

Pengaruh Lama Paparan Radiasi Medan Elektromagnetik ELF Intensitas 500 μ T Terhadap Morfologi dan Populasi Spermatozoa Mencit Balb/C

Effect of Long Exposure to ELF Electromagnetic Field Radiation Intensity 500 μ T on Morphology and Spermatozoa Population of Balb/C Mice

Moza Oriana Rahmadinanti¹, Firdha Kusuma Ayu Anggraeni¹, Sudarti¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur, Indonesia 68121

Email: *firdhakusuma@unej.ac.id; sudarti.fkip@unej.ac.id

Received: 06th May 2025; Revised: 02nd June 2025; Accepted: 01st July 2025

Abstrak – Seiring perkembangan zaman, pemanfaatan radiasi medan elektromagnetik ELF, yang memiliki frekuensi yang sangat rendah sebesar 0-300 Hz semakin luas. Dampaknya terhadap spermatozoa masih kontradiktif dan perlu dikaji lebih lanjut. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh lama paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. Penelitian ini menggunakan jenis penelitian true experimental design dengan desain pretest-posttest control group design. Terdapat beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini. Salah satunya yaitu generator ELF sebagai alat penghasil medan elektromagnetik ELF. Metode yang digunakan dalam pengambilan sampel spermatozoa mencit yaitu pewarnaan eosin dan haemocytometer. Paparan medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T dilakukan secara intermiten yaitu 15 dan 60 menit, dalam dua kali sehari, dan diberikan selama 5 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik ELF tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap populasi spermatozoa mencit Balb/C, namun berpengaruh secara signifikan terhadap morfologi spermatozoa. Pengaruh medan magnet dan medan listrik terhadap populasi dan morfologi spermatozoa tersebut memiliki perbedaan, yaitu medan listrik berpengaruh lebih dominan pada populasi dan morfologi spermatozoa abnormal, sedangkan medan magnet berpengaruh lebih dominan pada morfologi spermatozoa normal.

Kata kunci: Elektromagnetik; ELF; populasi spermatozoa; morfologi spermatozoa; mencit Balb/C.

Abstract – Along with the era of development, the use of Extremely Low Frequency (ELF) electromagnetic field radiation, which has a very low frequency of 0-300 Hz, is increasingly widespread. Its impact on spermatozoa remains contradictory and requires further study. Therefore, this study aims to examine the effect of long-term exposure to ELF electromagnetic field radiation with an intensity of 500 μ T on the population and morphology of Balb/C mice spermatozoa. This study uses a true experimental design with a pretest-posttest control group design. There are several tools used in this research. One of them is the ELF generator as an ELF electromagnetic field generating device. The method used in sampling mice spermatozoa is eosin staining and haemocytometer. Exposure to ELF electromagnetic fields with an intensity of 500 μ T was carried out intermittently, namely 15 and 60 minutes, twice a day, and given for 5 days. The results showed that exposure to the ELF electromagnetic field did not have a significant effect on the population of Balb/C mice spermatozoa, but had a significant effect on spermatozoa morphology. The effect of magnetic fields and electric fields on the population and morphology of spermatozoa differs; namely, the electric field has a more dominant effect on the population and morphology of abnormal spermatozoa, while the magnetic field has a more dominant effect on the morphology of normal spermatozoa.

Keywords: Electromagnetic; ELF; spermatozoa population; spermatozoa morphology; Balb/C mice.

1. Pendahuluan

Pesatnya perkembangan teknologi pada zaman sekarang menjadikan penggunaan listrik ataupun alat-alat elektronik listrik terus meningkat yang mengakibatkan kebutuhan listrik menjadi semakin besar dalam kehidupan sehari-hari. Alat-alat elektronik akan menghasilkan medan magnet apabila terdapat arus listrik [1]. Adanya medan magnet dan medan listrik merupakan komponen dari gelombang elektromagnetik. *Extremely Low Frequency* (ELF) merupakan salah satu spektrum gelombang elektromagnetik dengan frekuensi yang sangat rendah yaitu 0 - 300 Hz yang juga tergambar oleh Instansi Pemerintahan Amerika seperti NASA [2]. Radiasi medan elektromagnetik ELF memiliki sifat non pengion atau non ionizing, dimana medan magnet tidak memberikan efek terjadinya ionisasi saat medan magnet ELF mampu menembus hampir semua materi [3]. Efek non termal dapat terjadi karena medan magnet ELF pada frekuensi rendah saat pengaplikasian. Hal tersebut menjadikan tidak adanya perubahan suhu apabila saat berinteraksi atau menginduksi [2].

