

Respon Sel Darah Putih tikus BALB/C pada Paparan Radiasi Medan Magnet *Extremely Low-Frequency* (ELF) Jangka Lama

Aditya Kurniawan^{a*}, Sudarti^b, Dina Helianti^c, Ayu Munawaroh Aziz^c, Ulfa Elfiah^d

^aPendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jalan Kalimantan No. 37, 68121, Kab. Jember, Jawa Timur, Indonesia

^bPendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jalan Kalimantan No. 37, 68121, Kab. Jember, Jawa Timur, Indonesia

^cDepartemen Histologi, Fakultas Kedokteran, Universitas Jember, Jalan Kalimantan No. 37, 68121, Kab. Jember, Jawa Timur, Indonesia

^dDepartemen Anatomi, Fakultas Kedokteran, Universitas Jember, Jalan Kalimantan No. 37, 68121, Kab. Jember, Jawa Timur, Indonesia

Corresponding author : adityakurniawan@unej.ac.id

ABSTRAK

Sel darah putih merupakan sel yang sensitif terhadap infeksi dan perubahan lingkungan. Penelitian ini menyelidiki efek paparan jangka panjang terhadap medan *Extremely Low-Frequency* (ELF-MF) pada 50 Hz dan 100 μ T terhadap komposisi leukosit mencit BALB/C, dengan fokus pada neutrofil, monosit, dan limfosit. Dua puluh empat tikus BALB/C jantan dibagi menjadi kelompok kontrol, 15 hari, dan 30 hari paparan, dengan paparan intermiten setiap hari selama 2 jam. Jumlah leukosit dianalisis menggunakan ANOVA satu arah. Hasil penelitian menunjukkan perubahan signifikan pada populasi leukosit. Jumlah neutrofil meningkat secara progresif setelah 30 hari, yang menunjukkan adanya potensi respons inflamasi. Tingkat monosit menunjukkan dua tahap, awalnya menurun pada hari ke-15 lalu melonjak 82,3% pada hari ke-30, yang menunjukkan aktivasi kekebalan adaptif. Sebaliknya, jumlah limfosit tetap stabil hingga hari ke-15 tetapi menurun secara signifikan sebesar 2,14% pada hari ke-30, yang berpotensi mencerminkan inflamasi yang diinduksi oleh stres. Studi ini menunjukkan bahwa radiasi ELF-MF dalam jangka panjang dapat mengubah dinamika leukosit, kemungkinan dimediasi melalui jalur stres oksidatif dan respons inflamasi yang berkepanjangan. Respons inflamasi yang muncul ini menggarisbawahi pentingnya penelitian lebih lanjut tentang implikasi kesehatan jangka panjang dari paparan ELF-MF, mengingat meningkatnya prevalensi radiasi elektromagnetik di lingkungan modern.

Kata kunci: *Extremely Low-Frequency Magnetic Fields* (ELF-MF), Leukosit

ABSTRACT

The immune system is essential for preventing infections and maintaining health, as leukocyte components significantly impact it. This study examines the impact of long-term exposure to Extremely Low-Frequency Magnetic Fields (ELF-MF) at 50 Hz and 100 μ T on the leukocyte composition of BALB/C rats, with a particular emphasis on neutrophils, monocytes, and lymphocytes. The control, 15-day, and 30-day exposure groups were each comprised of twenty-four male BALB/C mice. The rats were subjected to intermittent exposure for two hours each day. One-way ANOVA was implemented to evaluate leukocyte counts. The findings indicated substantial modifications in leukocyte populations. The gradual increase in neutrophil counts suggested a potential inflammatory response. Adaptive immune activation was indicated by the biphasic response of monocyte levels, which initially decreased by day 15 before surging by 82.3% on day 30. In contrast, lymphocyte counts remained consistent until day 15, but they experienced a substantial decrease of 2.14% on day 30, which may indicate prolonged inflammation induced by stress.

