

Verifikasi distribusi dosis menggunakan detektor 2D-Array sebagai evaluasi hasil kalkulasi algoritma *Collapsed cone* (CC) dan *Monte carlo* (MC) pada TPS Monaco 5.11

A. Hariyadi^{1*}, M. Hidayatullah², dan W.S Budi¹

¹ *Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, 50275, Semarang, Indonesia*

² *Instansi Radioterapi, RS Ken Saras, Kab. Semarang, 50552, Indonesia*

E-mail: andihariyadiha@st.fisika.undip.ac.id

Naskah Masuk 11 Agustus 2018

Naskah Revisi 18 Agustus 2018

Naskah Terima 26 Oktober 2018

Naskah Terbit 16 November 2018

Abstrak: Radiasi pengion dalam penggunaannya bermanfaat dalam perawatan penyakit khususnya kanker, namun paparan radiasi pengion yang tidak dibutuhkan maupun berlebihan dapat membahayakan dan harus dihindari. Untuk memperoleh hasil yang optimal, distribusi dosis harus masih dalam batas yang dianjurkan pada jaminan kualitas dalam radioterapi. Oleh sebab itu, sebelum dilakukan terapi pada pasien, dilakukan perencanaan terlebih dahulu guna mengalkulasi dan merencanakan besaran dosis dan cara pemberiannya ke pasien, sehingga dosis yang diberikan pada pasien tepat dan optimal, serta jaringan normal di sekitar tumor dapat terlindungi dari paparan radiasi yang tidak perlu. Penelitian kali ini akan dilakukan verifikasi dosis dengan membandingkan dosis yang direncanakan pada TPS dengan dosis sebenarnya yang terukur pada *slab phantom*. Kalkulasi dosis pada TPS menggunakan algoritma *monte carlo* dan *collapsed cone*. Hasil perbandingan kalkulasi dosis menggunakan *monte carlo* terhadap hasil dosis pada pengukuran sebenarnya didapat perbedaan hingga 5.1% sedangkan untuk algoritma *collapsed cone* didapat perbedaan hingga 9.5%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa algoritma *monte carlo* lebih akurat dalam mengalkulasi distribusi dosis untuk variasi luas lapangan standar dan nilai MU dibanding algoritma *collapsed cone*.

Abstrak: *Ionizing radiation in its use is beneficial in the treatment of diseases especially cancer, however exposure to ionizing radiation which are not needed or redundant can be dangerous and should be avoided. To obtain optimal results, the distribution of doses must be still within the limits that are recommended on quality assurance in radiotherapy. Therefore, prior to therapy on patients, advance planning is done in order to calculate and plan the quantity dose and how his deed to the patient, so that the dose given to the patient is optimal and normal tissue around the tumour can be protected from unnecessary radiation exposure. Research this time will verify the dose by comparing the planned dose at TPS with actual measured doses on slab phantom. Calculation of dose on the TPS uses monte carlo and collapsed cone algorithm. The results of the comparison of dose calculation using monte carlo dose results against actual measurements were obtained on the difference up to 5.1% as for the collapsed cone algorithm obtained difference up to 9.5%. So, it can be inferred that the monte carlo algorithm more accurate in calculating dose distributions for variation of standard field size and MU values than collapsed cone algorithms.*

Kata kunci: Radioterapi, QA Plan, 2D- Array, Monte carlo, Collapsed cone

Keywords: Radiotherapy, QA Plan, 2D- Array, Monte carlo, Collapsed cone

1. Pendahuluan

Radioterapi merupakan pengobatan penyakit neoplastik dengan menggunakan radiasi pengion. Radiasi tersebut dapat berupa gelombang elektromagnetik maupun partikel materi. Radiasi elektromagnetik contohnya sinar-x dan sinar gamma, sedangkan radiasi partikel berupa elektron, proton, neutron, partikel alpha, meson, ion berat, dll. Radiasi pengion dalam penggunaannya bermanfaat dalam perawatan penyakit khususnya kanker. Namun paparan radiasi

pengion yang tidak dibutuhkan maupun berlebihan dapat membahayakan dan harus dihindari. Banyaknya energi yang diserap oleh jaringan disebut dengan dosis radiasi. Efek radiasi pengion pada jaringan diakibatkan oleh energi dari radiasi pengion diserap oleh atom dan molekul tubuh sehingga menyebabkan proses pada ionisasi jaringan.¹