Menurut hasil penelitian, radiasi medan elektromagnetik ELF berpengaruh terhadap kesehatan manusia dan hewan seperti gangguan sistem saraf, gangguan sistem kekebalan tubuh, peningkatan resiko kanker, gangguan reproduksi, masalah pada otak, dan lain-lain [4]. Pada gangguan reproduksi, khususnya pada sistem reproduksi jantan yaitu testis yang berfungsi untuk menghasilkan spermatozoa. Spermatozoa adalah sel tunggal yang padat dan tidak memiliki kemampuan untuk berkembang atau membelah. Sel-sel ini diproduksi di testis melalui proses spermatogenesis. Morfologi spermatozoa yang normal biasanya memiliki bentuk oval dengan midpiece yang ramping dan ekor yang jelas batasnya. Di sisi lain, spermatozoa dianggap abnormal apabila terdapat penyimpangan dari spermatozoa normal, baik kepala, leher, midpiece, atau ekor [5]. Jumlah spermatozoa pada mencit yaitu sebesar $\pm 20-50$ juta/ml [6]. Morfologi dan jumlah spermatozoa dapat menjadi faktor yang mempengaruhi keberhasilan reproduksi ataupun kualitas spermatozoa [7]. Mencit mempunyai kemiripan dengan struktur anatomi dan fisiologi manusia, sehingga sering digunakan dalam penelitian [8]. Oleh karena itu, mencit Balb/C digunakan sebagai sampel penelitian.

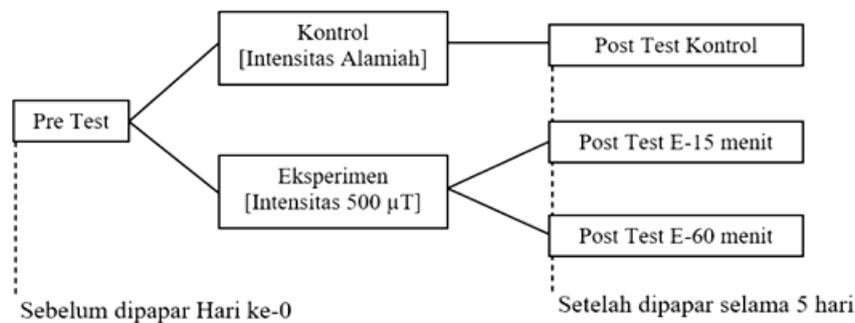
Berdasarkan hasil riset selama ini tentang ELF terhadap sistem reproduksi khususnya populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C masih kontradiktif. Terdapat hasil riset tentang radiasi medan elektromagnetik ELF terhadap sistem reproduksi menunjukkan hasil negatif, seperti pada penelitian dengan intensitas 500 μT selama 24 jam/hari selama 21 hari. Dapat mengalami stress oksidatif yang mengakibatkan peroksidasi lipid serta peningkatan produksi ROS yang dapat merusak DNA sperma bahkan juga morfologi sperma [9]. Paparan medan elektromagnetik intensitas 1 mT selama 2 jam memiliki perubahan signifikan. Hasil yang didapatkan menyebabkan perubahan terhadap motilitas, morfologi, dan produksi ROS pada spermatozoa [10]. Di samping itu, terdapat riset yang menunjukkan hasil positif yaitu selama 1 jam/hari selama 7 hari dengan medan EMF intensitas 1 mT dapat memberikan efek perlindungan atau adaptasi terhadap stress dimana hal ini juga berdampak positif pada spermatozoa termasuk peningkatan viabilitas, motilitas, dan kemampuan fertilisasi, serta pengurangan risiko kerusakan DNA dan apoptosis [11].

Penelitian ini dilakukan dengan medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μT dengan lama paparan secara intermiten yaitu 15 dan 60 menit dua kali sehari selama 5 hari. Adanya penelitian sebelumnya mengenai radiasi gelombang elektromagnetik secara kontinyu dapat berpengaruh negatif terhadap perkembangan sel [12]. Strategi paparan secara intermiten dapat meningkatkan efek positif [13]. Maka dari itu, penelitian ini dilakukan secara intermiten memperoleh hasil pengaruh positif. Intensitas rendah berpengaruh pada sel, terlebih lagi intensitas tinggi memiliki potensi lebih besar untuk memengaruhi perkembangan sel. Oleh karena itu, intensitas 500 μT dipilih berdasarkan rekomendasi dari badan kesehatan dunia, *World Health Organization* (WHO) nilai ambang batas paparan yang aman yaitu 500 μT bagi pekerja atau sekitar perindustrian secara terus menerus. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh lama paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μT terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C, serta mengkaji pengaruh medan listrik dan medan magnet terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C.

