

**WIDYA BIOLOGI**

**PAPARAN UNSUR RADIOAKTIF DALAM MENINGKATKAN  
PENYAKIT SINDROM RADIASI AKUT (ARS): ULASAN NARATIF**

**EXPOSURE TO RADIOACTIVE ELEMENTS IN INCREASING  
ACUTE RADIATION SYNDROME (ARS): A NARRATIVE REVIEW**

Indria Ariastuti, I Made Dwi Mertha Adnyana\*, I Wayan Wahyudi, Ni Luh Putu Ari  
Sundari, Ida Ayu Gede Winda Savitri, Gusti Ayu Putu Wahyu Purnama Dewi,  
Pande Komang Aditya Ryan Nuartha

Program Studi Biologi, Fakultas Teknologi Informasi dan Sains, Universitas Hindu  
Indonesia

\*Email: dwikmertha13@gmail.com

---

**ABSTRAK**

*Paparan unsur radioaktif telah mengakibatkan peningkatan kejadian sindrom radiasi akut (ARS). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan ulasan komprehensif berkaitan dengan paparan unsur radioaktif dalam meningkatkan kejadian sindrom radiasi akut. ARS adalah penyakit radiasi pengion dosis tinggi yang mengakibatkan toksikokinetik dalam waktu singkat. Terjadinya ARS diperantarai oleh paparan unsur radioaktif seperti partikel alfa, beta, proton, neutron dan gamma. Partikel yang terakumulasi di dalam tubuh akan melewati lima tahapan utama yakni paparan awal radiasi pengion tingkat tinggi, tahap prodromal, tahap laten, tahap manifest yang disertai sindrom hematopoietik, sindrom gastrointestinal, sindrom serebrovaskular dan diakhiri oleh tahap pemulihan atau kematian. Mekanisme kerusakan sel terjadi akibat proses ionisasi langsung yang meningkatkan akumulasi radikal bebas dan berimplikasi pada kerusakan genetik dan kematian sel. Kerusakan DNA terjadi pemutusan single-strand breaksi (SSB), kerusakan pada double-strand breaks serta adanya DNA Cross-Linking menyebabkan kematian sel secara parsial maupun simultan. Selain itu, radiasi pengion berdampak terhadap kinerja saraf melalui pelepasan molekul pro-inflamasi dan aktivasi sel kekebalan yang mengakibatkan adanya bencana mitotik yang mengarah pada komplikasi sekunder berupa infeksi, kegagalan multi-organ, dan kematian. Tingkat keparahan ARS tergantung pada faktor-faktor seperti dosis radiasi, durasi paparan, jenis radiasi, dan sensitivitas individu. Memahami mekanisme yang mendasari hubungan antara elemen radioaktif dan ARS sangat penting untuk merancang strategi manajemen yang efektif di masa depan.*

**Kata kunci:** Sindrom Radiasi Akut, Pengion, Unsur Radioaktif, Bioradiasi, Non-iradiasi.

**ABSTRACT**

*Exposure to radioactive elements has resulted in an increased incidence of acute radiation syndrome (ARS). This study aims to provide a comprehensive review regarding exposure to radioactive elements in increasing the incidence of acute radiation syndrome. ARS is a high-dose ionizing radiation disease that causes short-term toxicokinetics. The occurrence of*

## WIDYA BIOLOGI

*ARS is mediated by exposure to radioactive elements such as alpha, beta, protons, neutrons and gamma particles. Particles that accumulate in the body will go through five main stages, namely initial exposure to high levels of ionizing radiation, prodromal stage, latent stage, manifest stage accompanied by hematopoietic syndrome, gastrointestinal syndrome, cerebrovascular syndrome and ending with the recovery or death stage. The mechanism of cell damage occurs due to a direct ionization process which increases the accumulation of free radicals and has implications for genetic damage and cell death. DNA damage occurs when single-strand breaks (SSB), damage to double-strand breaks and DNA cross-linking causes partial or simultaneous cell death. In addition, ionizing radiation impacts nerve performance through the release of pro-inflammatory molecules and activation of immune cells resulting in a mitotic catastrophe that leads to secondary complications in the form of infection, multi-organ failure, and death. The severity of ARS depends on factors such as radiation dose, duration of exposure, type of radiation, and individual sensitivity. Understanding the mechanisms underlying the relationship between radioactive elements and ARS is critical for designing effective management strategies in the future.*

**Keywords:** *acute radiation syndrome, ionizing, radioactive elements, bioradiation, non-irradiation.*

### PENDAHULUAN

Sindrom Radiasi Akut atau *acute radiation syndrome disease* (ARS) menjadi salah satu penyakit radiasi atau toksisitas radiasi yang menunjukkan kumpulan gejala parah akibat paparan radiasi pengion dosis tinggi dalam jangka waktu singkat (Stenke et al., 2022). ARS ini merupakan konsekuensi dari dampak buruk radiasi pengion pada tubuh manusia, mempengaruhi berbagai sistem organ dan berpotensi menyebabkan kegagalan multi-organ dan kematian. Paparan radiasi terjadi melalui berbagai sumber seperti kecelakaan nuklir, kecelakaan industri, prosedur medis, atau tindakan disengaja yang melibatkan bahan radioaktif. Efek buruk radiasi pada jaringan dan organ manusia berasal dari kemampuannya mengionisasi atom dan molekul,

menyebabkan kerusakan sel melalui kerusakan DNA langsung, pembentukan radikal bebas, dan gangguan fungsi sel. Kerusakan ini menyebar melalui sistem biologis yang mampu memicu serangkaian peristiwa yang bermanifestasi sebagai ARS dalam jangka panjang (Dörr and Meineke, 2011; Smart, 2017).

Dalam beberapa kasus yang telah dilaporkan, setelah terpapar radiasi pengion efek langsung sering terlihat pada jaringan yang sangat berproliferasi ini termasuk sumsum tulang, saluran pencernaan, dan kulit (Dainiak and Albanese, 2022a; Stenke et al., 2022). Tingkat keparahan ARS bergantung pada beberapa faktor, seperti dosis radiasi, durasi paparan, jenis radiasi, dan variasi sensitivitas individu disertai dengan fase

## WIDYA BIOLOGI

yang menyertai diantaranya fase prodromal yang ditandai dengan mual, muntah, malaise, dan kelemahan, biasanya muncul dalam beberapa jam hingga beberapa hari setelah paparan yang mencerminkan dampak awal pada sel-sel yang membelah dengan cepat dalam tubuh. Fase berikutnya mencakup fase laten di mana individu mungkin menunjukkan pemulihan yang nyata diikuti oleh fase penyakit nyata yang ditandai dengan timbulnya gejala parah seiring dengan terlihatnya kerusakan pada organ penting secara klinis (Garau et al., 2011; Sharifi et al., 2022).