Untuk memperoleh hasil terapi yang optimal, distribusi dosis harus masih dalam batas yang dianjurkan pada jaminan kualitas dalam radioterapi. Hal ini diperlukan agar jaringan normal di sekitar tumor dapat terlindungi dari paparan radiasi yang tidak perlu. Dosis yang berlebih maupun dosis yang kurang merupakan kecelakaan radiasi. Menurut dokumen IAEA TRS- 398, disebutkan bahwa akurasi dosis yang diberikan pada pasien memenuhi standar deviasi $\pm 5\%$, namun untuk jenis tumor tertentu standar ketidakpastian pada pemberian dosis sebesar 3.3–3.5%. Tujuan radioterapi adalah untuk mengirimkan sejumlah besar radiasi ke tumor untuk menghancurkan sel tumor tanpa memberikan efek radiasi pada jaringan normal disekitarnya.

Oleh sebab itu sebelum dilakukan terapi pada pasien, biasanya dilakukan perencanaan terlebih dahulu guna mengalkulasi dan merencanakan besaran dosis dan cara pemberiannya ke pasien sehingga dosis yang diberikan pada pasien tepat dan optimal.³ Pada penelitian kali ini akan dilakukan verifikasi dosis dengan membandingkan dosis yang sudah direncanakan pada TPS dengan dosis sebenarnya yang terukur pada target.

2. Bahan dan metode

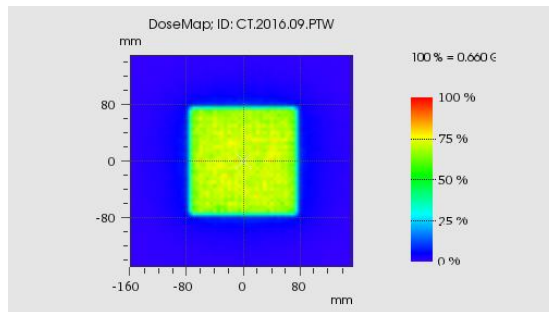
Pada penelitian ini dilakukan perbandingan hasil kalkulasi distribusi dosis algoritma *collapsed cone* dan *monte carlo* terhadap hasil pengukuran pada target *slab phantom*. Kalkulasi dosis menggunakan algoritma dilakukan pada komputer TPS (Treatment Planning System) Monaco 5.11. TPS ini memiliki 3 algoritma yang dapat digunakan dalam proses kalkulasi dosis yaitu pencil beam, *collapsed cone*, dan *monte carlo*.

Pengukuran pada target *slab phantom* dengan dimensi 26 cm $\times$ 26 cm $\times$ 1 cm dilakukan menggunakan detektor 2D-array Octavius 729 dengan teknik *Source Axis Distance* (SAD). Detektor ini tersusun atas detektor kamar ionisasi kecil berbentuk kubus dengan ukuran 0.5 cm $\times$ 0.5 cm $\times$ 0.5 cm sebanyak 729 buah dengan sebaran luasan. Jarak antar detektor adalah 10 mm dari pusat ke pusat atau 5 mm dari tepi ke tepi masing-masing detektor. Detektor ini dapat digunakan untuk mengukur dosis serap untuk luas lapangan hingga 27 cm $\times$ 27 cm.⁴ Kalkulasi dosis menggunakan algoritma dan pengukuran pada *phantom* menggunakan detektor 2D-array Octavius 729 dilakukan dengan parameter yang sama yaitu luas lapangan 3 $\times$ 3 cm², 5 $\times$ 5 cm², 10 $\times$ 10 cm², 15 $\times$ 15 cm², dan 20 $\times$ 20 cm² serta nilai MU 50, 100, 150, dan 200.