Keywords: *Extremely Low-Frequency Magnetic Fields* (ELF-MF), Leukocytes

Citation format:

Kurniawan, et al. 2024. Respon Sel Darah Putih tikus BALB/C pada Paparan Radiasi Medan Magnet *Extremely Low-Frequency* (ELF) Jangka Lama., *Jambura Edu Biosfer Journal.*, vol, 6, no.2. pp 53—60, doi:<https://doi.org/10.34312/jebj.v6i2.28432j>

Handling editor: Zuliyanto Zakaria

1. Pendahuluan

Sel adalah unit dasar kehidupan yang paling kecil, berfungsi sebagai unit struktural dan fungsional. Baik organisme uniseluler maupun multiseluler melakukan berbagai fungsi vital. Struktur sel terdiri dari beberapa komponen penting, seperti sitoplasma, yang menyimpan bahan kimia penting untuk metabolisme, membran sel, yang mengontrol aliran zat masuk dan keluar, dan inti sel (nukleus), yang mengandung materi genetik (DNA) dan mengatur aktivitas sel. Sel juga memiliki organel yang melakukan fungsi tertentu, seperti mitokondria untuk produksi energi dan ribosom untuk sintesis protein (Vallabhajosula & Mustafa, 2006).

Leukosit adalah komponen penting dalam sistem kekebalan tubuh yang berfungsi untuk melawan infeksi dan ancaman dari luar tubuh. Terdapat beberapa jenis sel darah putih, termasuk neutrofil, eosinofil, basofil, limfosit, dan monosit, yang masing-masing memiliki peran spesifik dalam pertahanan tubuh. Sel darah putih tidak berwarna dan memiliki inti, serta dapat bergerak secara ameboid untuk menembus dinding kapiler dan menuju lokasi infeksi. Salah satu fungsi utama sel darah putih adalah menghasilkan antibodi yang dapat membasmi virus, bakteri, jamur, dan parasit yang masuk ke dalam tubuh. Sel darah putih memainkan peran vital dalam menjaga kesehatan dan melindungi tubuh dari berbagai ancaman infeksi (Dean, 2005).

Kekuatan imun di dalam tubuh sangat dipengaruhi oleh komponen sel darah putih. Komponen sel darah putih selalu berubah tiap harinya dan sangat bergantung pada perubahan yang terjadi di luar tubuh seperti infeksi antigen atau adanya paparan lingkungan seperti radiasi. Penelitian mengenai radioterapi menyajikan hasil yang baik. Radiasi dosis rendah dapat meningkatkan jumlah sel makrofag dan sel NK dalam melawan sel kanker. Sitokin yang muncul akibat paparan radiasi juga mendukung perlambatan pertumbuhan dan apoptosis pada sel kanker (Demaria et al., 2016). Namun, di sisi lain paparan radiasi ultraviolet digunakan peneliti untuk menurunkan jumlah leukosit. Tujuan dari menurunkan jumlah leukosit adalah untuk mengurangi inflamasi yang muncul pada tubuh. Peradangan dapat berkurang jika terpapar radiasi ultraviolet (Hart & Norval, 2021)

Radiasi gelombang elektromagnet juga dapat mempengaruhi komponen leukosit. Data yang terakumulasi menunjukkan bahwa paparan elektromagnetik dapat mempengaruhi secara positif terhadap jumlah dan fungsi sel imun, termasuk proporsi sel, siklus sel dan apoptosis. Sementara itu, ada juga laporan negatif dari medan elektromagnetik pada sel imun yang menyebutkan bahwa paparan radiasi gelombang elektromagnet dapat menurunkan jumlah leukosit, limfosit, eosinofil (Yao et al., 2022). Hasil data yang bervariasi ini menunjukkan bahwa semua komponen sel darah putih sangat sensitif pada radiasi gelombang elektromagnetik. Efek radiasi gelombang elektromagnet akan sangat bergantung pada dosis dan durasi paparan pada sel (El-Gohary & Said, 2017).

Perbedaan tegangan membentuk medan listrik: semakin tinggi tegangan, semakin kuat medan magnet yang dihasilkan. Medan magnet terbentuk saat arus listrik mengalir: semakin tinggi arus, semakin kuat medan magnet. Medan elektromagnetik umumnya ditemukan di lingkungan kita namun tidak terlihat oleh mata manusia. Tidak hanya ditemukan secara alami, medan elektromagnetik juga ditemukan pada barang-barang buatan manusia. Setiap soket listrik yang menghasilkan listrik berhubungan dengan medan elektromagnetik frekuensi rendah. Berbagai barang yang mengirimkan informasi menggunakan gelombang radio seperti antenna TV, Radio, dan telepon genggam juga berhubungan dengan elektromagnetik (Mocanu-Dobranici et al., 2023; WHO, 2016).