Hingga saat ini, paparan unsur radioaktif telah menjadi perhatian dalam beberapa tahun terakhir karena meningkatnya insiden penyakit ARS di seluruh dunia. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa paparan elemen radioaktif dapat menyebabkan perkembangan ARS, tetapi mekanisme yang mendasari hubungan ini belum dipahami dengan baik. Memahami mekanisme paparan unsur radioaktif berkontribusi terhadap perkembangan dan perkembangan ARS adalah hal yang sangat penting dalam memahami patofisiologinya dan merancang strategi pengelolaan yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan ulasan komprehensif berkaitan dengan paparan unsur radioaktif

dalam meningkatkan kejadian sindrom radiasi akut. Harapannya, melalui informasi ini dapat memberikan pengetahuan baru terkait dengan bahaya yang ditimbulkan dari unsur radioaktif dalam kaitannya dengan kejadian penyakit ARS termasuk upaya pencegahan dan pengendalian di dunia industri untuk meminimalisir dampak buruk yang dihasilkan.

## PEMBAHASAN

### **Radiasi, tipe dan ukuran**

Radiasi didefinisikan sebagai transmisi atau emisi energi melalui ruang atau benda sebagai partikel berkecepatan tinggi dan/atau gelombang elektromagnetik yang mampu mengakibatkan kerusakan dalam jangka panjang. Radiasi dapat berupa ionisasi atau nonionisasi. Bahan radioaktif yang mengeluarkan radiasi pengion dan dapat diukur dalam satuan *sieverts* (Sv) (Bazyka et al., 2019). Pada radiasi pengion memiliki energi yang cukup untuk menggantikan elektron, sehingga menciptakan partikel bermuatan (misalnya ion). Radiasi ini dilepaskan oleh atom tidak stabil yang memiliki kelebihan energi, massa, atau keduanya yang mengeluarkan kelebihan energi tersebut untuk menjadi stabil. Radiasi pengion memiliki panjang gelombang yang sangat pendek, mulai dari

## WIDYA BIOLOGI

nanometer hingga sepersepjuta meter ( $10^{-12}$ ). Ini mencakup radiasi ultraviolet (UV) frekuensi tinggi, sinar-X, sinar gamma, dan radiasi pengion partikulat (misalnya, partikel alfa, beta, neutron, proton dan gamma) (Smart, 2017).

Pada radiasi non- ionisasi memiliki energi yang cukup untuk menggerakkan atau menggetarkan atom, namun tidak memiliki energi untuk memindahkan elektron dari orbitnya. Radiasi nonionisasi memiliki panjang gelombang yang panjang atau sangat panjang, berkisar dari sepersekian mikrometer hingga jutaan meter, dan mencakup gelombang radio, gelombang mikro, cahaya inframerah, dan bagian spektrum elektromagnetik yang terlihat ke dalam rentang sinar UV. Radiasi nonionisasi tidak menembus jaringan, tidak menimbulkan risiko kontaminasi, dan mudah dilindungi oleh tabir surya.

Radiasi dapat dinyatakan sebagai aktivitas dan radiasi yang diserap dalam jaringan biologis. Radiasi dapat terjadi bergantung aktivitas yang mengacu pada jumlah peluruhan atom per satuan waktu. Satu *becquerel* (Bq) yang merupakan ukuran dalam SI atau sama dengan jumlah bahan yang mengalami 1 peluruhan/detik (dps). Bq telah menggantikan istilah *curie* (Ci), yaitu jumlah bahan radioaktif yang mengalami

$3,7 \times 10^{10}$  dps; 1 mCi sama dengan 37 MBq. Untuk dapat menghasilkan radiasi diperlukan laju dosis yang mengacu pada jumlah radiasi yang diberikan per satuan waktu. *Gray* (Gy) didefinisikan sebagai penyerapan satu joule/kg dalam SI. Istilah SI Gy telah menggantikan dosis radiasi yang diserap (rad); 1 Gy sama dengan 100 rad. Terakhir, timbulnya efek paparan ditentukan menggunakan setara dosis yakni laju dosis yang diserap dan faktor bobot yang mencerminkan efektivitas biologis relatif (rbe) dari berbagai sumber radiasi pengion pada jaringan. Istilah SI Sievert (Sv) telah menggantikan ekuivalen roentgen pada manusia (rem); 1 Sv sama dengan 100 rem (Garau et al., 2011).

### Sindrom Radiasi Akut

Paparan radiasi pengion yang berkepanjangan atau signifikan dapat mengakibatkan sindrom radiasi akut (ARS). Kejadian ARS dapat muncul akibat paparan radiasi pengion dosis tinggi seperti uranium, plutonium, dan cesium yang memancarkan radiasi pengion dan memicu kerusakan sel dan jaringan dalam tubuh. Sindrom radiasi akut adalah istilah luas yang digunakan untuk menggambarkan serangkaian tanda dan gejala yang mencerminkan kerusakan parah pada sistem organ tertentu dan dapat menyebabkan kematian dalam beberapa

## WIDYA BIOLOGI

menit, jam atau hingga beberapa bulan setelah terpapar (Dainiak, 2018; Garau et al., 2011). Unsur radioaktif yang mampu memancarkan radiasi pengion antara lain partikel alfa, beta, dan gamma serta radiasi neutron. Partikel alfa terdiri dari dua proton dan dua neutron yang memiliki kemampuan penetrasi yang rendah namun potensi pengionnya tinggi sehingga sangat berbahaya apabila terinternalisasi melalui inhalasi dan konsumsi bahan yang terkontaminasi. Partikel beta, elektron yang dipancarkan dari inti selama peluruhan radioaktif, dapat menembus beberapa milimeter ke dalam jaringan manusia, menyebabkan kerusakan terutama melalui ionisasi langsung (Kazzi, 2016). Radiasi gamma yang terdiri dari foton berenergi tinggi, menunjukkan penetrasi yang unggul namun memerlukan perlindungan yang besar dan menimbulkan ancaman yang signifikan terhadap organisme hidup apabila terpapar sedangkan pada radiasi neutron meskipun kurang umum, dapat menyebabkan kerusakan biologis yang parah karena sifatnya sangat mampu menembus dan meningkatkan kemampuannya untuk mengganggu inti atom yang berdampak sebagai zat radioaktif yang lebih masif mengakibatkan gangguan daripada tiga

partikel lainnya (Clements and Casani, 2016).

### Epidemiologi

Data epidemiologi global yang komprehensif mengenai ARS masih tergolong terbatas. Kejadian ARS secara keseluruhan relatif rendah dibandingkan dengan kondisi kesehatan lainnya. Secara historis, kasus ARS sebagian besar terjadi di kalangan pekerja di industri yang melibatkan radiasi, seperti pembangkit listrik tenaga nuklir, departemen radiologi, dan produksi senjata nuklir. Insiden-insiden ini relatif jarang terjadi namun menimbulkan dampak yang signifikan bagi individu yang terkena dampak. Kecelakaan nuklir tingkat tinggi seperti bencana Chernobyl pada tahun 1986 dan bencana nuklir Fukushima Daiichi pada tahun 2011, telah menyebabkan sejumlah besar kasus ARS. Berdasarkan kejadian di Ukraina, sebanyak 237 orang didiagnosa menderita sindrom paparan radiasi akut, namun hanya 134 kasus yang dikonfirmasi. Akibat paparan radiasi gamma dan beta pada seluruh tubuh, 28 pasien meninggal dengan luka bakar pada kulit menyeluruh (Mettler et al., 2007).