Selanjutnya perbandingan dosis serap antara tiap algoritma dengan hasil pengukuran pada *slab phantom* dengan *software* Verisoft. Perbandingan distribusi dosis menggunakan *gamma evaluation*. *Gamma evaluation* merupakan metode yang digunakan untuk membandingkan dosis titik yang akan diuji terhadap dosis titik referensi dalam suatu daerah berupa *spatial resolution* (DTA) sehingga perbedaan dosis *dose difference* diantara titik tersebut (DD) dapat ditentukan. Pada penelitian kali ini kriteria yang digunakan DD/DTA sebesar 3%/3mm. Perbandingan dibagi menjadi dua tahap yaitu, tahap pertama membandingkan secara langsung kedua algoritma untuk mengetahui perbedaan hasil kalkulasi distribusi dosis kedua algoritma. Pada tahap kedua hasil kalkulasi distribusi dosis masing-masing algoritma dibandingkan dengan distribusi dosis hasil pengukuran. Perbandingan dilakukan terhadap dosis serap pada perhitungan algoritma dan dosis serap hasil pengukuran pada *slab phantom* untuk koordinat (titik) yang sama baik pada algoritma maupun pengukuran, sehingga didapat jumlah titik dosis yang masih dalam batas 3% eror terhadap hasil pengukuran *slab phantom*. *Evaluated dose point* menunjukkan banyaknya titik dosis yang dievaluasi sedangkan *Passed dose point* merupakan jumlah titik dosis yang masih dalam batas eror 3% terhadap hasil pengukuran *slab phantom*.

Tabel 1. Perbandingan distribusi dosis algoritma *collapsed cone* (CC) dan *monte carlo* (MC).

Field size (cm ²)	Evaluated dose point	Passed dose point	Rasio dosis (%)
3 $\times$ 3	69	69	100
5 $\times$ 5	161	161	100
10 $\times$ 10	571	567	99.3
15 $\times$ 15	1254	1239	98.8
20 $\times$ 20	2193	2168	98.9



Gambar 1. Distribusi dosis menggunakan algoritma *monte carlo* dengan luas lapangan standar $15 \times 15 \text{ cm}^2$.

Tabel 2. Hasil perbandingan kalkulasi dosis algoritma CC dan MC terhadap hasil pengukuran untuk output mesin 50 MU.

Field size (cm ²)	Evaluated dose point		Passed dose point		Rasio dosis (%)	
	CC	MC	CC	MC	CC	MC
3 × 3	21	21	20	21	95.2	100
5 × 5	46	46	43	46	93.5	100
10 × 10	157	157	151	155	96.2	98.7
15 × 15	340	340	316	331	92.9	97.4
20 × 20	584	584	570	547	97.6	93.7

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Perbandingan distribusi dosis algoritma collapsed cone dan monte carlo

Distribusi dosis hasil kalkulasi menggunakan algoritma *collapsed cone* dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* dapat dilihat pada Gambar 1. Lebih lanjut, distribusi dosis hasil perbandingan kedua algoritma dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil perbandingan distribusi dosis algoritma *collapsed cone* terhadap algoritma *monte carlo* pada Gambar 3 terdapat titik merah dan biru. Titik merah dan biru ini merupakan failed point, yaitu titik dosis pada algoritma *collapsed cone* yang melebihi batas kesalahan $\pm 3\%$ terhadap titik dosis dengan koordinat yang sama pada algoritma *monte carlo* (referensi). Dari Tabel 1 dapat dilihat keseluruhan perbandingan hasil kalkulasi distribusi dosis algoritma *collapsed cone* terhadap algoritma *monte carlo* untuk variasi luas lapangan standar. Tabel 1 juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan hasil kalkulasi dosis algoritma *collapsed cone* dengan algoritma *monte carlo* dengan kecenderungan perbedaan semakin besar untuk variasi luas lapangan.

