

DOSIS RADIASI DARI TINDAKAN CT-SCAN KEPALA

Johan A.E. Noor, Indrastuti Normahayu^{2,3}

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran 2, Malang 65145, Indonesia

²Laboratorium Radiologi, Fakultas Kedokteran, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran 2, Malang 65145, Indonesia

³Instalasi Radiologi, Rumah Sakit Umum Daerah Dr Saiful Anwar, Jl. Jaksu Agung Suprpto 2, Malang 65112, Indonesia

Email: 1johan_ae@ub.ac.id

ABSTRAK

CT-scanner menjadi semakin populer di kalangan dokter sebagai peranti pencitraan medis untuk keperluan praktek diagnostik mereka. Namun, karena *CT-scanner* mempergunakan berkas pengan sinar-x beam sebagai sumber sinarnya, maka perlindungan terhadap efek merusak sinar-x harus diperhatikan dengan lebih seksama untuk memastikan bahwa efek berbahaya kepada pasien berada pada aras minimal. Studi kami dilakukan di Instalasi Radiologi di dua rumah sakit besar di kota Malang, Jawa Timur. Kami mengambil 100 (50 laki-laki dan 50 perempuan) pasien yang dikirim ke fasilitas CT untuk menjalani eksaminasi CT kepala non-kontras di setiap rumah sakit. Dosis efektif setiap pasien dihitung menggunakan perangkat lunak penghitung dosis *CTDosimetry* versi 1.0.4. Hasil studi kami menunjukkan bahwa dosis efektif yang diterima oleh pasien berada dalam kisaran 1,25-2,51 mSv untuk pasien laki-laki dan 1,14-2,39 mSv untuk pasien wanita. Secara umum, pasien laki-laki menerima dosis lebih besar daripada pasien perempuan seperti yang diperkirakan.

Kata Kunci: CT-scanner, sinar-x pengan, radiodiagnostik, pencitraan medis.

ABSTRACT

CT-scanners are becoming more and more popular imaging modality amongst medical practitioners as their tools for diagnostic practices. Yet, since CT-scanners employ ionizing x-ray beam as the source of imaging light, protection against its damaging effects must be observed closely to ensure that the harmful effects to patients are minimum. Our study involved two Departments of Radiology in two major hospitals in the city of Malang, East Java. We took 100 (50 males and 50 females) patients who were sent to the department CT facility to have non-contrast head CT examination in each hospital. The effective dose of each patient was calculated using the *CTDosimetry* version 1.0.4 dose calculator software. Our results reveal that the effective doses received by patients were in range 1.25 – 2.51 mSv for male patients and 1.14 – 2.39 mSv for female patients. In general, male patients received more doses than the female counterparts as predicted.

Keywords: CT-scanner, ionizing x-ray beam, radiodiagnostic, medical imaging.

PENDAHULUAN

Sinar-x merupakan sinar tidak tampak yang berada pada pita frekuensi antara 3×10^{16} Hz sampai 3×10^{19} Hz dan pita energi antara 100 eV sampai 100 keV pada spektrum gelombang elektromagnetik. Dengan energi sebesar itu sinar-x mampu menembus benda dan mengionkan benda-benda yang dilaluinya. Dengan kemampuannya ini sinar-x telah dimanfaatkan di banyak bidang, termasuk militer, keamanan, industri, dan kesehatan (Scarlett dkk., 2001; Daido, 2002).

Di bidang kedokteran sinar-x digunakan di bidang diagnostik (radiodiagnostik) dan terapi (radioterapi). Di bidang diagnostik sinar-x digunakan untuk memotret organ bagian dalam tubuh manusia (*medical imaging*) dan di bidang terapi sinar-x digunakan untuk membunuh sel-sel kanker (dengan mesin *linear accelerator*). Secara keseluruhan, sinar-x mempunyai porsi lebih dari 70% radiasi pengion yang digunakan di bidang kesehatan di seluruh dunia. Salah satu aplikasi sinar-x di bidang kedokteran adalah pemanfaatannya untuk pencitraan (*imaging*) dengan mesin pemindai (*CT scanner*) untuk membuat citra tomografis bagian dalam tubuh manusia secara melintang yang diperkenalkan oleh Godfrey N. Hounsfield, seorang insinyur dari Inggris, pada tahun 1970-an (Ambrose, 1973; Ambrose dan Hounsfield, 1973; Hounsfield, 1973; Beckmann, 2006).