2. Metode Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di beberapa lokasi di Universitas Jember. Pemeliharaan mencit Balb/C bertempat di Laboratorium Hewan Fakultas Kedokteran Gigi. Pemaparan mencit bertempat di Laboratorium ELF Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan. Pengambilan dan pengukuran

sampel dilakukan di Laboratorium Zoologi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan. Waktu paparan yaitu 15 dan 60 menit dalam dua kali sehari, dilakukan selama 5 hari. Sampel berjumlah 28 ekor, berjenis kelamin jantan, usia ± 2 bulan, berat badan 20-30 g, aktif, sehat, dan tidak cacat secara fisik. Terdapat beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sumber paparan medan magnet ELF berupa generator ELF, Elektromagnetik Field Tester (EMF Tester), latex, kandang plastik, alat penanda mencit (tangging), neraca, mikroskop, dan papan bedah. Selain itu juga terdapat alat-alat untuk mempersiapkan sampel yaitu wadah plastik, tissue, stiker kertas label, dan lainnya. Metode pengambilan sampel spermatozoa yaitu pewarnaan eosin dan *haemocytometer* menggunakan mikroskop IRIS-4 dan kamera Optilab. Penelitian ini menggunakan jenis penelitian *true experimental design* dengan desain yaitu *pretest-posttest control group design*. Desain penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



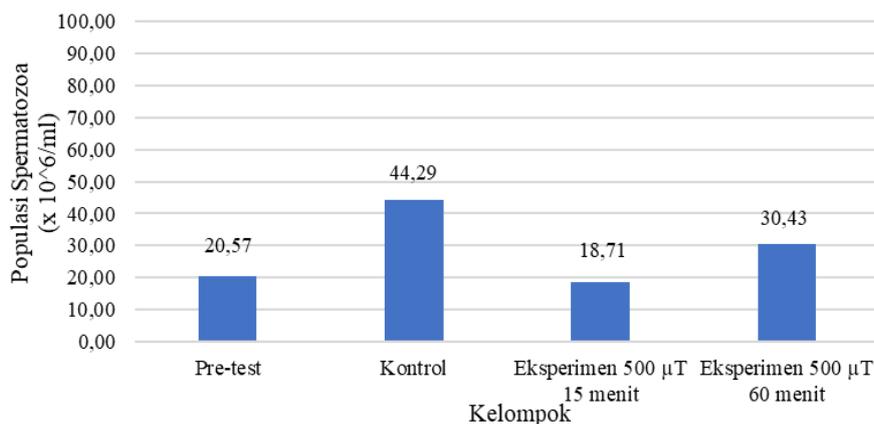
Gambar 1. Desain penelitian.

Berdasarkan Gambar 1. data penelitian ini terdiri dari empat kelompok, yaitu: *pre-test* adalah data sampel kelompok sebelum diberikan paparan pada hari ke-0; *post-test* Kontrol adalah data sampel kelompok kontrol setelah dipapar medan elektromagnetik alamiah pada hari ke-5; Post-Test E-15 menit adalah data sampel dari kelompok eksperimen yang dipapar medan elektromagnetik ELF dengan intensitas 500 μT selama 15 menit pada hari ke-5; dan Post-Test E-60 menit adalah data sampel dari kelompok eksperimen yang dipapar EM-ELF 500 μT selama 60 menit pada hari ke-5.

Pengukuran populasi dan morfologi spermatozoa mencit pada kelompok *pre-test* dilakukan sebelum diberi perlakuan yaitu hari ke-0. Pada kelompok *post-test* terdapat 3 kelompok yaitu kontrol dengan intensitas alamiah, eksperimen 500 μT secara intermiten 15 menit, dan eksperimen 500 μT secara intermiten 60 menit. Pada kelompok *post-test* pengukuran dilakukan setelah dilakukan pemaparan setelah 5 hari. Data hasil pengukuran tersebut dianalisis dengan uji *one way anova* apabila data berdistribusi normal atau uji *Kruskall Wallis* apabila tidak berdistribusi normal. Uji *one way anova* dilakukan untuk mengetahui pengaruh lama paparan medan elektromagnetik terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh medan listrik dan medan magnet terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C menggunakan uji *regresi linier berganda*.

