

Buletin

ALARRA

- **Aberasi kromosom metafase dan interfase sel limfosit pada awak penerbangan, suatu kajian awal**
 - **Biomarker kerusakan sel akibat radiasi pengion di bidang medik**
 - **Potensi pemanfaatan biomarker γ -H2AX dalam biodosimetri medis**
 - **Keselamatan radiasi pada pasien yang menjalani terapi kanker dengan LINAC energi tinggi**
 - **Peran instrumen pencitraan hewan coba pada perkembangan kedokteran nuklir di Indonesia**
 - **Menghadirkan unsur-unsur transuranium dengan teknik transmudasi inti**

**Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
Badan Tenaga Nuklir Nasional**



TIM REDAKSI

Penanggung Jawab

Kepala PTKMR

Pemimpin Redaksi

Dr. Mukh Syaifudin

Penyunting/Editor & Pelaksana

Prof. Drs. Eri Hiswara, M.Sc

Dr. Heny Suseno

Drs. Hasnel Sofyan, M.Eng

Drs. Gatot Wurdianto, M.Eng

dr. Fadil Nazir, Sp.KN

Sekretariat

Setyo Rini, SE

Salimun

Alamat Redaksi/Penerbit :

PTKMR – BATAN

⇒ Jl. Lebak Bulus Raya No. 49
Jakarta Selatan (12440)

Tel. (021) 7513906, 7659512 ;

Fax. (021) 7657950

⇒ PO.Box 7043 JKSKL,
Jakarta Selatan (12070)

**e-mail : ptkmr@batan.go.id
alara_batan@yahoo.com**

Dari Redaksi

Radiasi pengion dapat menginduksi sejumlah kerusakan pada *deoxyribonucleic acid* (DNA) dari yang paling ringan seperti kerusakan pada basa nitrogen sampai kerusakan yang paling parah yaitu *double strand breaks* (DSB) dan *complex clustered DSBs*. Sebagai kerusakan yang kompleks DSB dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan atau aberasi pada struktur kromosom dan juga kematian sel khususnya apoptosis (*programmed cell death*).

Para astronot yang terpapar radiasi pengion selama eksplorasi ruang angkasa telah menjadi perhatian yang serius untuk dikaji. Kebanyakan studi untuk mempelajari radiasi LET tinggi yang menginduksi kerusakan kromosom pada sel tahap metaphase yang dikumpulkan pada suatu waktu setelah menerima paparan. Perkiraan risiko kesehatan dapat dilakukan dengan pengukuran dosis serap menggunakan dosimeter pasif. Berdasarkan studi sitotoksitas aberasi kromosom dan transformasi onkogenik yang diinduksi oleh ion berat telah dilaporkan oleh beberapa peneliti untuk digunakan dalam mengkaji risiko kesehatan yang diakibatkan oleh paparan radiasi. Bukti dari studi sitogenetik menunjukkan bahwa dosis radiasi terakumulasi selama penerbangan panjang dapat menginduksi peningkatan frekuensi kerusakan kromosom disentrik limfosit perifer.

Pada bagian lain juga dibahas tentang Potensi pemanfaatan biomarker γ -H2AX dalam biodosimetri medis, Keselamatan radiasi pada pasien yang menjalani terapi kanker dengan LINAC energi tinggi. Peran instrumen pencitraan hewan coba pada perkembangan kedokteran nuklir di Indonesia dan Menghadirkan unsur-unsur transuranium dengan teknik transmudasi inti

Akhirnya disampaikan ucapan selamat membaca, semoga apa yang tersaji dalam Buletin ini dapat menambah wawasan yang lebih luas mengenai ilmu dan teknologi nuklir serta menggugah minat para pembaca yang budiman untuk menekuni iptek ini. Jika ada kritik dan saran yang menyangkut tulisan dan redaksional untuk meningkatkan mutu Buletin Alara, akan kami terima dengan senang hati.

redaksi

Buletin ALARA terbit pertama kali pada Bulan Agustus 1997 dan dengan frekuensi terbit 3 kali dalam setahun (Agustus, Desember dan April) ini diharapkan dapat menjadi salah satu sarana informasi, komunikasi dan diskusi di antara para peneliti dan pemerhati masalah keselamatan radiasi dan lingkungan di Indonesia.



