantom dan berada 30 cm di belakang pusat phantom. Image plane (detektor) terdiri dari pixel persegi sebanyak 512x512 piksel dengan panjang sisi 1 mm.



Gambar 1. Setup simulasi dan phantom inhomogen

Selama simulasi, jumlah foton yang mengalami hamburan Compton dan Rayleigh dan ketika foton merambat ke image plane, ditunjukkan dalam empat kategori: primary (tidak mengalami hamburan), Compton (mengalami hamburan Compton sekali), Rayleigh (mengalami hamburan Rayleigh sekali) dan multiple scatter (mengalami hamburan lebih dari sekali). Setiap simulasi menghasilkan lima image dengan total energi fluence yang berbeda dalam setiap pixel pada image plane yang dinormalisasi terhadap jumlah histori yang ditunjukkan. Empat citra yang dihasilkan berhubungan dengan empat kategori foton yang berbeda dan image yang terakhir merupakan jumlah dari semua kategori, yang ditunjukkan dengan total foton.

CUDA dicompile menggunakan Microsoft Visual Studio 2010 under Microsoft Windows 8 menggunakan CUDA Toolkit 4.0 dan dijalankan pada GPU GeForce GTX 650 video card. GPU memiliki 32 multiprosesor

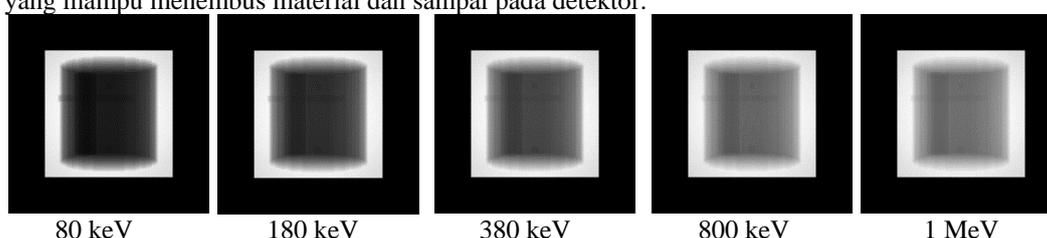
dengan total 448 core CUDA dan 1280 MB global memory. Clock rates core, shader dan memory (efektif) masing-masing 625, 1250 dan 3402 MHz. Simulasi kernel dilakukan dengan dua blok per multiprosesor, 64 register per thread, 512 thread per block dan 32.768 iterasi outer loop per kernel. Karena digunakan jumlah register yang sangat besar, hanya satu blok yang dapat diaktifkan dalam multiprocessor pada waktu yang diberikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi Energi Foton

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan besar energi foton yaitu pada energi 80 keV, 180 keV, 380 keV, 800 keV dan 1 MeV dengan jumlah history sebanyak 10^9 foton. Phantom yang digunakan adalah phantom inhomogenitas.

Semua citra yang dihasilkan oleh CUDA EGS menunjukkan jumlah dan distribusi dari foton yang sampai pada detektor. Jumlah dan distribusi foton tersebut digambarkan dalam nilai grayscale tiap pixel pada detektor. Semakin tinggi nilai grayscale pada hasil simulasi untuk tiap citra menunjukkan semakin banyak foton yang mampu menembus material dan sampai pada detektor.

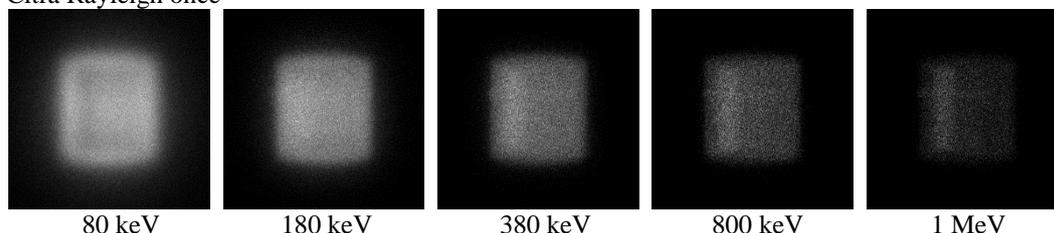


Gambar 2. Citra primary phantom inhomogenitas dengan jumlah history 10^9 foton dan energi 80 keV, 180 keV, 380 keV, 800 keV, dan 1 MeV