Meningkatnya penggunaan perangkat elektronik yang menghasilkan medan *Extremely Low-Frequency Magnetic Fields* (ELF-MF) telah memicu kekhawatiran yang semakin meningkat terkait potensi risiko kesehatan yang terkait dengan sistem imun. ELF-MF ini sebagian besar dihasilkan oleh sumber-sumber umum di lingkungan perumahan, termasuk berbagai peralatan rumah tangga, instalasi listrik di rumah, dan kabel listrik eksternal.

Secara umum, manusia modern di dalam ruangan terpapar radiasi ELF-MF sebesar 0,025 hingga 0,07 mikrottesla (μT). Paparan ini telah mendorong peningkatan penelitian terhadap kemungkinan implikasi bagi kesehatan manusia (Manser et al., 2017; Portillo et al., 2022; Schuermann & Mevissen, 2021). Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiasi Non-Ionisasi (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection/ICNIRP*) telah menetapkan tingkat referensi untuk paparan masyarakat terhadap medan magnet ELF pada 100 μT untuk medan magnet frekuensi daya (50/60 Hz). Tingkat ini dianggap aman (Ma et al., 2016; Paniagua et al., 2015; Safavi et al., 2022). Meskipun ada beberapa bukti epidemiologi yang menunjukkan potensi risiko pada tingkat di atas 0,3-0,4 μT , konsensus ilmiah menunjukkan bahwa tingkat paparan yang umum di lingkungan sehari-hari tidak mungkin menyebabkan efek kesehatan yang merugikan (Sudarti et al., 2024).

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa paparan ELF-MF dalam ambang batas WHO dapat mempengaruhi berbagai proses fisiologis, termasuk proliferasi, diferensiasi, dan apoptosis sel imun (Jeong et al., 2017). Investigasi yang kami lakukan berfokus pada efek potensial ELF-MF pada ambang batas WHO yang dipaparkan pada sel-sel imun yaitu neutrofil, monosit, dan limfosit, yang merupakan komponen kunci dari sistem imun bawaan dan adaptif. Penelitian ini ingin mengkonfirmasi apakah ambang batas radiasi maksimal dari WHO aman bagi sel darah. Dalam penelitian ini, kami bertujuan untuk menyelidiki respons diferensial sel-sel kekebalan terhadap paparan ELF-MF pada tikus BALB/C, khususnya berfokus pada neutrofil, monosit, dan limfosit..

2. Metodologi

Persiapan Mencit Balb/C dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan 24 ekor mencit jantan galur Balb/C yang berusia empat minggu, sehat, bebas cacat, dan memiliki berat badan antara 20-25 gram. Seluruh mencit dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan dengan masing-masing kelompok terdiri dari delapan mencit yang sesuai dengan beberapa penelitian ELF-MF lainnya (Hu et al., 2016; Madjid Ansari et al., 2016). Mencit ditempatkan di laboratorium selama tujuh hari sebelum menerima perlakuan. Mencit dipelihara di lingkungan laboratorium suhu 24°C dengan menggunakan kandang kultur dengan durasi 12 jam lampu menyala (terang) dan 12 jam lampu dipadamkan (gelap). Kandang memiliki luas 78 cm² dengan tinggi kandang 14 cm (Pedoman Uji Toksisitas Nonklinis Secara In Vivo, 2014). Pemberian makan dan minum secara *ad libitum*. Perlakuan dalam penelitian ini adalah pemaparan medan magnet ELF dengan intensitas 50Hz:100 μT secara intermiten 2 jam/hari selama 15 hari (kelompok pertama) dan 30 hari (kelompok kedua). Penelitian ini telah disetujui oleh Komite Etik Penelitian Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Jember. No.1745/UN25.8/KEPWDL/2022

Prosedur Pemaparan Medan Magnet ELF

Penelitian ini menggunakan *ELF Generator*, yaitu mesin untuk menciptakan medan magnet ELF, dan alat *EMF-Test 827* untuk mendeteksi medan magnet ELF. Setiap hari, sampel dipapar medan magnet ELF selama dua jam sebelum dipindahkan ke laboratorium pemeliharaan hewan coba di FKIP Universitas Jember.