Determinan yang mempengaruhi efek kesehatan akut setelah terpapar radiasi, seperti kualitas radiasi, frekuensi paparan, laju dosis, dan paparan radiasi

## WIDYA BIOLOGI

sebagian atau seluruh tubuh, proses biologis seperti radiosensitivitas, siklus sel, dan oksigenasi yang mempengaruhi efek akut. Penelitian terbaru oleh Bazyka et al. (2018) menyebutkan ARS telah dirasakan oleh pekerja pembersihan Chornobyl selama 30 tahun setelah kecelakaan nuklir tersebut. Dari 110.645 pekerja yang dilakukan pengamatan dampak radiasi Chornobyl diperoleh penyakit kanker dan leukemia serta penyakit kardiovaskular merupakan penyebab utama kematian di antara penyintas sindrom radiasi akut. Selain itu, temuan menunjukkan terdapat peningkatan yang signifikan pada kejadian multiple myeloma [*standardized incidence rate* (SIR) 1,61%, confidence interval 95% (CI) 1,01-2,21], kanker tiroid (SIR 4,18, 95% CI 3,76-4,59), kanker payudara wanita (SIR 1,57 CI 1,40-1,73), dan semua jenis kanker yang digabungkan (SIR 1,07; 95% CI 1,05-1,09). Prevalensi yang tinggi ditunjukkan untuk penyakit jantung dan pembuluh darah dan perubahan kesehatan mental secara berkepanjangan.

Penelitian Sharifi et al. (2022) mengevaluasi kontaminasi radioaktif yang meluas jika terjadi kecelakaan nuklir selama perang Ukraina, namun tingkat dan arah dampaknya akan bergantung pada waktu terjadinya kecelakaan. Sindrom radiasi akut (ARS) dapat terjadi dalam 30

km<sup>2</sup> di sekitar pembangkit yang meledak yang mengakibatkan kematian terutama karena cedera kulit yang signifikan dan kegagalan sumsum tulang. Berdasarkan pemetaan dan perubahan gerakan kontaminasi zat radiokatif negara – negara Eropa tengah, utara, selatan, dan tenggara, sebagian Timur Tengah, Asia utara, dan bahkan Afrika Utara berpotensi menerima paparan radiasi nuklir yang berisiko mengakibatkan ARS. Data epidemiologi berkaitan dengan kejadian ARS di seluruh negara harus dilaporkan untuk memitigasi dampak yang ditimbulkan di masa depan.

### **Etiologi dan Toksikokinetik**

Sindrom radiasi akut dapat terjadi akibat paparan langsung atau kontaminasi bahan radioaktif dalam waktu singkat maupun jangka panjang. Paparan langsung dapat disebabkan oleh ledakan nuklir, sedangkan kontaminasi dapat disebabkan oleh konsumsi makanan, air, dan kontak kulit yang terkontaminasi nuklir dengan bahan radioaktif. Etiologi sindrom radiasi akut melibatkan efek biologis akibat paparan radiasi pengion dosis tinggi. Terdapat berbagai partikel radioaktif yang mampu mengakibatkan ARS ini mencakup partikel alfa, beta, proton, neutron dan gamma) (V.K. Singh and Seed, 2022). Jenis radiasi ini mempunyai kemampuan yang berbeda-beda untuk menembus

## WIDYA BIOLOGI

jaringan dan menyebabkan kerusakan, dan beberapa diantaranya memiliki efek yang lebih besar pada organ atau jaringan tertentu dibandingkan yang lain.

Tingkat keparahan ARS bergantung oleh jumlah radiasi pengion yang masuk kedalam tubuh. Secara toksikokinetik, partikel penyebab ARS terbagi menjadi lima diantaranya: a) Partikel alfa, yakni inti helium (yaitu dua proton dan dua neutron) yang elektronnya telah dilepaskan. Partikel ini memiliki massa atom empat dalton (Da). Partikel alfa tidak menembus pakaian, kulit, atau kertas, namun berbahaya jika tertelan atau terhirup; b) partikel beta yakni elektron dengan muatan listrik  $-1$  dan massa atom  $1/2000$  <sup>massa</sup> proton atau neutron (Reindl et al., 2023). Kemudian, partikel neutron yakni partikel yang bermassa satu Da, namun bersifat netral secara listrik sehingga memungkinkan penetrasi yang dilakukan ke dalam jaringan; c) partikel neutron dipancarkan hanya setelah ledakan nuklir terjadi dan diperantarai oleh benda atau ruang disekitarnya; d) Pada partikel proton menjadi komponen dari semua inti yang memiliki muatan listrik  $+1$  dan massa satu Da. Jumlah proton inti setara dengan nomor atom suatu atom karena massanya yang tinggi (yaitu hampir 2000 kali lebih besar dari massa elektron); e) partikel

gamma yakni energi elektromagnetik murni yang diukur sebagai foton dan tidak memiliki massa atau muatan listrik. Sinar-X pada umumnya mempunyai panjang gelombang yang lebih panjang dibandingkan sinar gamma, namun tidak ada definisi umum yang membedakan sinar-X dengan sinar gamma. Sinar-X umumnya dipancarkan oleh elektron, bukan oleh inti atom, sedangkan sinar gamma dapat dilepaskan dari inti atom (Hollingsworth et al., 2021).

### Patofisiologi

Perjalanan terjadinya ARS melibatkan berbagai tahapan mulai dari proses paparan unsur radioaktif hingga menimbulkan sindrom klasik yang turut memicu terjadinya ARS. Patofisiologi ARS diawali dengan adanya paparan awal radiasi pengion tingkat tinggi yang merusak sel-sel tubuh, terutama sel-sel dengan tingkat proliferasi tinggi seperti sumsum tulang, saluran pencernaan, dan sel-sel kulit. Kemudian, berkembang menjadi tahap prodromal (0 hingga 2 hari setelah terpapar) yang terjadi dalam beberapa jam hingga beberapa hari setelah paparan. Gejala yang muncul seperti mual, muntah, diare, kelelahan, demam, dan sakit kepala. Tingkat keparahan gejala ini bergantung pada dosis radiasi yang

## WIDYA BIOLOGI

diterima dan masuk kedalam jaringan kulit. Apabila ini berlanjut maka masuk kedalam tahap laten (2 hingga 20 hari setelah paparan) ini umumnya individu yang terpapar tampak pulih, ini dapat berlangsung selama beberapa jam hingga beberapa minggu, tergantung dosis radiasi (Singh and Seed, 2022).