3.2. Perbandingan distribusi dosis tiap algoritma terhadap pengukuran pada slab phantom

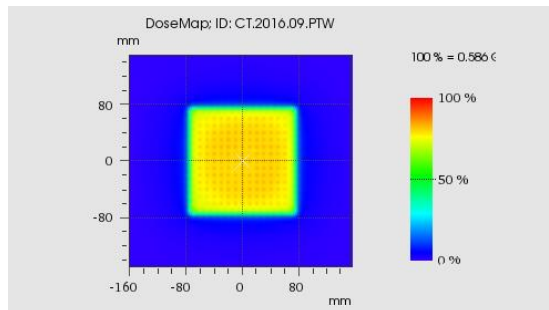
Pada Gambar 4 dapat dilihat distribusi dosis dari planning menggunakan algoritma *collapsed cone* dan Gambar 5. untuk distribusi dosis menggunakan algoritma *monte carlo*. Selanjutnya kedua distribusi dosis tersebut dibandingkan dengan distribusi dosis hasil pengukuran sebenarnya pada Gambar 6 dan Gambar 7, sehingga didapat hasil perbandingan distribusi dosis algoritma *collapsed cone* terhadap hasil pengukuran pada Gambar 8 dan algoritma *monte carlo* pada Gambar 9. Pada perbandingan hasil distribusi dosis kalkulasi algoritma terhadap hasil pengukuran pada *slab phantom* dapat diamati failed point yang menyatakan titik dosis pada kalkulasi algoritma melebihi batas $\pm 3\%$ terhadap hasil pengukuran pada *slab phantom*. Dari data penelitian juga dapat diperoleh banyaknya titik dosis

yang akan dievaluasi untuk lapangan tertentu serta banyaknya titik dosis yang lolos uji terhadap hasil pengukuran, sehingga didapat rasio dosis antara algoritma dengan hasil pengukuran.

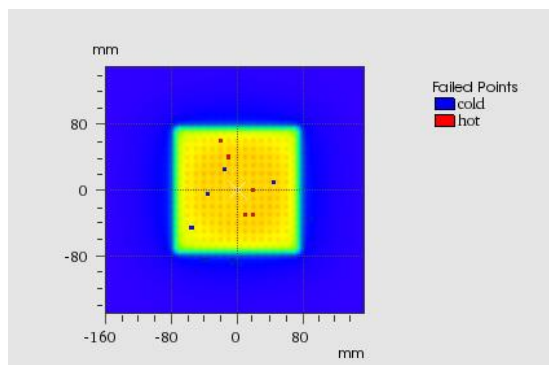
Berikut hasil perbandingan antara masing-masing algoritma dengan hasil pengukuran dengan variasi nilai output mesin dan luas lapangan penyinaran:

Tabel 3. Hasil perbandingan kalkulasi dosis algoritma CC dan MC terhadap hasil pengukuran untuk output mesin 100 MU.

<i>Field size (cm²)</i>	<i>Evaluated dose point</i>		<i>Passed dose point</i>		<i>Rasio dosis (%)</i>	
	<i>CC</i>	<i>MC</i>	<i>CC</i>	<i>MC</i>	<i>CC</i>	<i>MC</i>
3 × 3	21	21	19	21	90.5	100
5 × 5	46	46	43	45	93.5	97.8
10 × 10	160	160	153	157	95.6	98.1
15 × 15	340	340	314	329	92.4	96.8
20 × 20	589	589	575	552	97.6	93.7



Gambar 2. Distribusi dosis menggunakan algoritma *collapsed cone* dengan luas lapangan standar $15 \times 15 \text{ cm}^2$.



Gambar 3. Hasil perbandingan distribusi dosis algoritma *collapsed cone* terhadap *monte carlo* dengan luas lapangan standar $15 \times 15 \text{ cm}^2$.

Tabel 4. Hasil perbandingan kalkulasi dosis algoritma CC dan MC terhadap hasil pengukuran untuk output mesin 150 MU.