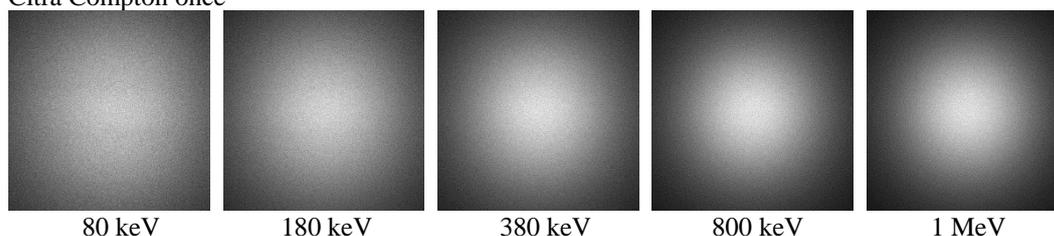
Pada gambar 2 di atas merupakan hasil simulasi berupa citra primary dengan menggunakan phantom inhomogenitas yang telah disediakan pada source code CUDA EGS. Citra primary merupakan representasi hasil simulasi dari foton yang tidak mengalami hamburan oleh material selama disimulasikan. Citra untuk energi 80 keV, silinder air dan material di dalamnya bernilai 0 (dalam grayscale). Hal ini menandakan seluruh foton diabsorpsi oleh material dalam silinder sehingga tidak ada foton yang dapat menembus phantom menuju detektor. Foton yang diabsorpsi disebabkan oleh interaksi fotolistrik yang dominan pada material air (material penyusun phantom sebagian besar merupakan air).

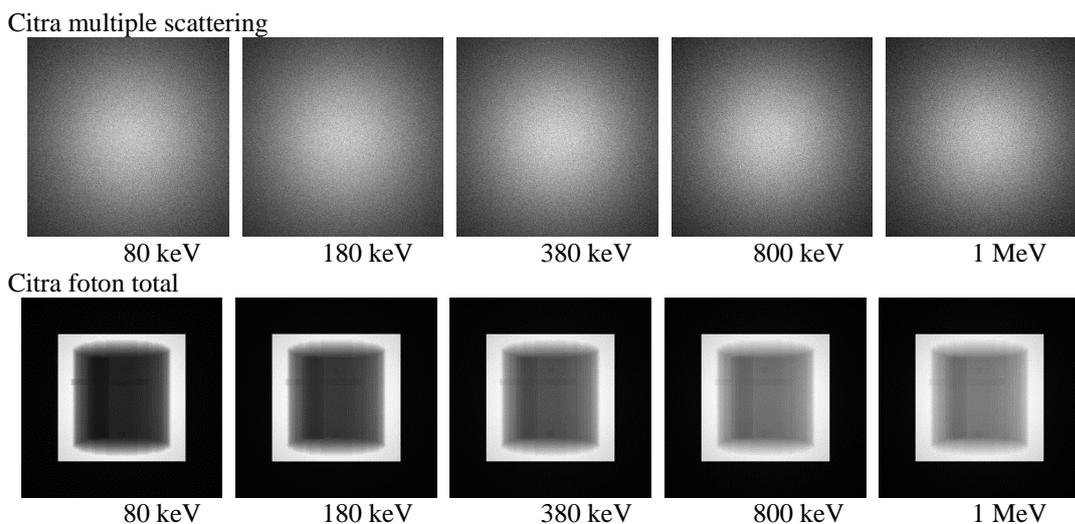
Dari citra dengan energi 380 keV, kita dapat mengetahui bahwa koefisien attenuasi air lebih tinggi dibandingkan dengan udara karena material air terlihat lebih berwarna gelap dibandingkan material udara. Pada material dengan koefisien attenuasi yang lebih tinggi, intensitas foton yang sampai pada detektor lebih sedikit karena teratenuasi oleh material tersebut. Ini menyebabkan nilai grayscale pada detektor virtual menjadi lebih rendah (lebih berwarna hitam). Dengan alasan ini juga kita dapat mengetahui bahwa material aluminium memiliki koefisien attenuasi yang lebih tinggi dari air karena nilai grayscale pada material aluminium lebih rendah dibandingkan dengan material air.