Setelah tahap ini memasuki tahap terjadinya penyakit yang dikenal dengan tahap manifes (21 hingga 60 hari setelah paparan) yang disertai adanya gejala berdasarkan sistem spesifik yang terkena radiasi ini mencakup: a) Sindrom hematopoietik, radiasi dosis tinggi mempengaruhi sumsum tulang, menyebabkan penurunan produksi sel darah (pansitopenia). Hal ini mengakibatkan anemia, peningkatan kerentanan terhadap infeksi (akibat penurunan sel darah putih), dan kecenderungan pendarahan (akibat penurunan trombosit). Dosis yang menghasilkan timbulnya gejala ini diantara 0,7 dan 10 Gy (70 – 1000 rad) meskipun gejala ringan dapat terjadi serendah 0,3 Gy atau 30 rad<sup>4</sup>. b) Sindrom Gastrointestinal, kerusakan pada sel-sel yang melapisi saluran pencernaan dapat menyebabkan diare parah, dehidrasi, ketidakseimbangan elektrolit, dan hilangnya lapisan pelindung di usus, yang menyebabkan invasi bakteri

dan sepsis (Guan et al., 2023; Miousse et al., 2017). Dosis yang menghasilkan timbulnya gejala ini sekitar 10 Gy (1000 rad) meskipun beberapa gejala mungkin timbul serendah 6 Gy atau 600 rad. c) Sindrom Serebrovaskular/SSP, radiasi dosis sangat tinggi dapat memengaruhi sistem saraf pusat, menyebabkan gejala neurologis seperti kebingungan, koma, kejang, dan berpotensi kematian. Dosis yang menghasilkan timbulnya gejala ini dengan dosis lebih besar dari sekitar 50 Gy (5000 rad) meskipun beberapa gejala mungkin timbul serendah 20 Gy atau 2000 rad (Dainiak and Albanese, 2022b; Tanigawa, 2021).

Pada tahap terakhir yakni kesimpulan akibat paparan unsur radioaktif yakni fase pemulihan atau kematian, proses pemulihan dari ARS bergantung pada dosis radiasi, kesehatan umum individu, dan ketersediaan perawatan medis. Individu yang menerima radiasi dosis tinggi mungkin tidak dapat bertahan hidup karena kerusakan parah pada organ vital dan sistem kekebalan tubuh. Kematian kemungkinan besar disebabkan oleh kolapsnya sistem peredaran darah serta peningkatan tekanan pada ruang tengkorak akibat peningkatan kandungan cairan yang disebabkan oleh edema, vaskulitis, dan meningitis. Umumnya paparan unsur



## WIDYA BIOLOGI

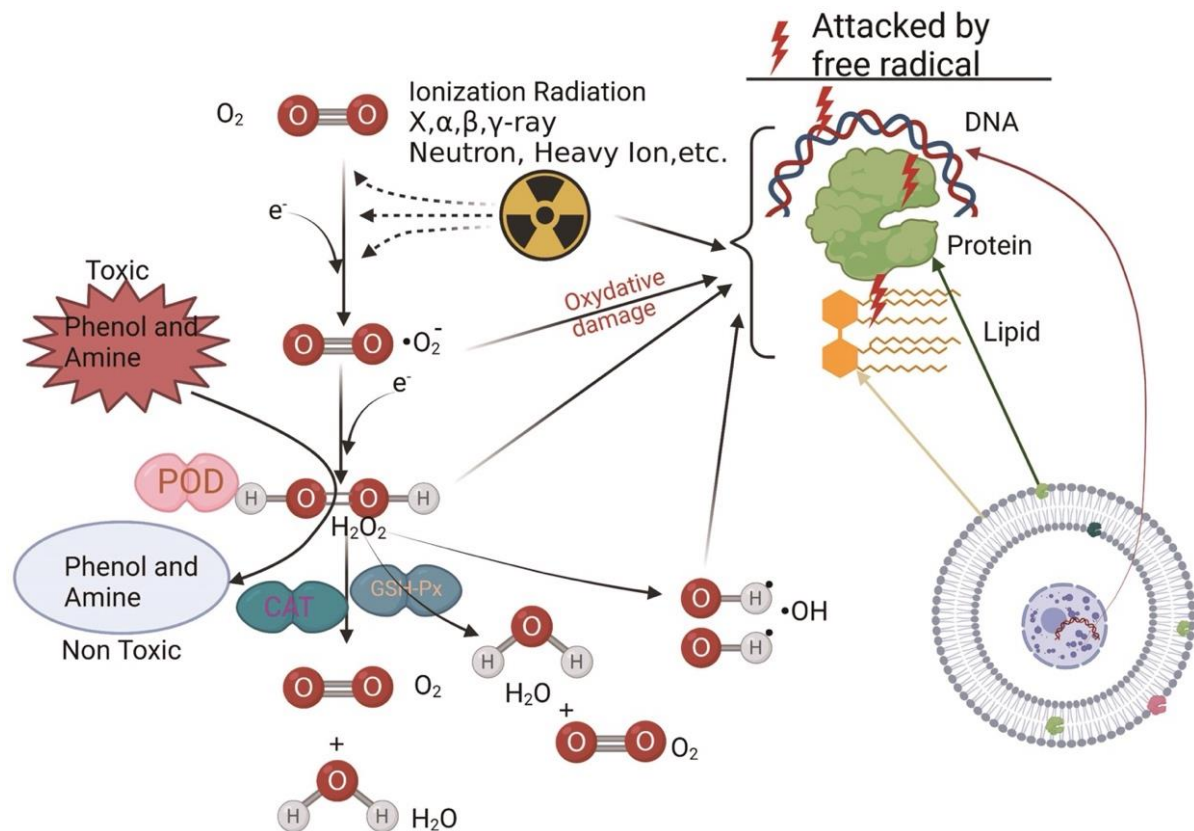
radioaktif pada dosis tinggi telah dilaporkan mengakibatkan kematian dalam waktu 3 - 60 hari. Berdasarkan patofisiologi tersebut, tahapan-tahapan secara rinci disajikan pada **tabel 1**.

### **Mekanisme kerusakan sel, DNA, saraf akibat radiasi pengion**

Mekanisme kerusakan sel, DNA, saraf akibat radiasi pengion hingga kematian sel telah dipelajari pada sindrom radiasi akut (ARS). Secara garis besar, kerusakan sel melewati tiga mekanisme utama meliputi proses ionisasi langsung, di mana radiasi pengion dapat berinteraksi langsung dengan molekul seluler, khususnya DNA, protein, dan lipid yang menyebabkan gangguan ikatan kimia dan kerusakan struktural. Lebih lanjut,

terjadinya pembentukan radikal bebas memungkinkan molekul sangat reaktif yang dapat merusak komponen seluler, termasuk DNA, protein, dan membran sel. Peningkatan radikal bebas dalam sel memicu terjadinya peningkatan produksi *reactive oxygen species* (ROS). Molekul yang sangat reaktif ini dapat mengoksidasi lipid, protein, dan DNA sehingga menyebabkan stres oksidatif (Adnyana and Sudaryati, 2023). Oksidasi DNA dapat menyebabkan modifikasi basa dan putusnya untai heliks yang selanjutnya berkontribusi terhadap kerusakan genetik dan kematian sel (Abend et al., 2023; Bazyka et al., 2018). Mekanisme sederhana akibat paparan radiasi pengion pada sel disajikan pada **gambar 1**.

## WIDYA BIOLOGI



**Gambar 1.** Mekanisme paparan pengion dalam meningkatkan kerusakan dan apoptosis sel. Keterangan: reactive oxygen species (ROS), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), hydroxyl radical (•OH).