Field size (cm ²)	Evaluated dose point		Passed dose point		Rasio dosis (%)	
	CC	MC	CC	MC	CC	MC
3 × 3	21	21	19	21	90.5	100
5 × 5	46	46	43	45	93.5	97.8
10 × 10	159	159	152	153	95.6	96.2
15 × 15	340	340	313	330	92.1	97.1
20 × 20	589	589	573	549	97.3	93.2

Perbandingan antara hasil kalkulasi distribusi dosis menggunakan algoritma dan hasil pengukuran sebenarnya pada target dengan output mesin sebesar 50 MU dan variasi luas lapangan 3 × 3 cm², 5 × 5 cm², 10 × 10 cm², 15 × 15 cm², 20 × 20 cm² didapat data seperti pada Tabel 2. Pada Tabel 2 dapat diamati bahwa untuk output mesin sebesar 50 MU, kesesuaian distribusi dosis pada algoritma *collapsed cone* terhadap hasil pengukuran cenderung fluktuatif untuk variasi luas lapangan penyinaran, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* cenderung menurun terhadap peningkatan variasi luas lapangan penyinaran. Untuk luas lapangan 3 × 3 cm² hasil perbandingan kalkulasi dosis menggunakan algoritma *collapsed cone* terhadap pengukuran pada *slab phantom* didapat failed point sebanyak 1 titik dengan perbedaan 0.053 Gy terhadap hasil pengukuran, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* tingkat keakuratan terhadap hasil pengukuran mencapai 100%.

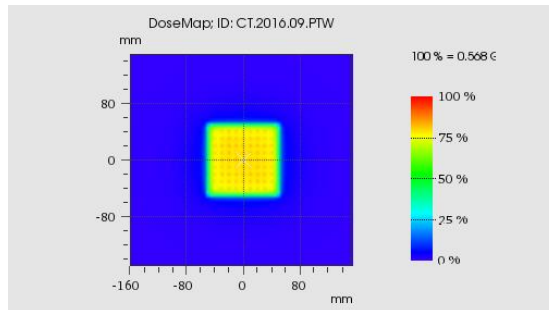
Pada luas lapangan 5 × 5 cm² hasil perbandingan untuk algoritma *collapsed cone* didapat 3 *failed point* dari 46 titik dosis yang dievaluasi terhadap hasil pengukuran dengan perbedaan terhadap hasil pengukuran hingga 0.059 Gy, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* didapat kesesuaian terhadap hasil pengukuran 100 %. Variasi luas lapangan 10 × 10 cm² didapat hasil perbandingan untuk algoritma *collapsed cone* tingkat keakuratan terhadap hasil pengukuran sebesar 96.2%, dengan *failed point* sebanyak 6 titik dosis yang tersebar di bagian tepi bawah lapangan penyinaran dan perbedaan terhadap hasil pengukuran hingga 0.148 Gy. Di sisi lain, untuk algoritma *monte carlo* diperoleh hasil 2 *failed point* dari total 157 titik dosis yang dievaluasi dengan perbedaan terhadap hasil pengukuran hingga 0.138 Gy. Selanjutnya untuk luas lapangan 15 × 15 cm² diamati untuk algoritma *collapsed cone* terdapat 24 *failed point* dari 340 titik dosis yang dievaluasi dengan perbedaan terhadap hasil pengukuran pada *slab phantom* hingga 0.086 Gy, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* diperoleh 9 *failed point* dari 340 titik dosis yang dievaluasi dengan perbedaan terhadap hasil pengukuran hingga 0.1 Gy. Variasi luas lapangan 20 × 20 cm² diperoleh hasil untuk algoritma *collapsed cone* yaitu 14 *failed point* dari 584 titik dosis yang dievaluasi dengan perbedaan terhadap titik dosis pada hasil pengukuran hingga 0.185 Gy, sedangkan untuk algoritma *monte carlo* diperoleh 37 *failed point* dengan perbedaan terhadap hasil pengukuran hingga 0.165 Gy. Secara keseluruhan algoritma *monte carlo* lebih akurat terhadap hasil pengukuran jika dibandingkan dengan algoritma *collapsed cone*. Namun algoritma *collapsed cone* pada luas lapangan 20 × 20 cm² memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi terhadap hasil pengukuran dibanding algoritma *monte carlo*.