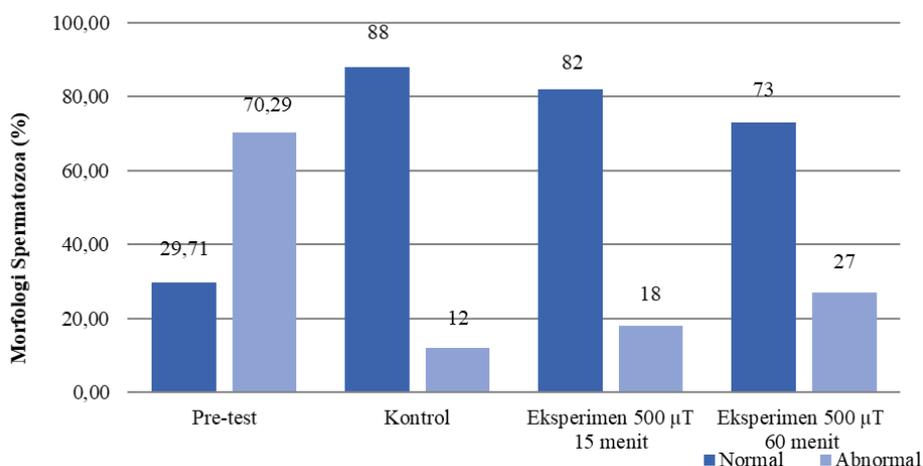
3. Hasil Dan Pembahasan

Paparan radiasi medan elektromagnetik ELF diperoleh dari alat generator ELF yang menghasilkan intensitas sebesar 500 μT . Data yang digunakan pada penelitian ini difokuskan pada populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. populasi dan morfologi merupakan salah satu parameter yang dapat menentukan kualitas sperma dan proses fertilisasi. Pengaruh paparan medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μT secara intermiten 15 menit dan 60 menit selama 5 hari terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram nilai rata-rata populasi spermatozoa mencit Balb/C.

Berdasarkan Gambar 2. hasil rata-rata populasi spermatozoa yang menunjukkan bahwa nilai maksimum populasi spermatozoa dimiliki oleh kelompok kontrol, sedangkan nilai minimum dimiliki oleh kelompok eksperimen. Nilai rata-rata populasi spermatozoa kelompok eksperimen 500 μT 15 menit dibandingkan dengan kelompok kontrol mengalami penurunan yang memiliki nilai sebesar 18,71 $\times 10^6/\text{ml}$. Sedangkan kelompok eksperimen 500 μT 60 menit memiliki nilai lebih besar dibandingkan kelompok eksperimen 500 μT 15 menit, tetapi juga memiliki nilai lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol yaitu sebesar 30,43 $\times 10^6/\text{ml}$. Sehingga menunjukkan bahwa semakin rendah lama paparan medan elektromagnetik ELF dapat mempengaruhi penurunan populasi spermatozoa mencit Balb/C. Sedangkan hasil rerata morfologi spermatozoa dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram nilai rata-rata morfologi spermatozoa mencit Balb/C.

Berdasarkan Gambar 3. Terdapat nilai rata-rata morfologi normal dan abnormal. Pada gambar tersebut, morfologi normal dapat dilihat bahwa kelompok kontrol memiliki nilai paling tinggi dibandingkan kelompok yang lain yaitu sebesar 88% dan kelompok *pre-test* memiliki nilai paling rendah yaitu sebesar 29,71%. Nilai rata-rata morfologi spermatozoa normal kelompok *pre-test* mengalami penurunan apabila dibandingkan dengan kelompok kontrol dan eksperimen. Nilai rata-rata kelompok eksperimen lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol. Dimana nilai rata-rata morfologi spermatozoa normal kelompok eksperimen 500 μT 15 menit sebesar 82% mengalami penurunan dibandingkan kelompok kontrol, tetapi mengalami kenaikan apabila dibandingkan dengan nilai kelompok eksperimen 500 μT 60 menit yaitu sebesar 73%. Hal tersebut menunjukkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μT dengan lama paparan yang lebih tinggi berpengaruh terhadap penurunan morfologi spermatozoa normal mencit Balb/C.