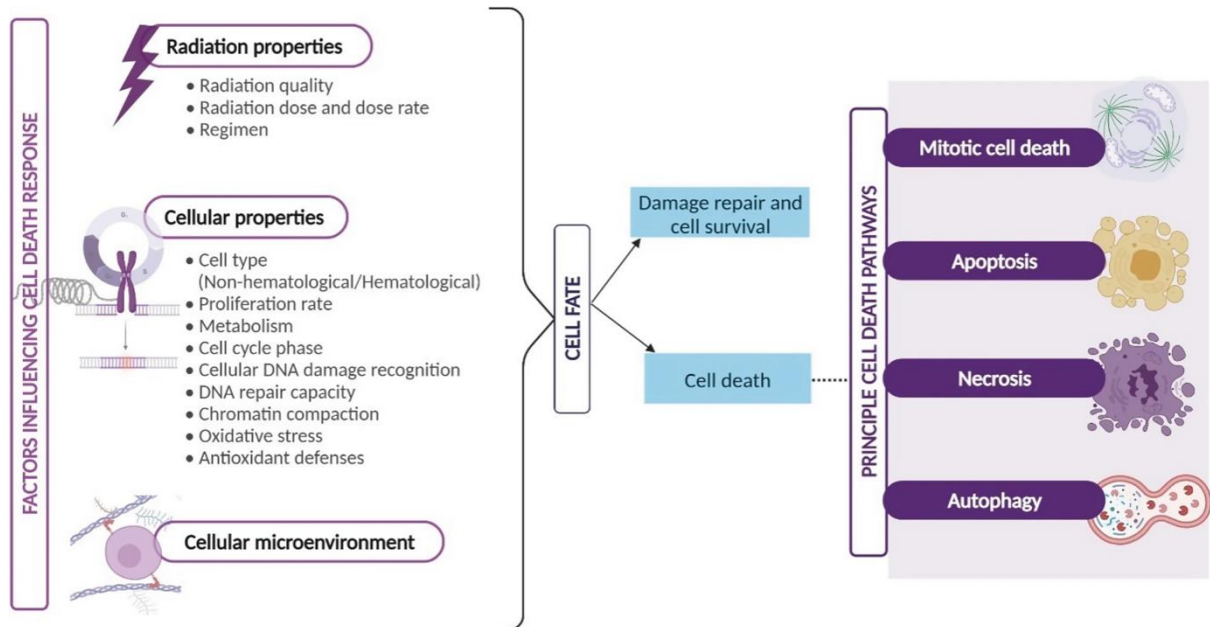
Kerusakan DNA juga diakibatkan oleh paparan radiasi pengion melalui tiga mekanisme utama yakni pemutusan untai tunggal (*single-strand breaks* [SSB]), di mana radiasi pengion dapat menyebabkan putusya salah satu dari dua untai heliks ganda DNA. SSB dapat diperbaiki melalui mekanisme perbaikan DNA seluler, namun kerusakan yang berlebihan dapat melebihi kapasitas perbaikan (Clements and Casani, 2016; Kazzi, 2016). Selanjutnya, kerusakan pada *double-strand breaks* (DSBs) menyebabkan putusya kedua untai heliks ganda DNA, sehingga mengakibatkan kerusakan yang lebih

parah. DSB dapat diperbaiki melalui berbagai jalur perbaikan DNA, namun jika tidak diperbaiki dengan benar, DSB dapat menyebabkan kelainan kromosom atau apoptosis sel. Hal ini juga didukung oleh DNA *Cross-Linking* yang menyebabkan ikatan silang antar untai DNA, mencegah replikasi dan transkripsi DNA yang tepat, dan berpotensi menyebabkan kematian sel secara parsial maupun simultan. Tingginya kerusakan sel dan DNA akibat induksi pengion mengakibatkan terjadinya peningkatan respons kerusakan DNA, ketika sel mendeteksi kerusakan DNA yang

WIDYA BIOLOGI

signifikan, mereka mengaktifkan jalur respons kerusakan DNA termasuk pemeriksaan siklus sel. Pos pemeriksaan ini menghentikan siklus sel untuk memberikan waktu untuk perbaikan DNA yang berimplikasi pada kegagalan dalam

regenerasi sel. Lebih lanjut, jika kerusakan DNA terlalu parah maka sel dapat mengalami kematian sel terprogram yang dikenal sebagai apoptosis (Bazyka et al., 2019; Macià i Garau et al., 2011; Reindl et al., 2023; Singh and Seed, 2020).



**Gambar 2.** Tinjauan umum tentang kematian sel dan mekanisme perlindungan kematian sel sebagai respons terhadap radiasi. Kematian sel akibat radiasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti faktor radiasi, faktor intrinsik sel, dan faktor lingkungan mikro seluler (kiri) dan jalur kematian sel tercantum di sebelah kanan. Reindl

Selain mengakibatkan kerusakan sel dan apoptosis, radiasi pengion juga dilaporkan mengakibatkan gangguan pada sistem saraf baik tepi maupun pusat. Kerusakan saraf muncul sebagai akibat dari inflamasi akibat paparan pengion yang menyebabkan pelepasan molekul pro-inflamasi dan aktivasi sel kekebalan, sehingga menyebabkan kerusakan pada sel saraf. Hal ini tentu akan mengganggu jalur

sinyal sel saraf, menyebabkan gangguan komunikasi antar neuron dan mempengaruhi fungsi sistem saraf normal. Ketidakseimbangan neurotransmitter akan berdampak pada penurunan impuls pembawa pesan kimia dan berimplikasi pada perubahan aktivitas dan disfungsi saraf (Kenchegowda et al., 2023). Lebih lanjut, paparan pengion mampu mengakibatkan bencana mitotik

## WIDYA BIOLOGI

yang ditandai dengan sel gagal menyelesaikan pembelahan sel dengan baik yang berimplikasi pada kematian sel dan kerusakan jaringan. Kerusakan vaskular juga akan mempengaruhi sensitivitas jaringan akibat mencana mitotik. Kerusakan pada jaringan ini dapat mengakibatkan kegagalan sumsum tulang, gangguan pada organ gastrointestinal, dan gangguan fungsi kekebalan tubuh. Radiasi pengion memicu kaskade inflamasi yang melibatkan sitokin, kemokin, dan sel kekebalan. Peradangan yang berlebihan atau berkepanjangan berkontribusi terhadap kerusakan jaringan, disfungsi organ, dan dapat menyebabkan komplikasi sekunder seperti infeksi, kegagalan multi-organ, dan kematian (Dainiak and Albanese, 2022a; Kazzi, 2016; Stenke et al., 2022). Tinjauan umum tentang kematian sel dan mekanisme perlindungan kematian sel sebagai respons terhadap radiasi disajikan pada **gambar 2**.