Pada percobaan dilakukan variasi output pesawat (50, 100, 150, dan 200 MU) dan juga luas lapangan (3 × 3 cm², 5 × 5 cm², 10 × 10 cm², 15 × 15 cm², 20 × 20 cm²). Untuk variasi output pesawat didapat hasil yaitu pada peningkatan nilai MU keakuratan distribusi dosis TPS algoritma *Collapsed cone* maupun *Monte carlo* terhadap pengukuran langsung *slab phantom* cenderung menurun namun tidak signifikan. Hasil perbandingan distribusi dosis kalkulasi algoritma *Collapsed Cone* terhadap hasil pengukuran sebenarnya pada *slab phantom* menunjukkan tingkat keakuratan distribusi dosis hasil kalkulasi cenderung meningkat dengan bertambahnya luasan lapangan penyinaran, sedangkan untuk algoritma *Monte Carlo* sebaliknya cenderung menurun dengan bertambahnya luas lapangan penyinaran. Luas lapangan penyinaran akan berpengaruh pada nilai dari *Relative Dose Factor* atau juga dikenal *Output factor* pesawat yang terdiri dari komponen hamburan akibat bukaan kolimator (S_c) dan juga hamburan pada *phantom* (S_p) yang kemudian berpengaruh pada sebaran dosis.

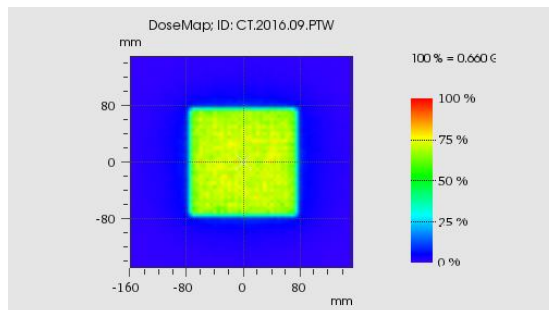
Dari keseluruhan perbandingan nilai output mesin dengan hasil kalkulasi algoritma pada *slab phantom*, didapat bahwa tingkat keakuratan algoritma *monte carlo* secara keseluruhan lebih baik daripada algoritma *collapsed cone*.

Secara teori algoritma *monte carlo* memang lebih akurat dibanding algoritma *collapsed cone*, hal ini dikarenakan pada algoritma *monte carlo* mensimulasikan secara keseluruhan proses fisis yang melibatkan partikel radiasi selama transportasi. Proses fisis tersebut dibagi menjadi dua yaitu pada saat partikel radiasi melewati kepala gantri dari mesin termasuk sistem kolimator dan partikel yang telah di kolimasi pada gantri kemudian menuju target (pasien/*phantom*) selanjutnya mendistribusikan dosis pada target.⁵

Kompleksitas dari simulasi yang dilakukan pada algoritma *monte carlo* ini yang menghasilkan akurasi yang tinggi dibandingkan dengan algoritma lain. Kompleksitas simulasi yang dilakukan pada algoritma *monte carlo* juga mengakibatkan lamanya proses kalkulasi dosis pada algoritma *monte carlo* sehingga dibutuhkan CPU komputer dengan spesifikasi tinggi untuk memangkas waktu kalkulasi dosis. Dalam perkembangannya algoritma *collapsed cone* diciptakan sebagai opsi lain dari algoritma *monte carlo* mengingat waktu kalkulasi pada algoritma *monte carlo* yang lama. Algoritma *collapsed cone* merupakan penyederhanaan proses fisis yang disimulasikan pada algoritma *monte carlo* yaitu dengan menyederhanakan transpor dari partikel radiasi pada tubuh pasien. Proses fisis ini disederhanakan menggunakan persamaan konvolusi yaitu dengan memadukan fluks energi foton primer (TERMA – *Total Energy Released in Unit Mass*) dengan kernel yang menjelaskan kontribusi dari hamburan foton dan elektron.⁵ Penyederhanaan proses fisis ini menghasilkan waktu kalkulasi yang lebih singkat namun tingkat akurasi yang lebih rendah dibanding algoritma *monte carlo*.