IPTEK ILMIAH POPULER

- 51 - 57** Aberasi kromosom metafase dan interfase sel limfosit pada awak penerbangan, suatu kajian awal
Yanti Lusiyanti
- 61 - 68** Biomarker kerusakan sel akibat radiasi pengion di bidang medik
Zubaidah Alatas
- 69 - 73** Potensi pemanfaatan biomarker γ -H2AX dalam biodosimetri medis
Iin Kurnia dan Yanti Lusiyanti
- 75 - 84** Keselamatan radiasi pada pasien yang menjalani terapi kanker dengan LINAC energi tinggi
Hasnel Sofyan

INFORMASI IPTEK

- 87 - 92** Peran instrumen pencitraan hewan coba pada perkembangan kedokteran nuklir di Indonesia
Nur Rahmah Hidayati dan Teja Kisananto
- 93 - 100** Menghadirkan unsur-unsur transuranium dengan teknik transmudasi inti
Mukhlis Akhadi

LAIN - LAIN

- 58** Informasi SERIR-2 & SPERA
- 60** Kontak Pemerhati
- 74** Tata cara penulisan naskah/makalah

Tim Redaksi menerima naskah dan makalah ilmiah semi populer yang berkaitan dengan *Keselamatan radiasi dan keselamatan lingkungan dalam pemanfaatan iptek nuklir untuk kesejahteraan masyarakat*. Sesuai dengan tujuan penerbitan buletin, Tim Redaksi berhak untuk melakukan *editing* atas naskah/makalah yang masuk tanpa mengurangi makna isi. Sangat dihargai apabila pengiriman naskah/makalah disertai dengan CD-nya.

ABERASI KROMOSOM METAFASE DAN INTERFASE SEL LIMFOSIT PADA AWAK PENERBANGAN, SUATU KAJIAN AWAL

Yanti Lusiyanti

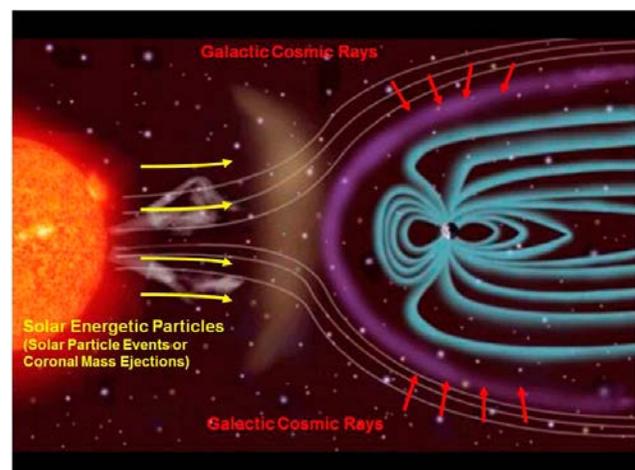
- Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN
Jalan Lebak Bulus Raya 49, Jakarta – 12440
PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070
- k_lusiyanti@batan.go.id

PENDAHULUAN

Selama masa penerbangan di Angkasa, para astronot telah menerima paparan dari radiasi kosmik yang kompleks dari lingkungan yang terdiri dari proton energy tinggi, radiasi padat/mampat (*densely ionizing*), ion berat (*heavy ions*), maupun radiasi sekunder termasuk neutron. Perhatian telah dipusatkan pada efek dari paparan tersebut terhadap induksi kerusakan genetik yang diakibatkan oleh efek tertunda dan ketidakpastian dalam memperkirakan risiko. Telah diketahui bahwa ion berat dengan *linear energy transfer* (LET) tinggi mempunyai *Relative Biological Effectiveness* (RBE) yang lebih besar dibandingkan sinar-X atau sinar gamma untuk semua kerusakan genetik termasuk aberasi kromosom, mutasi, transformasi dan karsinogenesis dari *Galactic cosmic rays* (CGR) atau lebih dikenal sebagai radiasi kosmik, merupakan partikel bermuatan yang memiliki energi mencapai lebih dari 10 eV. Apabila dibandingkan dengan pemercepat partikel buatan manusia yang hanya mampu menghasilkan partikel dengan energi 5×10^{11} eV, maka energi dari GCR ini sangat tinggi. Namun berdasarkan pengamatan oleh beberapa peneliti diketahui bahwa radiasi yang berasal dari luar tata surya tersebut tidak melebihi 10% dan lebih 90 % berasal dari dalam sistem galaksi Bimasakti itu sendiri.