Citra Rayleigh once



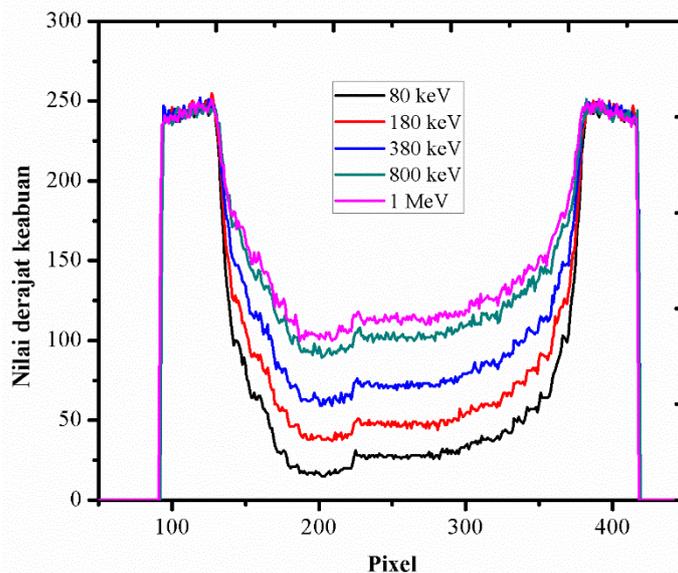
Citra Compton once





Gambar 3 Citra Rayleigh once, Compton once, multiple scattering dan foton total untuk phantom inhomogenitas dengan jumlah history 10^9 foton dan energi 80 keV, 180 keV, 380 keV, 800 keV dan 1 MeV

Secara tampak mata, sudah dapat terlihat dari citra hasil simulasi pada Gambar 3 di atas bahwa semakin tinggi energi maka kontras dari citra primary hasil simulasi yang semakin rendah. Nilai kontras menandakan besar perbedaan antara satu piksel dengan piksel-piksel yang berdekatan dengannya. Penurunan kontras ditunjukkan oleh nilai standar deviasi dari histogram citra yang menurun seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik perbandingan nilai derajat keabuan untuk citra primary untuk $y=256$ dan $x=0$ sampai $x=512$

Dengan memasukkan semua interaksi yang terjadi, kualitas citra total menjadi terdegradasi. Parameter yang menandakan ini yaitu kontras. Pada citra total, kontras menurun dibandingkan pada citra primary. Penurunan kontras lebih menyulitkan kita dalam membedakan material satu dengan yang lainnya. Adapun penurunan kontras yang terjadi dihitung berdasarkan penurunan standar deviasi dari histogram kedua citra (citra primary dan citra total). Nilai standar deviasi dari histogram citra primary lebih tinggi dibandingkan dengan histogram citra total. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa efek scattering membuat kualitas citra simulasi terdegradasi karena menurunnya kontras dari citra. Semakin besar energi yang diberikan maka semakin banyak jumlah interaksi yang terjadi. Namun dalam semua kasus ini, interaksi *pair production* (produksi pasangan) tidak terjadi karena energi yang digunakan tidak memenuhi untuk terjadinya interaksi tersebut.

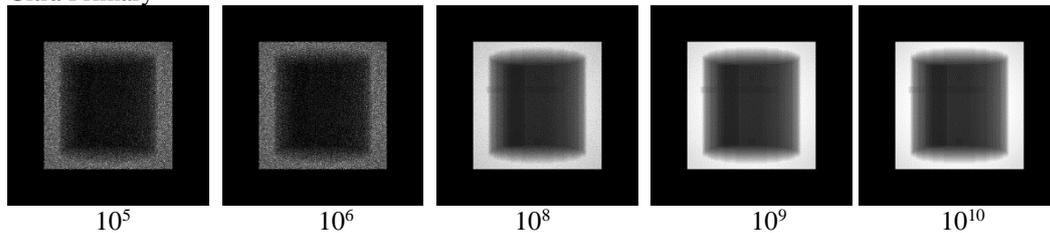
Selain itu, jumlah interaksi yang terjadi selama dilakukan simulasi untuk beberapa energi foton yang berbeda. Dilihat dari jumlah interaksi yang terjadi, pada energy 80 keV, interaksi dominan yang terjadi adalah efek fotolistrik. Hal ini disebabkan karena material phantom tersebut didominasi oleh air dan setiap molekul air memiliki jumlah elektron 10.

Pada energi foton yang lebih tinggi dari 80 keV terlihat bahwa jumlah semua interaksi (efek fotolistrik, Compton, dan Rayleigh) yang terjadi semakin menurun. Interaksi yang menurun ini menunjukkan bahwa semakin tinggi energi maka semakin rendah probabilitas foton untuk berinteraksi dengan material. Artinya semakin banyak foton yang tidak berinteraksi dan mengalami hamburan, namun langsung menuju ke detektor. Meskipun secara keseluruhan interaksi menurun, interaksi Compton tetap merupakan yang paling dominan.