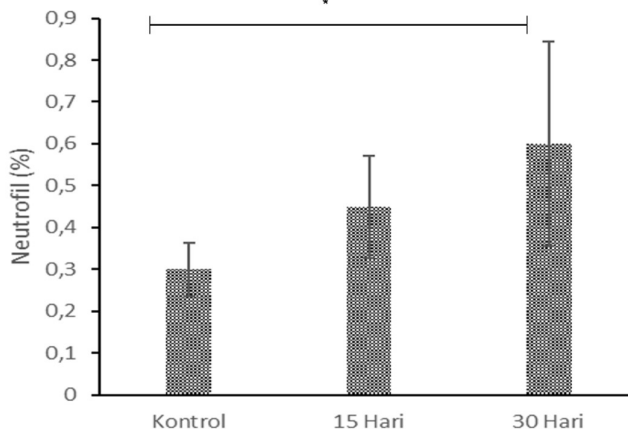
Penghitungan Sel Darah dan Analisis Data

Sel darah dihitung setelah sampel mencit Balb/C dipapar dengan medan magnet ELF dengan intensitas 100 μT secara intermiten selama 2 jam/hari selama 15 hari dan 30 hari. Intensitas 100 μT dipilih karena merupakan ambang batas radiasi yang diperbolehkan oleh WHO. Uji ANOVA satu arah digunakan untuk menganalisis hasilnya. Analisis lanjutan menggunakan metode Tukey untuk melihat signifikansi tiap kelompok.

3. Hasil dan Pembahasan

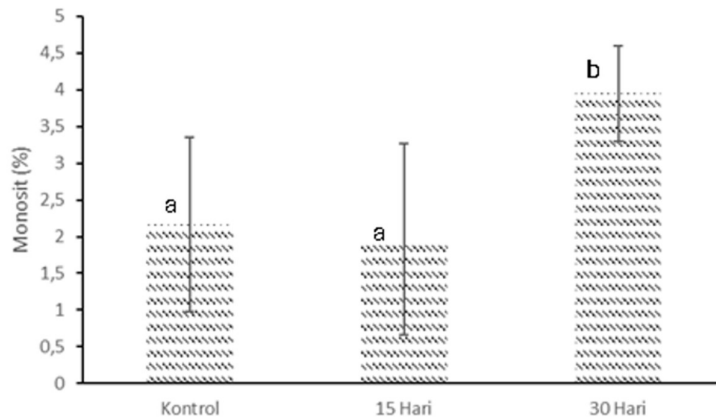
3.1 Hasil

Hasil studi ini menunjukkan peningkatan progresif dalam jumlah neutrofil pada kelompok yang terpapar radiasi ELF-MF tampak pada Gambar 1. Kelompok kontrol memiliki jumlah neutrofil rata-rata 0,3% yang meningkat menjadi 0,45% pada kelompok 15 hari dan selanjutnya menjadi 0,6% pada kelompok 30 hari. Analisis statistik menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kelompok kontrol dan kelompok 30 hari, yang menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik dalam waktu lama dapat merangsang peningkatan produksi neutrofil, yang mungkin mengindikasikan respons stres atau inflamasi yang dipicu oleh paparan elektromagnetik.