Munculnya *computed tomography* (CT) telah merevolusi radiologi diagnostik. Hingga saat ini diperkirakan lebih dari 62 juta CT scan per tahun dilakukan di Amerika Serikat, termasuk sedikitnya empat juta untuk anak-anak (Brenner dan Hall, 2007). Berdasarkan sifatnya, CT melibatkan dosis radiasi lebih besar dari prosedur pencitraan sinar-x konvensional (foto Röntgen) yang lebih umum (Tabel 1). Dengan demikian risiko terjadinya kanker pada pasien sebagai konsekuensi penggunaan radiasi pengion ini juga meningkat. Meskipun risiko untuk setiap orang tidak besar dan tidak seragam, meningkatnya paparan radiasi pada manusia menjadi masalah kesehatan masyarakat saat ini dan di masa depan.

Dosis radiasi yang diterima oleh pasien tergantung kepada besarnya intensitas sinar-x dan lamanya paparan. Dosis radiasi yang khas

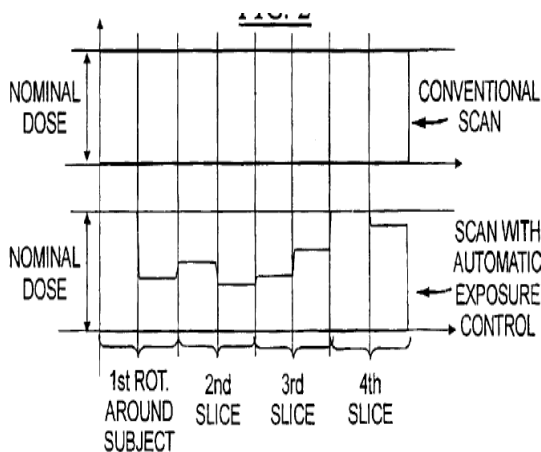
untuk orang dewasa dari tindakan foto Röntgen dada (*thorax*) adalah sekitar 0,02 mSv (2 mrem) untuk pengambilan posterior-anterior (PA) dan 0,04 mSv (4 mrem) untuk pengambilan gambar sisi (lateral) dengan dosis yang diterima oleh organ paru sebagaimana diberikan pada Tabel 2. Sementara pada tindakan CT-scanner, dosis efektif yang diterima oleh pasien yang menjalani tindakan eksaminasi dada adalah sebesar 7 mSv (Mettler dkk., 2008), yaitu sekitar 175 – 350 kali lipat. Radiasi dosis rendah sekecil apapun mempunyai risiko menimbulkan kanker pada pasien penerimanya (ICRP, 2005; ICRP, 2007; Einstein dkk., 2008; Mettler dkk., 2008; Mettler dkk., 2008; deGonzález dkk., 2009; Einstein, 2012) dan kemungkinan efek-efek deterministik yang lain, misalnya luka di kulit (Rehani dan Ortiz-Lopez, 2006), rambut rontok sementara berbentuk *bandage* (Imanishi dkk., 2005), serta leukaemia dan tumor otak (Pearce dkk., 2012).

Jenis Studi	Organ yang Relevan	Dosis Organ yang Relevan* (mGy or mSv)
Radiografi gigi	Otak	0,005
Radiografi dada posterior-anterior	Paru	0,01
Radiografi dada lateral	Paru	0,15
Skrining mamografi	Payudara	3
CT perut dewasa	Lambung	10
Barium enema	Usus besar (kolon)	15
CT perut neonatal	Lambung	20

Tabel. 1 Dosis radiasi, ukuran energi pengion yang diserap per satuan massa, dinyatakan dalam gray (Gy) atau milligray (mGy), 1 Gy = 1 joule per kilogram. Dosis radiasi sering dinyatakan sebagai dosis setara dalam satuan sievert (Sv) atau millisievert (mSv). Untuk radiasi sinar-x, yang merupakan tipe radiasi yang digunakan di CT scanner, 1 mSv = 1 mGy.