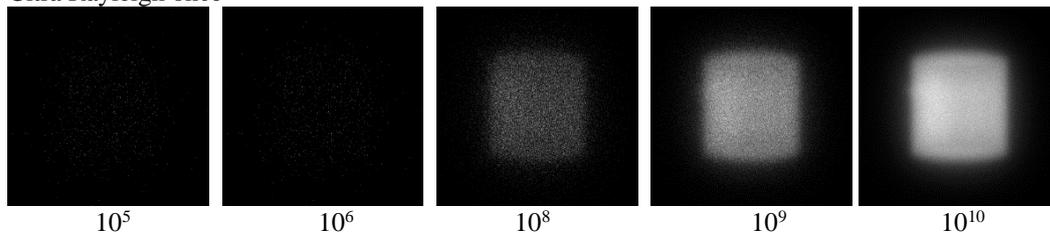
Variasi Jumlah Foton

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan jumlah history foton yaitu 10^5 , 10^6 , 10^8 , 10^9 dan 10^{10} dengan energi foton 180 keV. Phantom yang digunakan adalah phantom inhomogenitas.

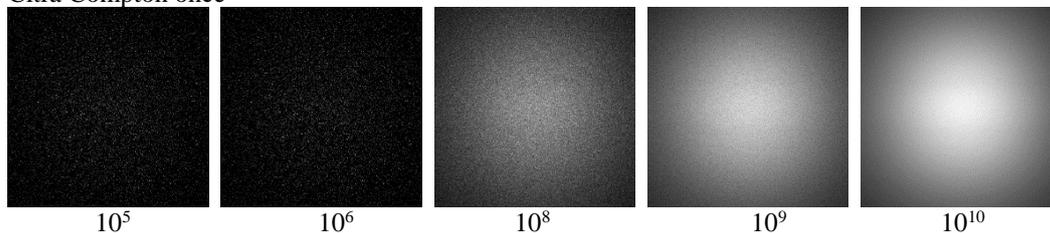
Citra Primary



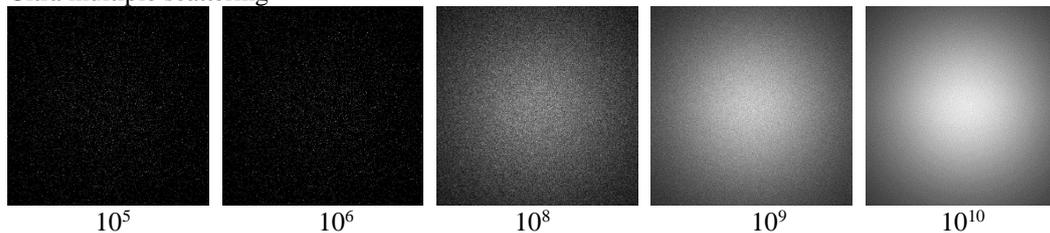
Citra Rayleigh once



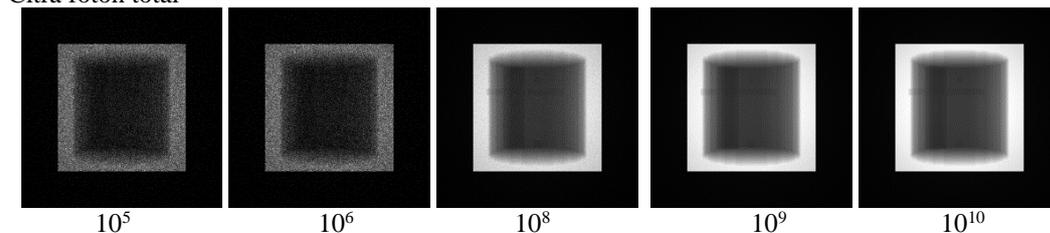
Citra Compton once



Citra multiple scattering



Citra foton total



Gambar 5 Citra primary, Compton once, multiple scattering dan total foton untuk energi 180 keV dan jumlah history 10^5 , 10^6 , 10^8 , 10^9 dan 10^{10} foton

Dalam simulasi Monte Carlo untuk transport foton semakin banyak foton yang digunakan maka hasil yang diperoleh semakin akurat. Pada bagian ini, variasi jumlah history dilakukan untuk menunjukkan bagaimana pengaruh jumlah foton yang disimulasikan terhadap kualitas citra yang dihasilkan dan waktu simulasi yang dibutuhkan.