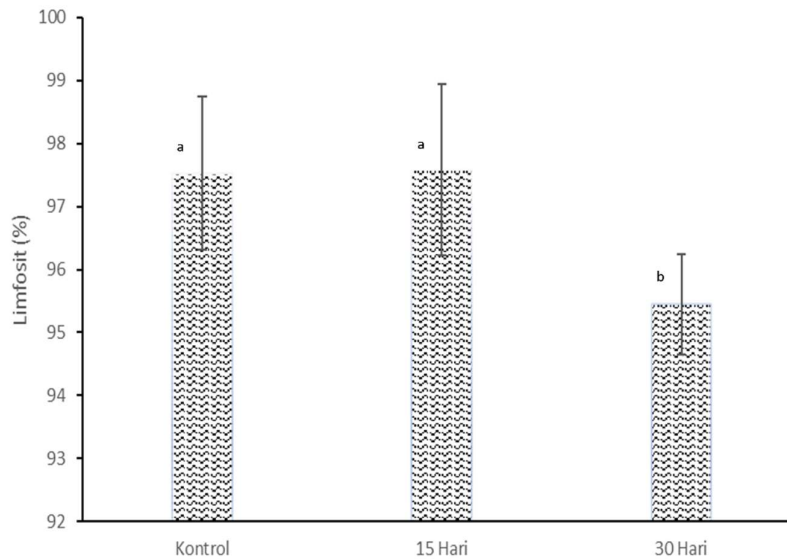
Gambar 1. Jumlah neutrofil pada 3 kelompok. Kelompok perlakuan hari ke-15 dan hari ke-30 dipapar dengan medan elektromagnetik 100 μ T.

Jumlah monosit menunjukkan pola yang berbeda tampak pada Gambar 2. Kelompok kontrol memiliki jumlah monosit rata-rata 2,17%, yang sedikit menurun pada kelompok 15 hari menjadi 1,9667%, tetapi kemudian meningkat tajam menjadi 3,95% pada kelompok 30 hari. Perbedaan yang signifikan antara kelompok kontrol dan kelompok 30 hari menunjukkan bahwa paparan yang panjang memiliki efek dua fase, fase awal terjadi penekanan jumlah monosit lalu diikuti fase kedua peningkatan monosit. Hal ini dapat mencerminkan respons kekebalan adaptif dari waktu ke waktu atau mekanisme kompensasi dalam menanggapi paparan elektromagnetik yang berkelanjutan.



Gambar 2. Jumlah monosit pada 3 kelompok. Kelompok perlakuan hari ke-15 dan hari ke-30 dipapar dengan medan elektromagnetik 100 μ T

Jumlah limfosit tetap relatif stabil antara kontrol (97,53%) dan kelompok paparan 15 hari (97,5833%) tetapi menurun menjadi 95,45% pada kelompok 30 hari tampak pada gambar 3. Perbedaan signifikan secara statistik tampak pada kelompok kontrol dan kelompok 30 hari menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik dalam waktu lama dapat memengaruhi jumlah limfosit, yang berpotensi mencerminkan penurunan fungsi kekebalan tubuh. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun paparan jangka pendek mungkin tidak secara signifikan mengubah tingkat limfosit, paparan jangka panjang dapat menyebabkan modulasi kekebalan tubuh, sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi mekanisme di balik perubahan ini dan implikasinya terhadap kesehatan.



Gambar 3. Jumlah limfosit pada 3 kelompok. Kelompok perlakuan hari ke-15 dan hari ke-30 dipapar dengan medan elektromagnetik 100 μ T

3.2 Pembahasan

Penelitian ini menyelidiki efek paparan medan elektromagnetik (EMF) 100 μ T dalam waktu lama terhadap jumlah sel darah pada tikus, khususnya berfokus pada neutrofil, monosit, dan limfosit. Hasilnya menunjukkan perubahan signifikan pada populasi sel ini setelah 30 hari paparan ELF-MF, yang menunjukkan dampak potensial pada sistem kekebalan tubuh dan proses inflamasi. Inflamasi ditandai dengan adanya peningkatan jumlah sel pada komponen leukosit (Lee et al., 2018).

Peningkatan jumlah neutrofil yang diamati dari 0,3 pada kelompok kontrol menjadi 0,6 pada kelompok paparan 30 hari menunjukkan peningkatan 100%. Peningkatan neutrofil yang substansial ini sangat penting, karena neutrofil biasanya merupakan penanggap pertama dalam peradangan akut. Sel ini juga memainkan peranan yang penting dalam respons kekebalan tubuh bawaan. Peningkatan jumlah neutrofil telah dikaitkan dengan berbagai kondisi inflamasi dan dapat mengindikasikan proses inflamasi yang sedang berlangsung sebagai respons terhadap paparan ELF-MF. Hasil yang muncul pada penelitian ini berbeda dengan penelitian sejenis yang menyatakan bahwa radiasi ELF-MF tidak memberikan pengaruh pada neutrofil. Penelitian tersebut menggunakan kultur sel dan paparan yang diberikan sebesar 500 μ T selama 30 menit. (Bouwens et al., 2012; Rosado et al., 2018). Berdasarkan penelitian tersebut, dibuktikan bahwa radiasi besar dalam waktu singkat tidak memberikan dampak pada jumlah sel neutrofil. Sebaliknya, paparan dengan dosis yang kecil dalam jangka waktu lama selama 30 hari dapat meningkatkan proliferasi neutrofil.