Paparan radiasi yang diterima oleh awak pesawat telah mendapatkan perhatian serius mengingat tingginya paparan radiasi yang diterima untuk setiap kali penerbangan. Komisi

untuk proteksi radiasi *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) merekomendasikan bahwa paparan radiasi kosmik yang diterima para awak pesawat diklasifikasikan sebagai paparan akibat pekerjaan. Paparan radiasi penganon pekerja radiasi direkomendasikan ICRP sebesar 20 mSv/tahun, akan tetapi diperbolehkan menerima 50 mSv dalam setahun tertentu asalkan selama 5 tahun nya tidak melebihi rerata sebesar 20 mSv. Untuk masyarakat umum telah ditetapkan selama 5 tahun dengan rerata sebesar 1 mSv/tahun, sedangkan untuk pekerja radiasi wanita yang hamil direkomendasikan maksimum sebesar 2 mSv dalam satu tahun.



Gambar 1. Ruang antar planet yang menunjukkan kombinasi toksisitas dari galaksi radiasi kosmik (GCR) dan (sebagian besar) radiasi proton karena peristiwa partikel Surya (SPE) (NASA/JPL-Caltech).

Aberasi kromosom telah digunakan dalam mempelajari mekanisme efek radiasi dalam biodosimetri dan sebagai biomarker dalam karsinogenetik. Frekuensi aberasi kromosom dalam sirkulasi limfosit dianggap oleh beberapa peneliti sebagai gold standar sebagai indikator yang realistis dari dosimeter biologi, dan telah digunakan untuk mengetahui akibat paparan radiasi pada kasus kedaruratan dan para astronot yang terpapar pada saat di luar angkasa. Dalam makalah ini dilaporkan kajian terkait efek sitogenetik yang digunakan untuk mengkaji kerusakan kromosom atau aberasi kromosom pada para awak pesawat/astronot.

EFEK BIOMEDIK AKIBAT PAPAN RADIASI RUANG ANGKASA

Risiko kesehatan untuk para awak pesawat ruang angkasa secara umum dilakukan dengan pengukuran dosis fisik menggunakan dosimeter pasif thermoluminescent (TLDs), detektor plastik jejak nuklir (PAEDs). Pengukuran terkait dosis serap fisik belum cukup untuk menginformasikan secara komplit karakteristik dari radiasi yang mampu secara nyata memperkirakan risiko kesehatan. Efek kesehatan jangka pendek dan panjang para astronot terpapar radiasi pengion selama eksplorasi ruang angkasa telah menjadi perhatian yang serius untuk dikaji. Kebanyakan studi untuk mempelajari radiasi LET tinggi yang menginduksi kerusakan kromosom pada sel tahap metaphase yang dikumpulkan pada suatu waktu setelah menerima paparan. Namun demikian setelah paparan LET tinggi kerusakan kromosom dalam interfase secara nyata lebih tinggi dibanding dalam metaphase. Hal ini menandakan adanya perpanjangan mitotik atau penundaan mitotik atau kematian sel interfase.

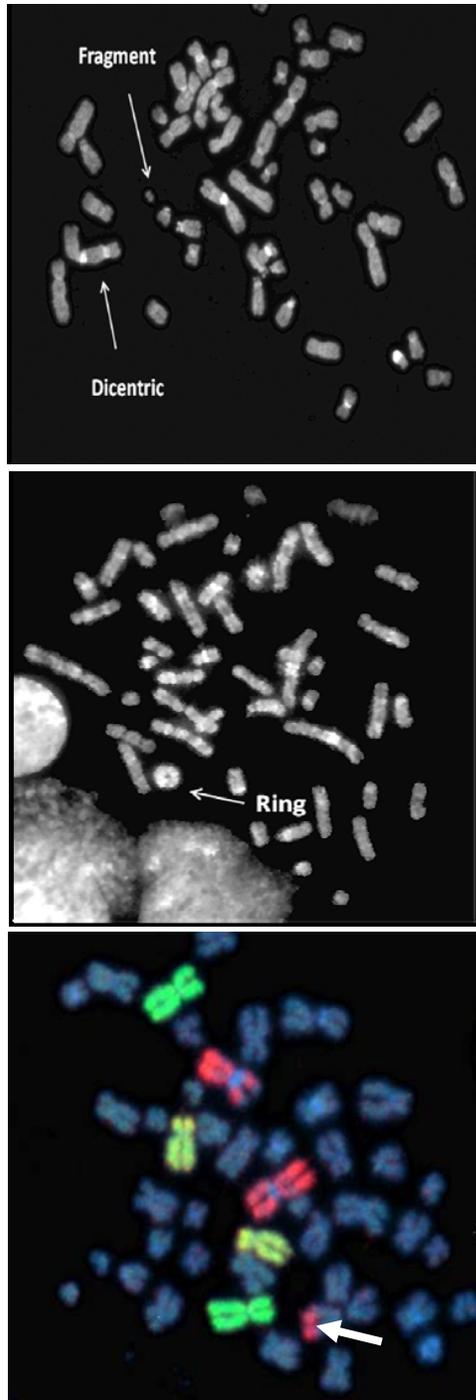
Berdasarkan studi sitotoksitas aberasi kromosom dan transformasi onkogenik yang diinduksi oleh ion berat (*heavy ion*) telah dilaporkan oleh beberapa peneliti untuk digunakan dalam mengkaji risiko kesehatan yang diakibatkan oleh paparan radiasi. Sedangkan implementasi dosimeter biologi berdasarkan parameter yang spesifik terhadap induksi radiasi