Dari sisi teknologi, mesin *CT-scanner* telah mengalami perkembangan yang sangat

pesat, baik pada aspek perangkat keras maupun perangkat lunaknya. Mesin yang pertama kali dibangun adalah mesin yang menghasilkan citra satu irisan (*single slice*). Sampai dengan saat ini teknologi CT-scanner telah sampai pada teknologi MSMD (*multi slice multi detector*) (Toth, 2002) dan AEC (*Automatic Exposure Control*) yang mampu menghasilkan citra hingga 128 irisan (*slice*) serta mengurangi dosis sebesar 10–60% (Popescu, 2004; Kalra dkk., 2005; Stamm, 2012). Perbedaan antara dosis yang diterima oleh pasien per *slice* dalam tindakan dengan pemindaian konvensional (arus tabung tetap) dengan pemindaian yang menggunakan AEC diilustrasikan pada Gambar 1. Semua perkembangan tersebut ditujukan untuk meminimalkan dosis yang diterima oleh pasien sambil mempercepat proses akuisisi data dan rekonstruksi citra sehingga dipenuhi prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Acceptable*), yaitu prinsip meminimalkan dosis radiasi dengan tetap menjaga kualitas citra yang dihasilkan (ARPANSA, 2004).



Gambar 1. Ilustrasi profil dosis yang dihasilkan oleh mesin dengan modus arus tetap (*fixed current*) yang diterapkan pada mesin CT konvensional dibandingkan dengan dosis yang dihasilkan dengan menggunakan *automatic exposure control* (diambil dari referensi (Popescu, 2004)). Secara total dosis dari mesin AEC lebih kecil daripada dosis dari mesin konvensional.

Dosis efektif (DE) adalah besaran yang digunakan untuk mengekspresikan dan

membandingkan dosis radiasi yang diberikan kepada pasien dari berbagai mesin CT-scanner yang diperkenalkan oleh ICRP pada tahun 1977 (ICRP, 1977). Definisi ini digunakan dalam perhitungan dosis *CTDosimetry* (*software* MS Excel dengan makro) versi 1.0.4 yang dibuat oleh kelompok imPACTscan (ImPACT-scan, 2009) yang digunakan dalam penelitian ini. Perangkat lunak ini menghitung dosis menggunakan teknik simulasi Monte Carlo (Jones dan Shrimpton, 1991; Shrimpton dkk., 1991; Jones dan Shrimpton, 1993).

Naskah ini mendiskusikan hasil penelitian kami dalam mengestimasi dosis yang diterima oleh pasien yang menjalani prosedur eksaminasi pencitraan CT di dua rumah sakit besar di kota Malang dengan mesin *CT-scanner single slice* dengan *fixed current mode* dan *automatic current mode*, untuk melihat apakah dosis yang diterima oleh pasien berada di bawah nilai rekomendasi dari ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) yang dipublikasikan dalam *Publication No. 103* (ICRP, 2007) dan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 63 tahun 2000 tentang Keselamatan dan Kesehatan terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion, pasal 5 ayat 1 menyatakan: "Apabila dalam satu lokasi terdapat beberapa fasilitas pemanfaatan tenaga nuklir, pengusaha instalasi menetapkan tingkat dosis yang lebih rendah untuk masing-masing instalasi, agar dosis kumulatif tidak melampaui NBD (*Nilai Batas Dosis*)".

METODE PENELITIAN

Pasien

Tindakan eksaminasi CT-scan kepala adalah pemeriksaan umum yang banyak dilakukan di rumah sakit. Data CT dikumpulkan dari 100 orang pasien (50 laki-laki dan 50 perempuan) yang dikirim ke Departemen Radiologi di dua rumah sakit besar di Malang. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pasien yang menjalani eksaminasi CT kepala

dari April sampai dengan Oktober 2011 di dua rumah sakit responden. Usia pasien berada pada jangkau antara 17 – 87 tahun.