### **Paparan sebagian**

Kulit, gonad, dan mata mempunyai risiko terbesar terhadap kerusakan akibat paparan unsur radioaktif hal ini umumnya timbul secara parsial maupun secara simultan. Paparan sebagian tubuh menyebabkan efek kulit pada bagian kulit yang terpapar. Individu dengan cedera radiasi kulit sebagian mungkin

menunjukkan lesi kulit yang melepuh tetapi tidak memiliki riwayat luka bakar kimia atau termal, gigitan serangga, atau penyakit kulit atau alergi yang diketahui. Riwayat yang mendukung juga dapat mencakup pekerjaan di bidang yang menggunakan radiasi, penanganan benda logam yang tidak diketahui, paparan terhadap bubuk atau cairan yang tidak diketahui, atau kedekatan dengan sekelompok pasien dengan temuan kulit serupa. Paparan radiasi parsial sering kali melibatkan tangan atau kulit yang berdekatan dengan saku pakaian (misalnya paha). Lebih lanjut, gonad sangat sensitif terhadap paparan radiasi (Mettler et al., 2007; Miousse et al., 2017; Tanigawa, 2021). Penurunan spermatogonia yang bergantung pada dosis terjadi dengan meningkatnya radiasi. Pada orang dewasa, dosis terendah 0,015 Gy dapat menyebabkan depresi ringan pada spermatogenesis dan dosis >6 Gy cenderung menyebabkan kemandulan permanen terutama pada pria. Selain itu, organ mata menjadi organ penting yang umum terkontaminasi partikel radioaktif yang mampu masuk atau menembus kornea yang tidak terlindungi. Paparan dosis serendah 0,2 Gy dapat menyebabkan katarak, walaupun efeknya dapat tertunda hingga lima tahun atau lebih. Penting untuk

## WIDYA BIOLOGI

menggunakan pelindung mata ketika bekerja dengan bahan radioaktif yang berpotensi berbahaya bagi tubuh dan organ lainnya (Dainiak and Albanese, 2022a).

### Penatalaksanaan dan Terapi

Evaluasi ARS mencakup informasi tentang sifat kejadian paparan radiasi, riwayat gejala yang mungkin berhubungan dengan paparan radiasi, pemeriksaan fisik, dan pemeriksaan laboratorium. Waktu dan tingkat keparahan temuan klinis dan studi laboratorium membantu memperkirakan "biodosis" radiasi dan penatalaksanannya. Penatalaksanaan ARS melibatkan pendekatan multifaset yang bertujuan untuk mengurangi gejala, mencegah komplikasi, dan mendukung pemulihan tubuh. Tingkat keparahan ARS dan pengobatan spesifik yang diperlukan bergantung pada dosis radiasi yang diterima dan sistem organ yang terdampak. Adapun penatalaksanaan ARS dilakukan dengan melakukan evaluasi dan pemantauan medis dilakukan dengan menilai tingkat paparan radiasi dan tingkat keparahan gejala disertai dengan pemantauan terus menerus terhadap tanda-tanda vital, jumlah sel darah, dan fungsi organ.

Penatalaksanaan ARS dilakukan dengan terapi suportif mencakup manajemen cairan dan elektrolit untuk

mencegah dehidrasi dan homeostasis, transfusi darah untuk mengatasi anemia dan transfusi trombosit untuk mengatasi kecenderungan perdarahan, obat antiemetik untuk mengendalikan mual dan muntah, antibiotik untuk mencegah atau mengobati infeksi akibat gangguan fungsi kekebalan tubuh dan manajemen nyeri dan perawatan suportif untuk gejala lain seperti diare, demam, dan cedera kulit. Selain itu, diperlukan dukungan terhadap hematopoietik mencakup pemberian *Granulocyte colony-stimulating factors* (G-CSF) atau *granulocyte-macrophage colony-stimulating factors* (GM-CSF) untuk merangsang produksi sel darah putih dan meningkatkan imunitas serta pada kondisi parah diperlukan transplantasi sumsum tulang untuk mengembalikan fungsi hematopoietik (Dainiak and Albanese, 2022a; Stenke et al., 2022).

Penatalaksanaan diare berat dan dehidrasi dengan terapi penggantian cairan pada individu dengan gangguan gastrointestinal diperlukan. Hal ini juga dibarengi dengan dukungan nutrisi melalui pemberian makanan enteral atau parenteral untuk menjaga kecukupan nutrisi dan mendukung penyembuhan saluran cerna. Apabila terdapat tiga bagian utama terdampak radioaktif maka diperlukan penatalaksanaan cedera kulit dan luka

## WIDYA BIOLOGI

bakar akibat paparan radiasi, termasuk pengobatan topikal, perawatan luka, dan pencegahan infeksi. Tindakan dekontaminasi untuk menghilangkan partikel radioaktif dari kulit, rambut, dan pakaian, serta isolasi dan penahanan bahan yang terkontaminasi untuk mencegah paparan lebih lanjut. Identifikasi kerusakan neurologis dan pertimbangan terapi diperlukan dengan pendekatan psikologis dengan cara memberikan konseling dan dukungan psikologis bagi individu dan keluarganya akibat dampak fisik dan emosional dari paparan radiasi serta konsekuensinya.

Terapi yang sedang berkembang saat ini untuk penatalaksanaan ARS yakni dengan menggunakan plasenta sel stroma manusia atau sel punca. Temuan penelitian sebelumnya menyatakan injeksi intramuskular sel plasenta stroma manusia ke tikus yang terpapar radiasi radioaktif dapat meningkatkan kelangsungan hidup hingga hampir 100% dan memulihkan berat badan. Mekanisme yang dipelajari yakni pelepasan sekresi sitokin dan faktor tumbuh yang tepat waktu dari sel plasenta yang disuntikkan ke tikus mencakup G-CSF, GRO, MCP-1, IL-6 dan IL-8 secara signifikan meningkatkan hematopoiesis tikus dan memulihkan berat badan. Sel-sel plasenta dapat memicu migrasi sel punca

hematopoietik secara *in vitro* kedalam tubuh tikus yang terdampak radiasi, ini menjadi peluang baru dalam penatalaksanaan ARS di masa depan (Hollingsworth et al., 2021). Selain itu, penggunaan mikrobioma sebagai target untuk intervensi medis atau penanda biomarker menjadi peluang untuk diagnosis dan rencana penatalaksanaan ARS. Mikrobioma berpotensi besar untuk meredakan cedera radiasi, baik dalam konteks radioterapi maupun keadaan darurat kesehatan masyarakat yang terkait radiasi.

### **Pencegahan dan Pengendalian**

Mencegah ARS melibatkan kombinasi tindakan yang bertujuan untuk mengurangi paparan radiasi pengion dan meminimalkan risiko cedera terkait radiasi. Mencegah ARS memerlukan pendekatan komprehensif yang melibatkan pelatihan yang tepat, kepatuhan ketat terhadap protokol keselamatan, pemantauan berkelanjutan, dan kesiapsiagaan menghadapi potensi keadaan darurat (Stenke et al., 2022). Pencegahan yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak ARS meliputi pemberian pendidikan dan pelatihan, pada bagian ini program pendidikan dan pelatihan komprehensif bagi individu yang bekerja dengan atau di sekitar sumber radiasi. Hal

## WIDYA BIOLOGI

ini mencakup penanganan, penyimpanan, dan pembuangan bahan radioaktif yang benar, serta pemahaman protokol keselamatan dan penggunaan peralatan pelindung. Selain itu, ditempat atau sumber radiasi diharapkan menerapkan dan patuh terhadap SOP dan keamanan radiasi. Penerapan dan kepatuhan yang ketat terhadap pedoman dan protokol keselamatan radiasi di tempat kerja yang menggunakan sumber radiasi, termasuk fasilitas nuklir, fasilitas medis yang menawarkan terapi radiasi, laboratorium penelitian, dan lingkungan industri (Dainiak, 2018; Kazzi, 2016).