yaitu perubahan struktur kromosom yang telah dikenal sebagai aberasi kromosom telah digunakan sebagai biomarker untuk monitoring efek paparan radiasi ruang angkasa. Bukti dari studi sitogenetik menunjukkan bahwa dosis radiasi terakumulasi selama penerbangan panjang dapat menginduksi peningkatan frekuensi kerusakan kromosom disentrik limfosit perifer.

Metode sitogenetik berdasarkan parameter aberasi kromosom pada sel limfosit perifer merupakan indikator yang sensitif terhadap paparan radiasi. Target utama kerusakan yang diakibatkan paparan radiasi pada sel yaitu kerusakan untai tunggal maupun untai ganda DNA. Kerusakan tersebut dapat divisualisasikan sebagai kerusakan kromosom berupa patahan kromosom (fragmen) kromosom disentrik (kromosom dengan dua sentromer), sentrik *rings* (kromosom cincin) dan pertukaran lengan kromosom (kromosom translokasi) (Gambar 2). Kelainan tersebut telah menjadi petunjuk dari kualitas radiasi karena dapat memberikan informasi secara langsung dan berkorelasi dengan risiko kesehatan.

Studi sitogenetik pertama kali dilaporkan pada limfosit darah perifer dari anggota awak anggota yang berpartisipasi dalam misi penerbangan luar angkasa program Gemini dan Mir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kru anggota yang berpartisipasi dalam penerbangan kurang lebih 3 minggu tidak ditemukan adanya kenaikan frekuensi kerusakan kromosom disentrik yang signifikan setelah penerbangan sedangkan pada awak pesawat yang terbang selama 4-6 bulan ditemukan kenaikan frekuensi disentrik yang signifikan setelah penerbangan namun variasi antar individu dilaporkan pula karena beberapa individu tidak menunjukkan peningkatan frekuensi disentrik. Secara umum keberadaan kromosom disentrik memiliki waktu paruh yaitu sekitar tiga tahun dalam limfosit darah perifer manusia, namun baru-baru ini studi menunjukkan variabilitas yang besar antar individu. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan parameter kromosom disentrik untuk analisis biodosimetri

setelah misi berlangsung beberapa bulan atau lebih mungkin tidak dapat diandalkan karena informasi estimasi dosis berdasarkan parameter tersebut tidak memberikan hasil yang akurat.

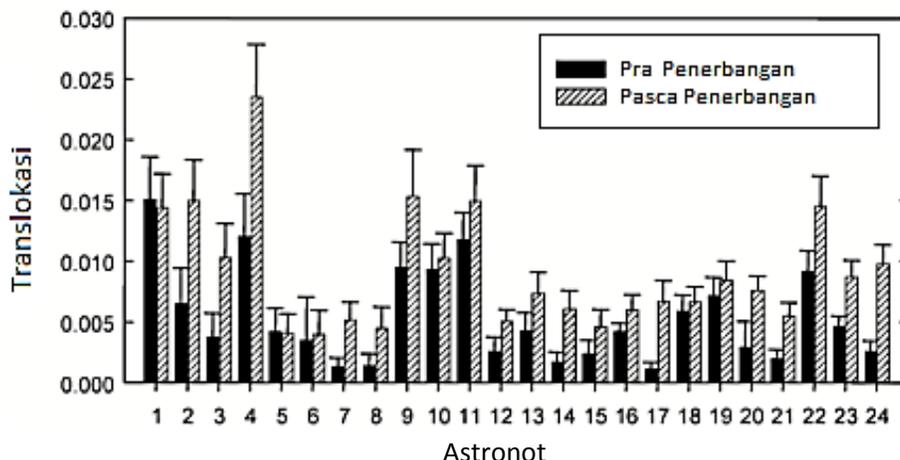


Gambar 2. Visualisasi kerusakan kromosom fragmen disentrik (A) ring (B) dengan metode pewarna Giemsa dan translokasi kromosom nomor 1 dengan teknik FISH (C).