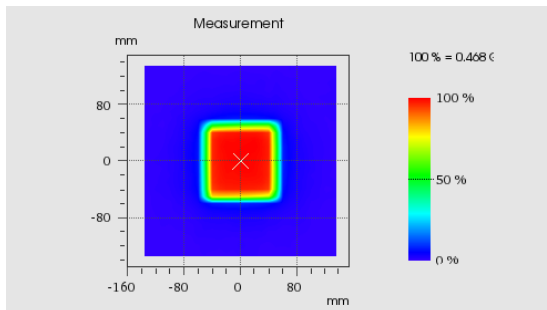
Gambar 4. Distribusi dosis hasil perhitungan menggunakan algoritma *collapsed cone* dengan luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ untuk 50 MU.



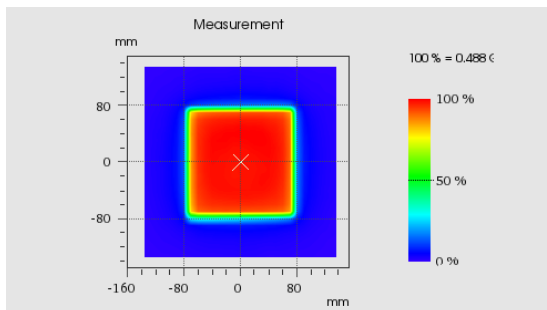
Gambar 5. Distribusi dosis hasil perhitungan menggunakan algoritma *monte carlo* dengan luas lapangan $15 \times 15 \text{ cm}^2$ untuk 50 MU.

Tabel 5. Hasil perbandingan kalkulasi dosis algoritma CC dan MC terhadap hasil pengukuran untuk output mesin 200 MU.

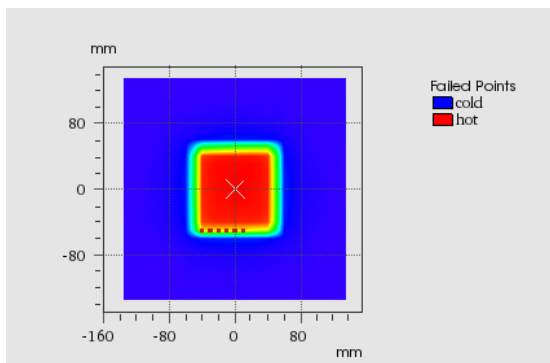
<i>Field size (cm²)</i>	<i>Evaluated dose point</i>		<i>Passed dose point</i>		<i>Rasio dosis (%)</i>	
	<i>CC</i>	<i>MC</i>	<i>CC</i>	<i>MC</i>	<i>CC</i>	<i>MC</i>
3 × 3	21	21	19	21	90.5	100
5 × 5	46	46	42	45	91.3	97.8
10 × 10	160	160	153	153	95.6	95.6
15 × 15	340	340	313	331	92.1	97.4
20 × 20	589	589	572	555	97.1	94.2



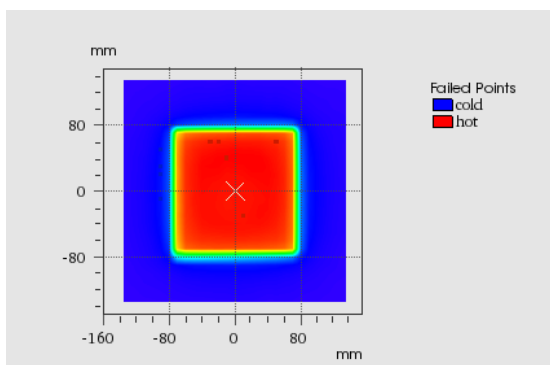
Gambar 6. Distribusi dosis dari hasil pengukuran pada *slab phantom* dengan luas lapangan penyinaran 10 × 10 cm² untuk 50 MU.