Selanjutnya, penggunaan alat pelindung diri (APD), hal ini penting dilakukan serta pihak pengelola wajib menyediakan dan memastikan penggunaan alat pelindung diri yang sesuai, seperti celemek timbal, sarung tangan, kacamata pelindung, dan pelindung pernafasan, tergantung pada sifat sumber radiasi dan tingkat risiko paparan. Desain dan penggunaan bahan pelindung dan penghalang untuk mengurangi paparan radiasi perlu diperhatikan agar tidak tembus terhadap paparan radiasi. Lebih lanjut, perusahaan atau industri harus melakukan pemantauan rutin terhadap tingkat paparan radiasi menggunakan dosimeter untuk menilai dan membatasi

jumlah radiasi yang diserap oleh individu yang bekerja di lingkungan rawan radiasi. Hal ini membantu memastikan bahwa paparan tetap dalam batas aman. Pengembangan respon dan kesiapsiagaan juga diperlukan guna menghadapi kondisi darurat termasuk pelatihan personel mengenai protokol tanggap darurat, rencana evakuasi, dan koordinasi dengan otoritas terkait (Hafid et al., 2023; Sutriyawan et al., 2023). Hal lain yang harus dilakukan yakni Pemantauan dan pengaturan ketat terhadap tingkat radiasi lingkungan di area sekitar fasilitas nuklir atau tempat yang berpotensi bahaya radiasi. Hal ini melibatkan penilaian lingkungan secara berkala dan tindakan untuk meminimalkan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan. Kepatuhan terhadap peraturan dan standar nasional dan internasional terkait keselamatan radiasi dan batas paparan, audit, inspeksi, dan pengawasan rutin oleh badan pengatur membantu memastikan kepatuhan terhadap protokol keselamatan.

## SIMPULAN

ARS adalah penyakit radiasi pengion dosis tinggi yang mengakibatkan toksikokinetik dalam waktu singkat. Terjadinya ARS diperantarai oleh paparan unsur radioaktif seperti partikel alfa, beta, proton, neutron dan gamma. Partikel yang

**WIDYA BIOLOGI**

terakumulasi di dalam tubuh akan melewati lima tahapan utama yakni paparan awal radiasi pengion tingkat tinggi, tahap prodromal, tahap laten, tahap manifest yang disertai sindrom hematopoietik, sindrom gastrointestinal, sindrom serebrovaskular dan diakhiri oleh tahap pemulihan atau kematian. Mekanisme kerusakan sel, DNA, dan saraf dipelajari sebagai bentuk dari inkonsistensi kerja masing – masing yang mengarah pada berbagai kerusakan dan kematian sel secara parsial maupun simultan. Tingkat keparahan ARS tergantung pada faktor-faktor seperti dosis radiasi, durasi paparan, jenis radiasi, dan sensitivitas individu. Kedepan, diperlukan penelitian lebih lanjut berkaitan dengan peran paparan unsur radioaktif, jenis alat yang menimbulkan unsur radioaktif serta dampak sentral terhadap kesehatan manusia.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Abend, M., Ostheim, P., Port, M., 2023. Radiation-Induced Gene Expression Changes Used for Biodosimetry and Clinical Outcome Prediction: Challenges and Promises. *Cytogenet Genome Res* 1–8. <https://doi.org/10.1159/000530947>
- Adnyana, I.M.D.M., Sudaryati, N.L.G., 2023. Phytochemical analysis of the antioxidant compounds of Baper Tea and its potential as an immunomodulatory agent and candidate for standardized herbal medicine. *Trends in Sciences* 20, 6391. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.6391>
- Bazyka, D., Gudzenko, N., Dyagil, I., Iliencko, I., Belyi, D., Chumak, V., Prysyzhnyuk, A., Bakhanova, E., 2019. Cancers after Chernobyl: From Epidemiology to Molecular Quantification. *Cancers (Basel)* 11, 1291. <https://doi.org/10.3390/cancers11091291>
- Bazyka, D., Prysyzhnyuk, A., Gudzenko, N., Dyagil, I., Belyi, D., Chumak, V., Buzunov, V., 2018. Epidemiology of Late Health Effects in Ukrainian Chernobyl Cleanup Workers. *Health Phys* 115, 161–169. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000868>
- Clements, B.W., Casani, J.A.P., 2016. Nuclear and Radiological Disasters, in: *Disasters and Public Health*. Elsevier, Netherlands, pp. 357–383. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801980-1.00015-5>
- Dainiak, N., 2018. Medical management of acute radiation syndrome and associated infections in a high-casualty incident. *J Radiat Res* 59, ii54–ii64. <https://doi.org/10.1093/jrr/rry004>
- Dainiak, N., Albanese, J., 2022a. Medical management of acute radiation syndrome. *Journal of Radiological Protection* 42, 031002. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac7d18>
- Dainiak, N., Albanese, J., 2022b. Medical management of acute radiation syndrome. *Journal of Radiological*



## WIDYA BIOLOGI

- Protection 42, 031002. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac7d18> <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2210669>
- Dörr, H., Meineke, V., 2011. Acute radiation syndrome caused by accidental radiation exposure - therapeutic principles. *BMC Med* 9, 126. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-9-126>
- Guan, B., Li, D., Meng, A., 2023. Development of radiation countermeasure agents for acute radiation syndromes. *Animal Model Exp Med* 6, 329–336. <https://doi.org/10.1002/ame2.12339>
- Hafid, W., Arda R., Z.A., Mohamad, S.N., Asniya, Adnyana, I.M.D.M., Arba, S., Piola, W.S., Muliani, C., Jayanti, K.D., Eljatin, D.S., Febriyanti, Eljatin, M.R.A., Setyawan, M.F., Husna, Haykal, M.N., Hutagalung, T.R., 2023. *Investigasi Wabah*, 1st ed. CV Media Sains Indonesia, Bandung.
- Hollingsworth, B.A., Cassatt, D.R., DiCarlo, A.L., Rios, C.I., Satyamitra, M.M., Winters, T.A., Taliaferro, L.P., 2021. Acute Radiation Syndrome and the Microbiome: Impact and Review. *Front Pharmacol* 12, 643283. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643283>
- Kazzi, Z.N., 2016. Acute Radiation Injuries, in: *Critical Care Toxicology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–14. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20790-2\\_32-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20790-2_32-1)
- Kenchegowda, D., Bolduc, D.L., Kurada, L., Blakely, W.F., 2023. Severity scoring systems for radiation-induced GI injury – prioritization for use of GI-ARS medical countermeasures. *Int J Radiat Biol* 99, 1037–1045.
- Macià i Garau, M., Lucas Calduch, A., López, E.C., 2011. Radiobiology of the acute radiation syndrome. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy* 16, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2011.06.001>
- Mettler, F.A., Gus'kova, A.K., Gusev, I., 2007. Health effects in those with acute radiation sickness from the chernobyl accident. *Health Phys* 93, 462–469. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000278843.27969.74>
- Miousse, I.R., Tobacyk, J., Melnyk, S., James, S.J., Cheema, A.K., Boerma, M., Hauer-Jensen, M., Koturbash, I., 2017. One-carbon metabolism and ionizing radiation: a multifaceted interaction. *Biomol Concepts* 8, 83–92. <https://doi.org/10.1515/bmc-2017-0003>
- Reindl, J., Abrantes, A.M., Ahire, V., Azimzadeh, O., Baatout, S., Baeyens, A., Baselet, B., Chauhan, V., Da Pieve, F., Delbart, W., Dobney, C.P., Edin, N.F.J., Falk, M., Foray, N., François, A., Frelon, S., Gaipl, U.S., Georgakilas, A.G., Guipaud, O., Hausmann, M., Michaelidesova, A.J., Kadhim, M., Marques, I.A., Milic, M., Mistry, D., Moertl, S., Montoro, A., Obrador, E., Pires, A.S., Quintens, R., Rajan, N., Rödel, F., Rogan, P., Savu, D., Schettino, G., Tabury, K., Terzoudi, G.I., Triantopoulou, S., Viktorsson, K., Wozny, A.-S., 2023. *Molecular Radiation Biology*, in: *Radiobiology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 83–189. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18810-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18810-7_3)