Pada bagian citra primary seperti pada gambar 8, mean dan standar deviasi meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah foton yang disimulasikan seperti yang ditunjukkan pada tabel 2. Nilai mean yang meningkat menunjukkan brightness yang semakin tinggi. Sedangkan peningkatan nilai standar deviasi diakibatkan karena detail citra semakin tinggi. Standar deviasi menunjukkan seberapa besar variasi suatu data terhadap nilai mean. Dalam hubungannya dengan citra tersebut, variasi nilai intensitas piksel yang semakin tinggi memperbesar kemungkinan tidak terjadinya perubahan intensitas yang tinggi antara suatu piksel dengan piksel tetangganya.

Tabel 2. Mean dan Standar Deviasi Citra Variasi Jumlah Foton

	10 ⁵		10 ⁸		10 ⁹		10 ¹⁰	
	Mean	Stdv	Mean	Stdv	Mean	Stdv	Mean	Stdv
Primary	23.388	39.031	50.389	77.09	55.147	84.272	56.102	85.719
Rayleigh	0.924	9.016	17.651	28.945	39.62	53.171	53.57	69.932
Compton	11.047	26.426	81.125	33.621	119.352	40.801	138.126	46.104
Multiple	6.979	20.926	75.27	32.877	115.8	37.264	136.687	40.08
Total	26.292	39.515	55.247	75.857	59.946	82.174	61.087	83.714

Seperti pada citra primary, mean dari histogram untuk citra total juga meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah history. Hal ini menandakan brightness yang meningkat. Sedangkan standar deviasi dari citra tersebut yang meningkat ketika jumlah history meningkat. Pada citra dengan jumlah history yang lebih banyak, perbedaan intensitas foton pada suatu piksel dengan piksel tetangganya semakin kecil. Pada grafik dengan jumlah history 10⁶, terlihat adanya fluktuasi intensitas yang besar pada sebuah piksel dengan piksel tetangganya. Sedangkan, dengan jumlah history lebih banyak, fluktuasi ini cenderung menurun. Dan pada grafik dengan jumlah history yang paling banyak, grafik plotnya paling halus. Ini menunjukkan bahwa citra yang dihasilkan semakin baik.

Tabel 3. Waktu simulasi CUDA EGS untuk variasi jumlah foton

Jumlah history (foton)	Waktu simulasi (s)
10 ⁵	1,631
10 ⁶	1,558
10 ⁸	70,958
10 ⁹	706,206
10 ¹⁰	7060,440

Seperti terlihat pada tabel 3 di atas bahwa secara umum semakin tinggi jumlah history yang digunakan maka waktu simulasi yang dibutuhkanpun semakin lama. Hal ini disebabkan oleh jumlah interaksi yang meningkat ketika jumlah history ditingkatkan.

Namun dengan mempertimbangkan kualitas citra yang dihasilkan dan waktu simulasi yang dibutuhkan maka simulasi CUDA EGS dibutuhkan jumlah foton minimal 10⁹ partikel.

KESIMPULAN

Kualitas citra pada CUDA EGS sangat dipengaruhi oleh energi dan jumlah foton. Pemilihan energi foton yang diberikan harus mempertimbangkan densitas dan ketebalan medium yang akan dicitrakan. Dan semakin besar jumlah foton maka kualitas citra akan semakin baik dimana nilai mean citra semakin besar jika jumlah history ditingkatkan. Namun waktu simulasi juga harus dipertimbangkan. Waktu simulasi untuk jumlah foton 10⁵, 10⁶ dan 10⁹ masing-masing sebesar 70,958, 706,206 dan 7060,440 sekon. Waktu simulasi ini meningkat secara linear ketika jumlah foton semakin besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Hibah Disertasi Dikti 2016.

REFERENSI

1. P. Andreo, *Review Monte Carlo Techniques in Medical Radiation Physics*. Phys. Med. Biol., 36(7), 861-920 (1991)
2. D.W.O. Rogers, Review Fifty Years of Monte Carlo simulations for Medical Physics, Phys. Med. Biol., 51, R287–R301 (2006)
3. I. Kawrakow, E. Mainegra-Hing, D.W.O. Rogers, F. Tessier, B.R.B. Walters, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. NRCC Report PIRS-701 (2011)
4. J. Lippuner, I. A. Elbakri, C. Cui, H. R. Ingleby, *Epp: A C++ EGSnrc User Code For X-Ray Imaging and Scattering Simulations*, Med. Phys., 38(3), 1705-08 (2011)
5. J. Lippuner dan I. A. Elbakri, *CUDA EGS Manual Version 1.0.0*, CancerCare Manitoba, Canada (2012)
6. J. Lippuner dan I. A. Elbakri, *A GPU Implementation of EGSnrc's Monte Carlo Photon Transport for Imaging Applications*, Phys. Med. Biol., 56, 7145–62 (2012)