Gambar 7. Distribusi dosis dari hasil pengukuran pada *slab phantom* dengan luas lapangan penyinaran 15 × 15 cm² untuk 50 MU.



Gambar 8. Hasil perbandingan distribusi dosis hasil kalkulasi algoritma *collapsed cone* terhadap distribusi dosis hasil pengukuran dengan variasi luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dan 50 MU.



Gambar 9. Hasil perbandingan distribusi dosis hasil kalkulasi algoritma *monte carlo* terhadap distribusi dosis hasil pengukuran dengan variasi luas lapangan $15 \times 15 \text{ cm}^2$ dan 50 MU.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada tahap pertama perbandingan hasil kalkulasi distribusi dosis algoritma *collapsed cone* terhadap algoritma *monte carlo* untuk variasi luas lapangan standar $3 \times 3 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$ berturut turut yaitu 0%, 0%, 0.7%, 1.2%, 1.1%.
2. Pada tahap kedua yaitu hasil kalkulasi distribusi dosis masing-masing algoritma dibandingkan dengan hasil pengukuran sebenarnya pada *slab phantom* untuk variasi luas lapangan penyinaran standar $3 \times 3 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$ dan nilai MU didapat perbedaan untuk algoritma *collapsed cone* dan *monte carlo* terhadap hasil pengukuran sebagai berikut:
 - a. 50 MU
Collapsed cone : 4.8%, 6.5%, 3.8%, 7.1%, dan 2.4%
Monte carlo : 0%, 0%, 1.3%, 2.6%, dan 6.3%
 - b. 100 MU
Collapsed cone : 9.5%, 6.5%, 4.4%, 7.6%, dan 2.4%
Monte carlo : 0%, 2.2%, 1.9%, 3.2%, dan 6.3%
 - c. 150 MU
Collapsed cone : 9.5%, 6.5%, 4.4%, 7.9%, dan 2.7%
Monte carlo : 0%, 2.2%, 3.8%, 2.9%, dan 6.8%

- d. 200 MU
Collapsed cone : 9.5%, 8.7%, 4.4%, 7.9%, dan 2.9%
Monte carlo : 0%, 2.2%, 4.4%, 2.6%, dan 5.8%
3. Untuk algoritma *monte carlo*, tingkat akurasi cenderung lebih akurat dari *collapsed cone* untuk variasi luas lapangan kecil hingga $15 \times 15 \text{ cm}^2$ dan tingkat akurasi cenderung menurun terhadap peningkatan luas lapangan penyinaran.
 4. Untuk algoritma *collapsed cone* lebih akurat pada luas lapangan $20 \times 20 \text{ cm}^2$ dan tingkat akurasi cenderung meningkat terhadap peningkatan luas lapangan penyinaran.

Referensi

- ¹ Jayaraman, et al. Clinical Radiotherapy Physics. 2nd. New York: Springer, 2004. 3 p.
- ² IAEA International Atomic Energy Agency, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standard of Absorbed Dose to Water", Technical Report Series no. 398, IAEA, Vienna (2000)
- ³ Singh H, Neutze JA, "Radiology Fundamental," J. Chem. Inf. Model. 53(9), 11-30 (2013).
- ⁴ Arumugam S, "Three Dimensional Dose Verification of VMAT Plans Using the Octavius 4D Dosimetric System," J. Phys. Conf. Ser. 573(1), 012081 (2015).
- ⁵ Lanchun L, "Dose Calculation Algorithms in External Beam Photon Radiation Therapy," Int J Cancer Ther Oncol. 1(2), 01025 (2013).