Pengenalan metode *fluoresensi in situ hybridization* (FISH) dengan melakukan pengecatan pada kromosom tertentu dapat mempermudah melakukan pemeriksaan terhadap kerusakan kromosom tipe translokasi. Pada Gambar 3 diperlihatkan variasi individu berbasis frekuensi translokasi pada para sampel darah astronot yang terukur sebelum dan setelah penerbangan. Tipe kelainan kromosom selanjutnya dikenal dengan kelainan kromosom yang bersifat stabil karena memiliki probabilitas lebih tinggi untuk bertahan hidup pada sel darah perifer selama bertahun-tahun. Hal ini menunjukkan bahwa analisis translokasi dapat menjadi indikator yang lebih tepat daripada analisis disentrik untuk menilai efek kronis paparan radiasi seperti yang ditemui selama misi penerbangan jangka panjang, yang dikenal dengan retrospektif. Terjadinya perpindahan kromosom khususnya translokasi secara positif berkorelasi dengan berbagai macam kanker dan translokasi ini selanjutnya dapat dijadikan sebagai biomarker dari risiko kanker yang diakibatkan oleh paparan radiasi.

Pada Tabel 1 diperlihatkan hasil penelitian pada 10 astronot yang diambil sampel darahnya untuk dilakukan pemeriksaan kromosom disentrik dan translokasi kromosom sebelum melakukan perjalanan luar angkasa dan setelah melakukan perjalanan. Terlihat bahwa frekuensi disentrik mengalami kenaikan pasca penerbangan, sedangkan untuk translokasi maupun inversi secara statistic tidak menunjukkan kenaikan yang significant. Namun sampel responden masih terlalu sedikit untuk studi ini dibandingkan dengan penelitian sebelumnya

Hasil penelitian analisis sitogenetik dari limfosit astronot dari 7 awak pesawat setelah melakukan perjalanan selama 3 minggu hingga 6 bulan. Pada perjalanan 2 sampai 3 minggu hasil pemeriksaan kromosom disentrik tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan control, hal ini menunjukkan bahwa penerimaan dosis pada awak pesawat selama penerbangan jangka pendek masih di bawah level dosis ambang untuk sitogenetik (20



Gambar 3. Frekuensi kromosom translokasi yang terukur pada sampel darah astronot yang disampling sebelum dan setelah penerbangan pada 24 individu.

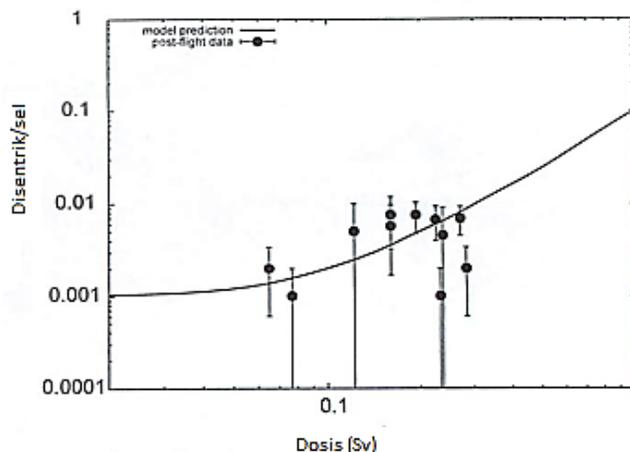
Tabel 1. Data frekuensi aberasi kromosom pada sampel darah astronot.

Sampel	Disentrik/sel*	Translokasi/sel*	Inversi/sel pada kromosom no 5
Pra-Penerbangan	0 ± 00037	0,0025 ± 0,0047	0 ± 0,0056
Pasca-Penerbangan	0,0006 ± 0,0010	0,0031 ± 0,0059	0 ± 0,0031

mGy). Namun pada perjalanan selama 6 bulan terjadi kenaikan frekuensi disentrik pada beberapa awak pesawat.