Data Dosimetri

Eksaminasi CT dilakukan dengan mesin *General Electric (GE) HiSpeed DX/i* di Rumah Sakit A dan *Siemens Somatom Spirit CT 2006C2 H-SP-CR* di Rumah Sakit B. Data dosimetri yang diambil meliputi tegangan tabung (kVp), ketebalan irisan/slice (mm), arus tabung (mA), waktu rotasi sekali putaran gantri (s), panjang scan (cm), $CTDI_{vol}$ (mGy), dan DLP (mGy.cm).

Dosis CT masing-masing organ diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak *ImPACT CTDosimetry* versi 1.0.4 (27/05/2011) (*ImPACT-scan*, 2009) yang menghitung dosis penyinaran untuk fantom kepala seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1 dengan menggunakan data dosimetri CT yang dihasilkan oleh *National Radiological Protection Board* Inggris (Jones dan Shrimpton, 1991; Shrimpton dkk., 1991; Jones dan Shrimpton, 1993).

PEMBAHASAN

Analisis dilakukan pada kelompok 100 pasien yang menjalani eksaminasi CT-scan kepala antara April dan Oktober 2011 di setiap rumah sakit yang berpartisipasi. Hasil dari setiap rumah sakit dibahas di bawah ini.

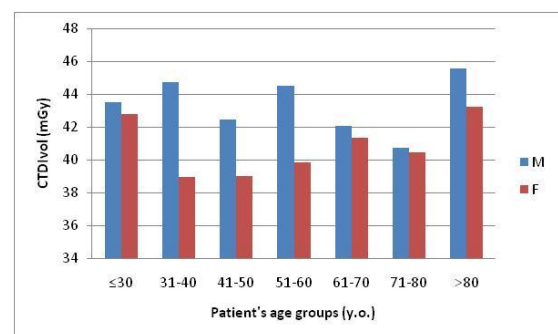
Rumah Sakit A

Mesin *CT scanner* GE di Rumah Sakit A menggunakan teknik arus tabung adaptif (*adaptive tube current technique*). Arus listrik yang dicatukan ke tabung sinar-x dan nilai perhitungan $CTDI_{vol}$ terkait dengan arus tabung tersebut disajikan pada Tabel 2 berdasarkan kelompok umur dan jenis kelamin. Nilai $CTDI_{vol}$ bervariasi antara 38,93 mGy sampai dengan 45,54 mGy (disajikan dengan grafik pada Gambar 2).

Terlihat pada Tabel 2 bahwa nilai-nilai $CTDI$ bervariasi karena arus tabung juga berbeda-beda. Nilai $CTDI$ dirata-rata dari MSAD (*Multiple Scan Average Dosis*). MSAD adalah parameter dosis rata-rata dalam eksaminasi CT. BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) menetapkan ambang MSAD untuk orang dewasa sebesar 50 mGy. $CTDI$ rata-rata untuk pasien laki-laki adalah 43,35 mGy dan 40,48 mGy untuk pasien wanita. Oleh karena itu nilai-nilai $CTDI$ di Rumah Sakit A Malang masih berada di bawah ambang batas.

Tabel 2. Perbandingan arus tabung (dalam mA) dan $CTDI_{vol}$ (dalam mGy) untuk pasien laki-laki (L) dan perempuan (P) di Rumah Sakit A.

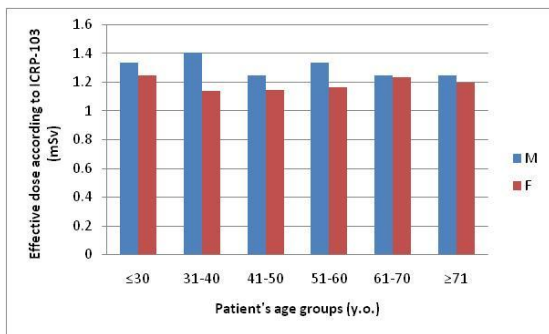
Usia (tahun)	Arus tabung (mA)		$CTDI_{vol}$ (mGy)	
	L	P	L	P
≤30	143,4	141,0	43,5	42,7
31-40	147,5	128,3	44,7	38,9
41-50	140,0	128,6	42,5	39,0
51-60	146,7	131,4	44,5	39,8
61-70	138,7	136,7	42,1	41,3
71-80	134,1	133,3	40,7	40,5
>80	150,0	142,5	45,5	43,2