Jumlah monosit menunjukkan pola yang menarik, dengan sedikit penurunan pada hari ke-15 (1,9667) diikuti dengan peningkatan yang signifikan pada hari ke-30 (3,95) dibandingkan dengan

kelompok kontrol (2,1667%). Peningkatan 82,3% pada monosit setelah 30 hari paparan ELF-MF dapat mengindikasikan respons inflamasi yang tinggi. Monosit, yang dapat terdiferensiasi menjadi makrofag, adalah pemain kunci dalam peradangan akut dan kronis, dan peningkatannya menunjukkan potensi aktivasi sistem kekebalan tubuh jangka panjang (Kratofil et al., 2017).

Jumlah limfosit menunjukkan sedikit peningkatan pada hari ke-15 (97,53%) tetapi kemudian menurun secara signifikan menjadi 95,45% pada hari ke-30, dibandingkan dengan kelompok kontrol (97,53%). Penurunan limfosit sebesar 2,14% ini, meskipun terlihat kecil, dapat memiliki implikasi penting untuk kekebalan adaptif. Limfosit merupakan prekursor terbentuknya sel plasma yang akan mensekresikan antibodi. Kadar limfosit yang turun dapat meningkatnya rasio NLR (*Neutrophil-Lymphocyte Ratio*). Secara umum angka NLR yang tinggi selalu diasosiasikan dengan inflamasi kronis karena adanya stres oksidatif atau kanker. Pada studi ini, penurunan jumlah limfosit mungkin menunjukkan respons stres terhadap paparan EMF yang berkepanjangan (Zahorec, 2021).

Mekanisme yang mendasari perubahan ini mungkin melibatkan perubahan yang diinduksi EMF pada jalur persinyalan sel, stres oksidatif, atau efek langsung pada proses hematopoietik. Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa paparan EMF dapat meningkatkan kadar spesies oksigen reaktif (ROS) yang dapat berkontribusi pada respons inflamasi yang diamati (Hussain et al., 2016; Sho & Xu, 2019).

Meskipun penelitian ini memberikan wawasan tentang efek ELF-MF pada populasi sel darah, penting untuk dicatat keterbatasannya. Periode paparan yang lebih lama akan bermanfaat dan memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap ELF-MF secara kontinu dan kronis. Selain itu, menyelidiki perubahan fungsional pada populasi sel ini dan mengukur penanda inflamasi spesifik akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang respons inflamasi yang diinduksi oleh EMF.

Perubahan yang diamati pada tingkat neutrofil dan monosit, di samping perubahan jumlah limfosit, menunjukkan kemungkinan adanya hubungan antara paparan ELF-MF dan peradangan. ELF-MF diprediksi dapat mempengaruhi jalur stres oksidatif, yang mengarah pada peningkatan produksi spesies oksigen reaktif (ROS). Stres oksidatif ini dapat merusak sel dan jaringan, yang pada gilirannya dapat mengaktifkan sistem kekebalan tubuh dan memicu respons peradangan. Neutrofil dan monosit adalah salah satu sel kekebalan pertama yang merespons sinyal tersebut, menunjukkan bahwa peningkatan kadarnya dalam penelitian ini mungkin merupakan cerminan dari peradangan yang sedang berlangsung.

Paparan kronis terhadap ELF-MF dapat mengganggu homeostasis seluler, yang mengarah ke keadaan peradangan tingkat rendah yang terus-menerus. Hal ini didukung oleh perbedaan signifikan yang diamati pada kelompok paparan 30 hari, yang menunjukkan bahwa durasi paparan ELF-MF yang lebih lama dapat memperkuat proses inflamasi. Jumlah limfosit yang berkurang dapat mencerminkan adaptasi sistem kekebalan tubuh terhadap stres yang sedang berlangsung agar dapat mempertahankan kondisi homeostasis dalam menghadapi paparan radiasi elektromagnetik yang terus menerus.