Implementasi biodosimetri berdasarkan parameter frekwensi aberasi kromosom telah banyak dilaporkan oleh beberapa peneliti dalam memprediksi dosis dengan menggunakan kurva kalibrasi pra-penerbangan pada individu dan sampel darah yang disampling beberapa hari setelah kembali ke bumi, menunjukkan bahwa frekuensi aberasi kromosom disentrik masih dalam kisaran yang setara dengan dosimeter fisik. Beberapa pendekatan penelitian yang lain juga dipelajari dengan menggunakan model prediksi dengan membandingkan berbagai data berdasarkan parameter aberasi kromosom dari metode Giemsa untuk kromosom disentrik dan metode FISH untuk kromosom translokasi. Hasil penelitian menunjukkan adanya hasil yang baik antara kurva respon dosis yang diperoleh dengan model simulasi Monte Carlo untuk aberasi kromosom disentrik/sel yang diinduksi sinar gamma dibandingkan dengan kromosom disentrik yang teramati pada sampel darah limfosit astronot

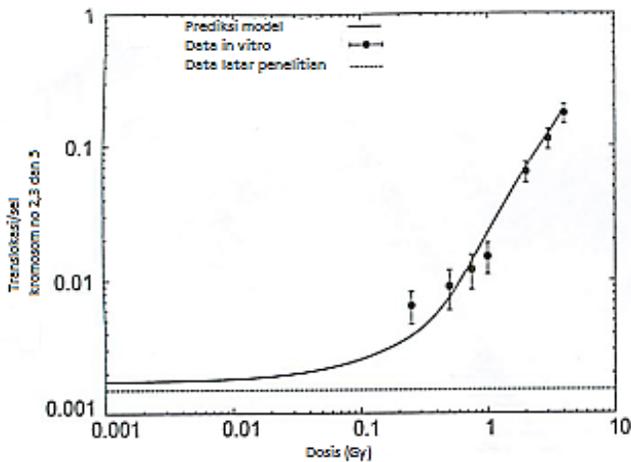
yang diambil setelah penerbangan pertama (Gambar 4).



Gambar 4. Frekuensi rerata kromosom disentrik per sel pada beberapa sampel limfosit astronot sebagai fungsi dosis ekuivalent untuk sinar gamma menggunakan simulasi Monte Carlo.

Sedangkan prediksi respon dosis yang diperoleh dengan parameter translokasi kromosom no 2, 3 dan 5 pasca irradiasi sinar gamma juga dilakukan. Prediksi dengan menggunakan model Monte Carlo dibandingkan dengan data hasil penelitian *in-vitro* dari sampel

limfosit astronot yang diiradisi sinar gamma ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Prediksi dan pengukuran respon translokasi resiprokal/sel yang melibatkan kromosom no 2, 3 dan 5 dengan menggunakan simulasi Monte Carlo.

Peneliti lainnya telah menggunakan teknik pengecatan kromosom untuk mempelajari kerusakan kromosom translokasi pada sel darah limfosit perifer dari 6 astronot yang telah terbang selama 3 bulan dan 2 awak pesawat yang bertugas pada misi antar jemput 10 hari yang diambil sampel darahnya menunjukkan hasil peningkatan frekuensi kerusakan kromosom terdeteksi di semua anggota awak, serta tidak ada perubahan signifikan terdeteksi pada awak pada misi ulang-alik pendek. Sedangkan hasil prediksi dosis dengan menggunakan preflight in vitro menggunakan kurva dosis-respons translokasi untuk sinar gamma menunjukkan hasil yang bervariasi antara individu. Perkiraan dosis dari 31-166 mGy, tergantung pada individual, dan nilai ini kira-kira berkorelasi dengan pengukuran dosis fisik.

VARIABILITAS RESPON ADAPTIF PADA INDIVIDU

Makhluk hidup yang terkena berbagai kerusakan DNA secara alamiah terjadi karena paparan radiasi UV, alkilasi atau oksidator dan panas, adaptasi respon yang terbentuk terjadi karena adanya induksi dan membuat mereka resisten terhadap zat mutagenik. Telah banyak

dilaporkan bahwa di atas tingkat paparan radiasi latar dapat menginduksi respon adaptif dalam limfosit manusia. Dari sampel biakan limfosit penduduk daerah dengan radiasi alam tingkat tinggi di Ramsar, Iran, yang diiradisi sinar gamma pada dosis 1,5 Gy menunjukkan kelainan kromosom lebih sedikit dibandingkan kelompok kontrol. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian pada daerah radiasi latar tinggi, dilaporkan bahwa respon radioadaptif mungkin memiliki implikasi dalam pengkajian risiko radiasi dan proteksi radiasi. Studi juga telah membuka cakrawala dalam proteksi radiasi terhadap tingginya tingkat paparan radiasi kosmik pada perjalanan ruang angkasa jangka panjang.