Gambar 2. Profil $CTDI_{vol}$ (dalam mGy) untuk masing-masing kelompok umur dan jenis kelamin pasien (M: laki-laki; F: perempuan) di Rumah Sakit A.

Tabel 3. Dosis efektif untuk pasien laki-laki (L) dan perempuan (P) sesuai dengan bobot rekomendasi ICRP No.103.

Usia (tahun)	Dosis Efektif (mSv)	
	Laki-laki	Perempuan
≤ 30	1,34	1,25
31-40	1,41	1,14
41-50	1,25	1,15
51-60	1,34	1,17
61-70	1,25	1,24
≥ 71	1,25	1,20



Gambar 3. Diagram balok dosis efektif rata-rata (mSv) yang diterima oleh pasien (M: laki-laki; F: perempuan) di Rumah Sakit A sesuai dengan kelompok usia.

Dosis efektif untuk setiap kelompok usia diringkas dalam Tabel 3 dan digambarkan pada Gambar 3. Dosis efektif adalah paparan radiasi yang diterima oleh pasien selama menjalani eksaminasi CT. Dosis efektif rata-rata untuk Rumah Sakit A adalah 1,32 mSv dan 1,21 mSv, masing-masing untuk pasien pria dan wanita.

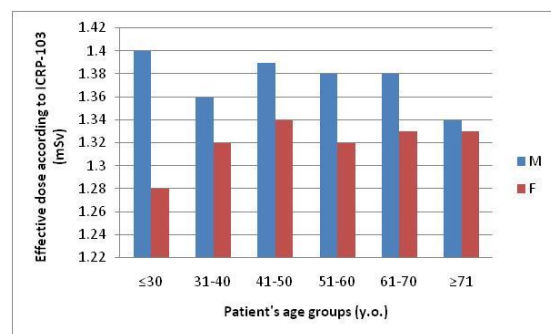
Rumah Sakit B

Mesin CT-scanner di Rumah Sakit B adalah mesin buatan Siemens dengan tipe Somatom Spirit. Berbeda dengan mesin di Rumah Sakit A yang memanfaatkan catu arus adaptif, Siemens menggunakan mode arus tetap. Dalam mode ini, besarnya arus yang

dicatu ke pemindai adalah konstan selama eksaminasi, yaitu 240 mA. Oleh karena itu $CTDI_{vol}$ juga konstan pada 47,5 mGy. Perhitungan dosis efektif menggunakan perangkat lunak dan rekomendasi ICRP yang sama. Hasilnya ditabulasikan dalam Tabel 4 dan digambarkan dalam Gambar 4. Dosis efektif rata-rata adalah 1,38 mSv dan 1,32 mSv, masing-masing untuk pasien pria dan wanita.

Tabel 4. Dosis efektif rata-rata (mSv) untuk pasien laki-laki (L) dan perempuan (P) dihitung dengan rekomendasi ICRP 103 untuk mesin di Rumah Sakit B.

Usia (tahun)	Dosis Efektif (mSv)	
	Laki-laki	Perempuan
≤ 30	1,40	1,28
31-40	1,36	1,32
41-50	1,39	1,34
51-60	1,38	1,32
61-70	1,38	1,33
≥ 71	1,34	1,33



Gambar 4. Diagram balok dosis efektif rata-rata (mSv) yang diterima oleh pasien (M: laki-laki; F: perempuan) di Rumah Sakit B sesuai dengan kelompok usia.