4. Simpulan

Temuan kami menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik 50Hz:100 μ T dalam waktu lama pada mencit dapat secara signifikan mengubah jumlah sel darah putih pada tikus, yang berpotensi menginduksi kondisi inflamasi. Inflamasi yang berkepanjangan dapat mengarah kepada berbagai penyakit degeneratif. Selama 30 hari paparan ELF-MF dapat meningkatkan jumlah monosit dan neutrofil dan menurunkan jumlah limfosit. Hasil ini menggaris bawahi perlunya penelitian lebih lanjut mengenai efek jangka panjang paparan ELF-MF pada fungsi kekebalan tubuh dan peradangan, yang dapat memiliki implikasi penting bagi kesehatan manusia di lingkungan yang semakin banyak perangkat dengan radiasi elektromagnetik.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LP2M Universitas Jember yang telah memberikan dana melalui hibah internal.

6. Referensi

- Bouwens, M., De Kleijn, S., Ferwerda, G., Cuppen, J. J., Savelkoul, H. F. J., & Kemenade, B. M. L. V. (2012). Low-frequency electromagnetic fields do not alter responses of inflammatory genes and proteins in human monocytes and immune cell lines. *Bioelectromagnetics*, 33(3), 226–237. <https://doi.org/10.1002/bem.20695>
- Dean, L. (2005). *Blood and the cells it contains*. In *Blood Groups and Red Cell Antigens* [Internet]. National Center for Biotechnology Information (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2263/>
- Demaria, S., Coleman, C. N., & Formenti, S. C. (2016). Radiotherapy: Changing the Game in Immunotherapy. *Trends in Cancer*, 2(6), 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.trecan.2016.05.002>
- El-Gohary, O. A., & Said, M. A.-A. (2017). Effect of electromagnetic waves from mobile phone on immune status of male rats: Possible protective role of vitamin D. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 95(2), 151–156. <https://doi.org/10.1139/cjpp-2016-0218>
- Hart, P. H., & Norval, M. (2021). More Than Effects in Skin: Ultraviolet Radiation-Induced Changes in Immune Cells in Human Blood. *Frontiers in Immunology*, 12, 694086. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.694086>
- Hu, Y., Lai, J., Wan, B., Liu, X., Zhang, Y., Zhang, J., Sun, D., Ruan, G., Liu, E., Liu, G.-P., Chen, C., & Wang, D. W. (2016). Long-term exposure to ELF-MF ameliorates cognitive deficits and attenuates tau hyperphosphorylation in 3xTg AD mice. *NeuroToxicology*, 53, 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2016.02.012>
- Hussain, T., Tan, B., Yin, Y., Blachier, F., Tossou, M. C. B., & Rahu, N. (2016). Oxidative Stress and Inflammation: What Polyphenols Can Do for Us? *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016(1), 7432797. <https://doi.org/10.1155/2016/7432797>
- Jeong, W.-Y., Kim, J.-B., Kim, H.-J., & Kim, C.-W. (2017). Extremely low-frequency electromagnetic field promotes astrocytic differentiation of human bone marrow mesenchymal stem cells by modulating SIRT1 expression. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81(7), 1356–1362. <https://doi.org/10.1080/09168451.2017.1308243>
- Kratofil, R. M., Kubes, P., & Deniset, J. F. (2017). *Monocyte Conversion During Inflammation and Injury*. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 37(1), 35–42. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.116.308198>
- Lee, J. S., Kim, N. Y., Na, S. H., Youn, Y. H., & Shin, C. S. (2018). Reference values of neutrophil-lymphocyte ratio, lymphocyte-monocyte ratio, platelet-lymphocyte ratio, and mean platelet volume in healthy adults in South Korea. *Medicine*, 97(26), e11138. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000011138>
- Ma, Q., Chen, C., Deng, P., Zhu, G., Lin, M., Zhang, L., Xu, S., He, M., Lu, Y., Duan, W., Pi, H., Cao, Z., Pei, L., Li, M., Liu, C., Zhang, Y., Zhong, M., Zhou, Z., & Yu, Z. (2016). Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Promote In Vitro Neuronal Differentiation and Neurite Outgrowth of Embryonic Neural Stem Cells via Up-Regulating TRPC1. *PLOS ONE*, 11(3), e0150923. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150923>
- Madjid Ansari, A., Farzampour, S., Sadr, A., Shekarchi, B., & Majidzadeh-A, K. (2016). Effects of short term and long term Extremely Low Frequency Magnetic Field on depressive disorder in mice: Involvement of nitric oxide pathway. *Life Sciences*, 146, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2015.12.055>