Studi respon adaptif pada sel manusia yang diakibatkan oleh proton dan ion berat yang termasuk LET tinggi menunjukkan bahwa dosis yang sangat rendah akibat paparan radiasi elektromagnetik pengan atau neutron dapat menginduksi mekanisme sensitifitas sel terhadap panas yang dapat menginduksi efek merugikan. Dari data efek sitogenetik menunjukkan bahwa paparan radiasi ruang angkasa telah terbukti mampu menginduksi kerusakan yang signifikan pada sel. Secara umum diyakini bahwa kehadiran respon adaptif tidak berarti bahwa radiasi dosis rendah adalah menguntungkan untuk organisme hidup. Setelah publikasi hasil awal pada kehadiran respon adaptif pada penduduk daerah radiasi latar belakang tinggi Ramsar, beberapa ilmuwan melaporkan bahwa respons adaptif mungkin memiliki implikasi yang cukup besar dalam proteksi radiasi. Percobaan awal menunjukkan bahwa neutron belum menunjukkan respon yang dapat menginduksi respon adaptif dalam limfosit manusia.

Pada hasil penelitian lain dinyatakan respon radioadaptif yang sangat kecil dalam limfosit manusia yang telah dibiakkan. Hal ini dilaporkan karena adanya variabilitas antar individu terhadap induksi respon adaptif terhadap radiasi. Dalam beberapa kasus, respon adaptif dalam donor bervariasi dengan waktu, beberapa faktor fisiologis maupun genetik mungkin berkontribusi terhadap variabilitas respon radioadaptif. Hasil

Tabel 2. Frekuensi aberasi kromosom pada limfosit manusia pasca irradiasi 150 kVpX-ray pada dosis adaptasi 5 cGy dan dosisantang 2 Gy.

Donor	Aberasi kromosom/Sel*			
	Dn1	Dn2	Dn3	Dn4
Aberasi kromosom yang teramati	0,6	0,45	0,46	0,62
Aberasi kromosom yang diharapkan	0,32	0,60	0,62	0,78
p-Value	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05
Respon	Synergistik	Adaptive	Adaptive	Adaptive
k-Value	1,86	0,75	0,74	0,79

*400 Sel metafase

penelitian terkait respon adaptif pada donor yang sehat yang tidak menunjukkan respon radioadaptif namun kadang-kadang menunjukkan respon sinergis setelah mendapat paparan dosis adaptif. Dalam penelitian lebih lanjut telah dipelajari apakah kurangnya respon adaptif dan induksi efek sinergis ini adalah fenomena yang permanen. Beberapa penelitian untuk menguji apakah kurangnya respon adaptif dan induksi efek sinergis ini adalah fenomena permanen telah dilakukan untuk mengetahui variabilitas respon radioadaptif pada individu dengan menggunakan parameter kelainan kromosom berdasarkan kelainan kromatid dan frekuensi mikronuklei dalam sel binukleat.

Pada Tabel 2 diperlihatkan frekuensi kelainan kromatid yang diperoleh dari limfosit 4 donor yang sehat yang diberi perlakuan radiasi dengan dosis adaptif (*radioadaptif*) 5 cGy dan dosisantang (*challenging dose*) 2 Gy. Hasil penelitian menunjukkan pada donor pertama teramati efek sinergis yang signifikan ($p < 0,01$) sementara tiga donor lainnya menunjukkan respon radioadaptif yang signifikan ($p < 0,05$). Nilai K-responden yang merupakan koefisien untuk induksi respon adaptif berkisar antara 0,74 - 0,79, yang menunjukkan variabilitas yang cukup besar dalam besarnya respon induksi radioadaptif antara individu.