Perbandingan Dosis Efektif

Mesin pemindai CT di dua rumah sakit responden dikategorikan menjadi dua kelompok: arus tetap (*fixed current*), yang diwakili oleh pemindai buatan *Siemens Healthcare* dan arus adaptif yang diwakili oleh pemindai buatan *General Electric (GE) Healthcare*. Sistem arus tetap mencatu arus konstan ke tabung pembangkit sinar-x, sedangkan sistem arus adaptif menyesuaikan arus yang dipasok ke tabung dengan ketebalan obyek yang akan dicitrakan. Sistem terakhir ini bertujuan untuk mengurangi radiasi yang terpapar kepada pasien, sehingga mengurangi efek radiasi. Dosis efektif dari dua mesin pemindai yang dipelajari dalam penelitian ini ditabulasikan dalam Tabel 6 dan 7, masing-masing untuk pasien laki-laki dan perempuan.

Tabel 6. Perbandingan dosis efektif rerata (dalam mSv) untuk pasien laki-laki di Rumah Sakit responden yang dihitung berdasarkan rekomendasi ICRP no. 103.

Usia (tahun)	Dosis Efektif (mSv)	
	RS A	RS B
≤ 30		
31-40	1,34	1,40
41-50	1,41	1,36
51-60	1,25	1,39
61-70	1,34	1,38
≥ 71	1,25	1,38
	1,25	1,34

Tabel 7. Perbandingan dosis efektif rerata (dalam mSv) untuk pasien perempuan di Rumah Sakit responden yang dihitung berdasarkan rekomendasi ICRP no. 103.

Usia (tahun)	Dosis Efektif (mSv)	
	RS A	RS B
≤ 30		
31-40	1,25	1,28
41-50	1,14	1,32
51-60	1,15	1,34
61-70	1,17	1,32
≥ 71	1,24	1,33
	1,20	1,33

Hasil perhitungan dosis menunjukkan bahwa mesin pemindai CT buatan GE menghasilkan dosis yang lebih rendah dibandingkan dengan mesin pemindai CT buatan Siemens. Hal ini menunjukkan bahwa pemindai arus adaptif lebih aman daripada mesin-mesin yang lain yang memanfaatkan teknik arus tetap.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa, seperti yang diperkirakan, mesin dengan arus tabung tetap (*fixed tube current*) yang berada di Rumah Sakit B menghasilkan dosis yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin dengan arus tabung adaptif (*automatic exposure control*) di Rumah Sakit A. Data penelitian juga memperlihatkan, bahwa pada umumnya, pasien perempuan menerima dosis lebih rendah dari pasien laki-laki.

Rekomendasi yang ingin diusulkan dari penelitian ini adalah penggunaan ambang 2,0 mSv sebagai acuan dosis lokal untuk eksaminasi CT kepala di rumah sakit di wilayah Malang Raya. Penelitian lebih lanjut akan dilakukan untuk memperluas cakupan wilayah dalam rangka membangun acuan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambrose, J. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 2. Clinical application. *British Journal of Radiology*. 46(552): 1023-1047.
- Ambrose, J. dan G. N. Hounsfield. 1973. Computerized transverse axial tomography. *British Journal of Radiology*. 46(542): 148-149.
- ARPANSA. 2004. *National Directory for Radiation Protection - Edition 1.0*. The Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Canberra, Australia.
- Beckmann, E. C. 2006. CT scanning the early days. *British Journal of Radiology*. 79: 5-8.
- Brenner, D. J. dan E. J. Hall. 2007. Computed tomography--an increasing source of radiation exposure. *New England Journal of Medicine*. 357(22): 2277-2284.
- Daido, H. 2002 Review of soft x-ray laser researches and developments. *Reports on Progress in Physics*. 65 1513.
- deGonzález, A. B., M. Mahesh, K.-P. Kim, M. Bhargavan, R. Lewis, F. A. Mettler dan C. Land. 2009. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Archives of International Medicine*. 169(22): 2071-2077.
- Einstein, A. J. 2012. Beyond the bombs: cancer risks of low-dose medical radiation. *Lancet*. 380 (9840): 455-457.
- Einstein, A. J., J. Sanz, S. Dellegrottaglie, M. Milite, M. Sirol, M. Henzlova dan S. Rajagopalan. 2008. Radiation dose and cancer risk estimates in 16-slice computed tomography coronary angiography. *Journal of Nuclear Cardiology*. 15(2): 232-240.
- Hounsfield, G. N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *British Journal of Radiology*. 46(552): 1016-1022.
- ICRP. 1977. *ICRP Publication No. 26: The 1977 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. International Commission on Radiological Protection. Oxford.
- ICRP. 2005. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk: ICRP publication 99. *Annals of the ICRP*. 35(4): 1-142.
- ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*. 37(2-4): 1-332.
- ICRP. 2007. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT): ICRP Publication 102. *Annals of the ICRP*. 37(1): 1-80.
- Imanishi, Y., A. Fukui, H. Niimi, D. Itoh, K. Nozaki, S. Nakaji, K. Ishizuka, H. Tabata, Y. Furuya, M. Uzura, H. Takahama, S. Hashizume, S. Arima dan Y. Nakajima. 2005. Radiation-induced temporary hair loss as a radiation damage only occurring in patients who had the combination of MDCT and DSA. *European radiology*. 15(1): 41-46.
- ImPACT-scan. 2009. CTDosimetry.
- Jones, D. G. dan P. C. Shrimpton. 1991. NRPB-R250: Survey of CT practice in the UK. Part 3: Normalised organ doses calculated using Monte Carlo techniques. Report SR250, National Radiological Protection Board, Didcot, Oxfordshire, UK.
- Jones, D. G. dan P. C. Shrimpton. 1993. NRPB-SR250: Normalised Organ Doses for X-Ray Computed Tomography