- Manser, M., Sater, M. R. A., Schmid, C. D., Noreen, F., Murbach, M., Kuster, N., Schuermann, D., & Schär, P. (2017). ELF-MF exposure affects the robustness of epigenetic programming during granulopoiesis. *Scientific Reports*, 7(1), 43345. <https://doi.org/10.1038/srep43345>
- Mocanu-Dobranici, A.-E., Costache, M., & Dinescu, S. (2023). Insights into the Molecular Mechanisms Regulating Cell Behavior in Response to Magnetic Materials and Magnetic Stimulation in Stem Cell (Neurogenic) Differentiation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2028. <https://doi.org/10.3390/ijms24032028>
- Paniagua, J. M., Rufo, M., Jimenez, A., Pachon, F. T., & Carrero, J. (2015). Exposure estimates based on broadband ELF magnetic field measurements versus the ICNIRP multiple frequency rule. *Radiation Protection Dosimetry*, 163(2), 173–180. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu175>
- Pedoman Uji Toksisitas Nonklinik Secara In Vivo, 7, Pengawas Obat dan Makanan (2014). <https://standar-otskk.pom.go.id/storage/uploads/bde1e064-fb2e-4fcc-bc3f-b267491b3a0b/Perka-BPOM-No.7-Tahun-2014.pdf>
- Portillo, F., Alcayde, A., García, R. M., Novas, N., Gázquez, J. A., & Fernández-Ros, M. (2022). Grid Frequency Measurement through a PLHR Analysis Obtained from an ELF Magnetometer. *Sensors*, 22(8), 2954. <https://doi.org/10.3390/s22082954>
- Rosado, M. M., Simkó, M., Mattsson, M.-O., & Pioli, C. (2018). Immune-Modulating Perspectives for Low Frequency Electromagnetic Fields in Innate Immunity. *Frontiers in Public Health*, 6, 85. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00085>
- Safavi, A. S., Sendera, A., Haghighipour, N., & Banas-Zabczyk, A. (2022). The Role of Low-Frequency Electromagnetic Fields on Mesenchymal Stem Cells Differentiation: A Systematic Review. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 19(6), 1147–1160. <https://doi.org/10.1007/s13770-022-00473-1>
- Schuermann, D., & Mevissen, M. (2021). Manmade Electromagnetic Fields and Oxidative Stress—Biological Effects and Consequences for Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3772. <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>
- Sho, T., & Xu, J. (2019). Role and mechanism of ROS scavengers in alleviating NLRP3-mediated inflammation. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 66(1), 4–13. <https://doi.org/10.1002/bab.1700>
- Sudarti, Sudarti, Prihandono, Trapsilo, & Restanti, Revi. (2024). Potential Impact of Anemia on BALB/c Mice Exposed to an Extremely Low Frequency 50 Hz Magnetic Field with an Intensity of 100 μ T and 500 μ T.
- Vallabhajosula, S., & Mustafa, S. (2006). *The Cell: Structure, Function, and Molecular Biology*. In A. H. Elgazzar (Ed.), *The Pathophysiologic Basis of Nuclear Medicine* (pp. 1–28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47953-6_1
- WHO, W. (2016, August 4). *Radiation: Electromagnetic fields. Radiation: Electromagnetic Fields*. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields>
- Yao, C., Zhao, L., & Peng, R. (2022). The biological effects of electromagnetic exposure on immune cells and potential mechanisms. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 41(1), 108–117. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.2001651>
- Zahorec, R. (2021). Neutrophil-to-lymphocyte ratio, past, present and future perspectives. *Bratislava Medical Journal*, 122(07), 474–488. https://doi.org/10.4149/BLL_2021_078