Sementara itu, morfologi abnormal menunjukkan bahwa nilai rata-rata kelompok kontrol sebesar 12% adalah nilai minimum dan nilai rata-rata kelompok eksperimen 500 μT 60 menit sebesar 27% adalah nilai maksimum. Pada kelompok eksperimen mengalami kenaikan apabila dibandingkan dengan

kelompok kontrol. Nilai rata-rata kelompok eksperimen 500 μ T 15 menit sebesar 18% mengalami kenaikan dibandingkan kelompok kontrol yaitu sebesar 12%, sedangkan kelompok eksperimen 500 μ T 60 menit sebesar 27% juga mengalami kenaikan dibandingkan kelompok kontrol. Nilai rata-rata morfologi spermatozoa abnormal kelompok eksperimen 500 μ T 60 menit lebih tinggi dibandingkan kelompok eksperimen 500 μ T 15 menit. Hal ini menunjukkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T dengan lama paparan semakin tinggi akan berpengaruh terhadap kenaikan morfologi spermatozoa abnormal mencit Balb/C.

3.1 Analisis data

Paparan radiasi medan elektromagnetik ELF berpengaruh terhadap populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C berdasarkan deskripsi data hasil pengukuran populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. Penelitian ini menggunakan Software IBM SPSS Statistic 24 dengan uji analisis *one way anova* apabila data berdistribusi normal dengan nilai signifikansi $p > 0,05$. *one way anova* digunakan untuk mendapatkan informasi tentang pengaruh signifikan dalam penelitian. Apabila data tidak berdistribusi normal maka menggunakan uji *Kruskal Wallis* dengan nilai signifikansi $p < 0,05$. Proses pertama dalam analisis data yang dilakukan yaitu analisis uji normalitas menggunakan uji *Shapiro-Wilk*. Penelitian ini tidak menggunakan uji normalitas *Kolmogorov-Smirnov*, tetapi menggunakan uji *Shapiro-Wilk* karena jumlah sampel data yang digunakan berjumlah kurang dari 50 mencit Balb/C. Jumlah sampel pada penelitian ini sebanyak 28 ekor mencit Balb/C. Selain itu juga menggunakan uji *regresi linier berganda* untuk mendapatkan informasi seberapa besar pengaruh lebih dari satu variabel independen terhadap variabel dependen.

Hasil uji normalitas uji *Shapiro-Wilk* pada populasi spermatozoa dengan nilai Sig. yaitu kelompok *pre-test* sebesar 0,176, kelompok kontrol sebesar 0,583, kelompok eksperimen 15 menit sebesar 0,536, dan kelompok eksperimen 60 menit sebesar 0,249. Dari hasil tersebut diperoleh semua kelompok memperoleh nilai Sig. $> 0,05$ yang disimpulkan bahwa data berdistribusi normal. Maka selanjutnya dilakukan uji *one way anova* dengan hasil uji yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Uji *one way anova* populasi spermatozoa mencit Balb/C.

ANOVA					
populasi_sperma					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2880,714	3	960,238	2,814	0,061
Within Groups	8188,286	24	341,179		
Total	11069,000	27			

Tabel 1. menunjukkan bahwa hasil uji *one way anova* populasi spermatozoa mencit Balb/C menyatakan nilai Sig. 0,061 dan $F = 2,814$. Hasil data uji *one way anova* memiliki nilai sig. 0,061 $> 0,05$ maka hipotesis nol (H_0) diterima dan hipotesis alternatif (H_a) ditolak. Hal tersebut berarti tidak terdapat perbedaan signifikan populasi spermatozoa mencit Balb/C antar kelompok. Maka dapat disimpulkan bahwa paparan medan elektromagnetik ELF tidak berpengaruh signifikan terhadap populasi spermatozoa mencit Balb/C.

Selanjutnya, hasil uji normalitas uji *Shapiro-Wilk* pada morfologi spermatozoa normal dan abnormal dengan nilai Sig. yaitu kelompok *pre-test* sebesar 0,837, kelompok kontrol sebesar 0,721, kelompok eksperimen 15 menit sebesar 0,016, dan kelompok eksperimen 60 menit sebesar 0,507. Dari hasil tersebut kelompok eksperimen 15 menit diperoleh nilai Sig. $< 0,05$, sedangkan kelompok lain diperoleh nilai Sig. $> 0,05$. Dapat disimpulkan bahwa data tidak berdistribusi normal karena terdapat satu kelompok yang memiliki nilai Sig. $< 0,05$. Maka selanjutnya dilakukan uji *Kruskal Wallis* dengan hasil uji seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. menunjukkan bahwa hasil uji *Kruskal Wallis* morfologi spermatozoa normal dan abnormal mencit Balb/C memperoleh nilai Asymp. Sig. 0,001 $< 0,05$. Dimana dari hasil data tersebut nilai Asymp. Sig. $< 0,05$ yang berarti hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_a) diterima. Sehingga terdapat perbedaan signifikan morfologi spermatozoa normal mencit Balb/C antar kelompok. Dapat disimpulkan bahwa paparan medan elektromagnetik ELF tidak berpengaruh signifikan terhadap

morfologi normal dan abnormal spermatozoa mencit Balb/C. Berikut merupakan hasil uji *regresi linier berganda* terhadap populasi spermatozoa dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Y = 25,457 - 0,243 X_1 + 4,662 X_2$$

Dimana Y = populasi spermatozoa, X₁ = medan magnet, dan X₂ = medan listrik.