- Calculated Using Monte Carlo Techniques. Didcot, Oxfordshire, UK, National Radiological Protection Board.
- Kalra, M. K., S. M. R. Rizzo dan R. A. Novelline. 2005. Reducing radiation dose in emergency computed tomography with automatic exposure control techniques. *Emergency Radiology*. 11: 267-274.
- Mettler, F. A., W. Huda, T. T. Yoshizumi dan M. Mahesh. 2008. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog. *Radiology*. 248(1): 254-263.
- Mettler, F. A., B. R. Thomadsen, M. Bhargavan, D. B. Gilley, J. E. Gray, J. A. Lipoti, J. McCrohan, T. T. Yoshizumi dan M. Mahesh. 2008. Medical radiation exposure in the US in 2006: Preliminary results. *Health Physics*. 95(5): 502-507.
- Pearce, M. S., J. A. Salotti, M. P. Little, K. McHugh, C. Lee, K. P. Kim, N. L. Howe, C. M. Ronckers, P. Rajaraman, S. A. W. Craft, L. Parker dan A. B. d. González. 2012. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 380(9840): 499 - 505.
- Popescu, S. 2004. *Method and apparatus for automatic exposure control in CT scanning*. Siemens Aktiengesellschaft, Munich. US Patent No. 6744846.
- Rehani, M. M. dan P. Ortiz-Lopez. 2006. Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions-keeping them under control. *International Journal of Cardiology*. 109(2): 147-151.
- Scarlett, N. V. Y., I. C. Madsen, C. Manias dan D. Retallack. 2001. On-line X-ray diffraction for quantitative phase analysis: Application in the Portland cement industry. *Powder Diffraction*. 16: 71-80.
- Shrimpton, P. C., D. G. Jones, M. C. Hillier, B. F. Wall, J. C. Le Heron dan K. Faulkner. 1991. NRPB-R249: Survey of CT practice in the UK. Part 2: Dosimetric aspects. Report SR250, National Radiological Protection Board, Didcot, Oxfordshire, UK.
- Stamm, G. 2012. *Collective Radiation Dose from MDCT: Critical Review of Surveys Studies dalam Radiation Dose from Multidetector CT*. D. Tack, M. K. Kalra dan P. A. Gevenois, Eds. Springer Verlag. Heidelberg. pp. 209-229.
- Toth, T. L. 2002. Dose reduction opportunities for CT scanners. *Pediatric Radiology*. 32(4): 261-267.