Sedangkan untuk frekuensi mikronuklei dilaporkan bahwa untuk non responder tidak menunjukkan respon radioadaptif tapi menunjukkan efek sinergistik ($p < 0,001$). Sedangkan diantara tiga donor kontrol, dua individu menunjukkan respon radioadaptif yang signifikan ($P < 0,005$). Salah satu dari mereka juga

telah menunjukkan respon radioadaptif yang signifikan untuk aberasi kromatid. Hal ini menunjukkan bahwa pengamatan mikronuklei dengan uji blok sitokinesis merupakan teknik yang perlu diaplikasikan dalam penelitian epidemiologi terkait survei respon radioadaptif untuk populasi sampel dalam skala besar.

PENUTUP

Paparan radiasi kosmik dalam penerbangan misi ruang angkasa melibatkan paparan medan radiasi heterogen yang didominasi oleh pengaruh latar belakang radiasi LET rendah, dikombinasikan dengan fluens/aliran yang lebih rendah dari radiasi LET tinggi. Kerusakan kromosom dalam limfosit darah para awak pesawat angkasa telah menjadi biomarker kerusakan tingkat sel yang diakibatkan oleh penerimaan paparan radiasi ruang angkasa. Data respon adaptasi radiasi untuk kelainan kromosom akibat paparan ruang angkasa menunjukkan variabilitas yang tinggi antar individu. Diantara faktor yang mempengaruhi adalah faktor fisiologi dan konstitusi genetik. Penelitian dasar perlu terus dikembangkan dan dipelajari untuk mengkaji relevansi dari efek biologis yang diakibatkan oleh paparan radiasi kosmik untuk mengkaji risiko kesehatan para kru pesawat dan astronot.

DAFTAR PUSTAKA

BILSKI, P., PAWEL, O., HORWACIK, T., Air Crew Exposure to Cosmic Radiation on Board of Polish Passenger Aircraft, *Nukleonika*, 49 (2), 77-83, 2004.
 CHANCELLOR, J.C., SCOTT, G.B.I., SUTTON, J.P., Space radiation: the number one risk to astronaut health beyond low earth orbit, *Life*, 4, 491-510, 2014.

- CUCINOTTA, F.A., DURANTE, M., Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings, *Lancet Oncology*, 7, 431-435, 2006.
- DURANTE, M., BONASSI, S., GEORGE, K. and CUCINOTTA, F.A., Risk estimation based on chromosomal aberrations induced by radiation, *Radiation Research*, 156, 662-667, 2001.
- DURANTE, M., CUCINOTTA, F.A., Heavy ion carcinogenesis and human space exploration, *Nat. Rev. Cancer*, 8, 465-472, 2008.
- DURANTE M., MANTI, L., Human response to high-background radiation environments on Earth and in space, *Advances in Space Research*, 42, 999-1007, 2008.
- BLAKELY, E.A., Biological effects of cosmic radiation: deterministic and stochastic, *Health Physics*, 79(5), 495-506, 2000.
- BONASSI, S., HAGMAR, L., STROMBERG, U., HUICIMONTAGUD, A., TIMMERBERG, H., FORNI, A., HEIKKILA, P., WANDERS, S. and NORPPA, H. for the European Study Group on Cytogenetic Biomarkers and Health (ESCH), Chromosomal aberrations in lymphocytes predict human cancer independently of exposure to carcinogens, *Cancer Research*, 60, 1619-1625, 2000.
- GEORGE, K., CUCINOTTA, F.A., Biological dosimetry in astronauts, *Iran. J Radiat. Res.*, 1(1), 55-61, 2003.
- GEORGE, K., RHONE, J., BEITMAN, A., CUCINOTTA F.A., Cytogenetic damage in the blood lymphocytes of astronauts: Effects of repeat long-duration space missions, *Mutation Research*, 756, 165-169, 2013.
- ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60 *Annals of ICRP* 21, 1991.
- KAWATA, T., DURANTE, M., FURUSAWA, Y., GEORGE, K., TAKAI, N., WU, H., CUCINOTTA, F.A., Chromosome aberration induced by high-LET radiations, *Biological Science in Space*, 18(4), 216-223, 2004
- MORTAZAVI, S.M.J., IKUSHIMA, T., MOZDARANI, H., Variability of chromosomal radioadaptive response in human lymphocytes *Iran. J. Radat. Res.*, 1(1), 55-61, 2003.
- NAKAMURA, N., SUYAMA, A., NODA, A., KODAMA, Y., Radiation effects on human heredity, *Annu. Rev. Genet.*, 47, 33-50, 2013.
- TAWN, E.J., Hereditary effects of radiation, UNSCEAR 2001 report to the general assembly, with scientific annex, *J. Radiol. Prot.*, 22, 121, 2002