**WIDYA BIOLOGI**

- Sharifi, A., Dinparastisaleh, R., Kumar, N., Mirsaedi, M., 2022. Health effects of radioactive contaminated dust in the aftermath of potential nuclear accident in Ukraine. *Front Public Health* 10, 959668. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.959668>
- Singh, V.K., Seed, T.M., 2022. An update on romiplostim for treatment of acute radiation syndrome. *Drugs of Today* 58, 133. <https://doi.org/10.1358/dot.2022.58.3.3367994>
- Singh, Vijay K., Seed, T.M., 2022. Acute radiation syndrome drug discovery using organ-on-chip platforms. *Expert Opin Drug Discov* 17, 865–878. <https://doi.org/10.1080/17460441.2022.2099833>
- Singh, V.K., Seed, T.M., 2020. Pharmacological management of ionizing radiation injuries: current and prospective agents and targeted organ systems. *Expert Opin Pharmacother* 21, 317–337. <https://doi.org/10.1080/14656566.2019.1702968>
- Smart, D., 2017. Radiation Toxicity in the Central Nervous System: Mechanisms and Strategies for Injury Reduction. *Semin Radiat Oncol* 27, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2017.04.006>
- Stenke, L., Hedman, C., Lagergren Lindberg, M., Lindberg, K., Valentin, J., 2022. The acute radiation syndrome—need for updated medical guidelines. *Journal of Radiological Protection* 42, 014004. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac4ac6>
- Sutriyawan, A., Jayanti, K.D., Handayani, Dwi, Arfan, I., Adnyana, I.M.D.M., Muna, K.U.N. El, Purnama, R.M.I., Setiawan, D.I., Handayani, Dedes, Nuraeni, T., Fauziah, D.A., Susanti, A., Rachman, I., 2023. *Surveilans Kesehatan Masyarakat*, 1st ed. CV. Media Sains Indonesia, Bandung.
- Tanigawa, K., 2021. Case review of severe acute radiation syndrome from whole body exposure: concepts of radiation-induced multi-organ dysfunction and failure. *J Radiat Res* 62, i15–i20. <https://doi.org/10.1093/jrr/rraa121>

**Tabel 1.** Patofisiologi dan manifestasi klinis terjadinya ARS

Sindroma	Dosis	Tahap Prodromal	Tahap Laten	Tahap Terjadinya Penyakit	Pemulihan
Hematopoietik (Sumsum Tulang)	> 0,7 Gy (> 70 rads) <i>(gejala ringan dapat terjadi serendah 0,3 Gy atau 30 rads)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah anoreksia, mual dan muntah.</li> <li>Onset terjadi 1 jam hingga 2 hari setelah paparan.</li> <li>Tahap berlangsung selama beberapa menit hingga hari.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sel induk di sumsum tulang sedang sekarat, meskipun pasien mungkin tampak dan merasa sehat.</li> <li>Tahap berlangsung 1 sampai 6 minggu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah anoreksia, demam, dan malaise.</li> <li>Penurunan jumlah sel darah terjadi selama beberapa minggu.</li> <li>Penyebab utama kematian adalah infeksi dan perdarahan.</li> <li>Kelangsungan hidup menurun dengan meningkatnya dosis.</li> <li>Kebanyakan kematian terjadi dalam beberapa bulan setelah paparan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pada sebagian besar kasus, sel-sel sumsum tulang akan mulai mengisi kembali sumsum tulang.</li> <li>Harus ada pemulihan penuh bagi sebagian besar individu dalam waktu beberapa minggu hingga dua tahun setelah terpapar.</li> <li>kematian dapat terjadi pada beberapa individu pada tekanan 1,2 Gy (120 rad).</li> <li>LD50/60 sekitar 2,5 hingga 5 Gy (250 hingga 500 rad)</li> </ul>
Saluran Pencernaan (GI)	> 10 Gy (> 1000 rad) <i>(beberapa gejala mungkin timbul serendah 6 Gy atau 600 rad)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah anoreksia, mual parah, muntah, kram, dan diare.</li> <li>Onset terjadi dalam beberapa jam setelah paparan.</li> <li>Tahap berlangsung sekitar 2 hari.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sel induk di sumsum tulang dan sel yang melapisi saluran pencernaan sedang sekarat, meskipun pasien mungkin tampak dan merasa sehat.</li> <li>Stadium berlangsung kurang dari 1 minggu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah malaise, anoreksia, diare berat, demam, dehidrasi, dan ketidakseimbangan elektrolit.</li> <li>Kematian disebabkan oleh infeksi, dehidrasi, dan ketidakseimbangan elektrolit.</li> <li>Kematian terjadi dalam waktu 2 minggu setelah terpapar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LD100 sekitar 10 Gy (1000 rad)</li> </ul>
Kardiovaskular (CV)/Sistem Saraf Pusat (SSP)	> 50 Gy (5000 rad) <i>(beberapa gejala mungkin timbul serendah 20 Gy atau 2000 rad)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah rasa gugup dan kebingungan yang ekstrem; mual parah, muntah, dan diare encer; penurunan kesadaran; dan sensasi terbakar pada kulit.</li> <li>Onset terjadi dalam beberapa menit setelah paparan.</li> <li>Tahap berlangsung selama beberapa menit hingga jam.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasien mungkin kembali ke fungsi parsial.</li> <li>Tahap ini dapat berlangsung berjam-jam namun sering kali kurang dari itu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gejalanya adalah kembalinya diare encer, kejang, dan koma.</li> <li>Onset terjadi 5 sampai 6 jam setelah paparan.</li> <li>Kematian terjadi dalam waktu 3 hari setelah terpapar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diperkirakan tidak ada pemulihan.</li> </ul>