Tabel 2. Uji *Kruskal Wallis* Morfologi Spermatozoa Mencit Balb/C.

Test Statistics ^{a,b}	
Morfologi_sperma	
Kruskal-Wallis H	16,603
df	3
Asymp. Sig.	0,001

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: kelompok

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai koefisien -0,243 untuk X₁ berarti bahwa medan magnet memiliki kontribusi negatif. Koefisien 4,662 untuk X₂ berarti bahwa medan listrik memiliki kontribusi positif. Pada hasil uji *regresi linier berganda* ini memperoleh nilai R² yaitu 0,135. Hasil uji *regresi linier berganda* terhadap morfologi spermatozoa normal dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Y = 61,609 + 0,132 X_1 - 1,905 X_2$$

Dimana Y = morfologi spermatozoa normal, X₁ = medan magnet, dan X₂ = medan listrik.

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai koefisien 0,132 untuk X₁ berarti bahwa medan magnet memiliki kontribusi positif. Koefisien -1,905 untuk X₂ berarti bahwa medan listrik memiliki kontribusi negatif. Pada hasil uji *regresi linier berganda* ini memperoleh nilai R² yaitu 0,141. Sedangkan hasil uji *regresi linier berganda* terhadap morfologi spermatozoa abnormal dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Y = 38,391 - 0,132 X_1 + 1,905 X_2$$

Dimana Y = morfologi spermatozoa abnormal, X₁ = medan magnet, dan X₂ = medan listrik.

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai koefisien -0,132 untuk X₁ berarti bahwa medan magnet memiliki kontribusi negatif. Koefisien 1,905 untuk X₂ berarti bahwa medan listrik memiliki kontribusi positif. Pada hasil uji *regresi linier berganda* ini memperoleh nilai R² yaitu 0,141.

3.2 Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh lama paparan radiasi medan elektromagnetik ELF terhadap morfologi dan populasi spermatozoa mencit Balb/C dengan intensitas 500 μ T dan lama paparan 15 dan 60 menit dua kali sehari selama 5 hari. Sampel penelitian ini menggunakan hewan coba mencit Balb/C jantan. Mencit yang digunakan dalam penelitian berjumlah 28 ekor dengan usia sekitar 2 bulan dan secara fisik tampak sehat, lincah, serta tidak cacat. Data yang diambil yaitu spermatozoa dari epididimis mencit Balb/C. Salah satu parameter kualitas sperma yaitu populasi dan morfologi spermatozoa [7]. Paparan radiasi memiliki dampak negatif terhadap sistem reproduksi pria, terutama dalam proses pembentukan sperma [6]. Radiasi elektromagnetik berisiko merusak jaringan testis, menghambat produksi hormon testosteron, serta mengganggu spermatogenesis. Selain itu, radiasi elektromagnetik dapat mempengaruhi kualitas sperma seperti penurunan kesuburan dan potensi kemandulan [14]. Pada penelitian ini salah satu faktor yang diamati terhadap kualitas sperma yaitu populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. Kualitas sperma dapat menjadi parameter keberhasilan fertilisasi. Sperma yang dianggap infertil memiliki populasi sperma kurang dari 20 juta/ml, dimana populasi normal sperma berkisar \pm 20-50 juta/ml. Sedangkan untuk morfologi sperma dianggap fertil apabila jumlah sperma abnormal < 40% [6].

Berdasarkan hasil penelitian ini, paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T 15 dan 60 menit menyebabkan penurunan populasi spermatozoa mencit dibandingkan dengan kelompok kontrol dengan paparan medan alamiah. Kelompok kontrol mengalami kenaikan 23,72 juta/ml dibandingkan kelompok *pre-test*. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya maturasi sel. Kelompok eksperimen 500 μ T 15 menit mengalami penurunan dibandingkan kelompok *pre-test* dan kontrol.

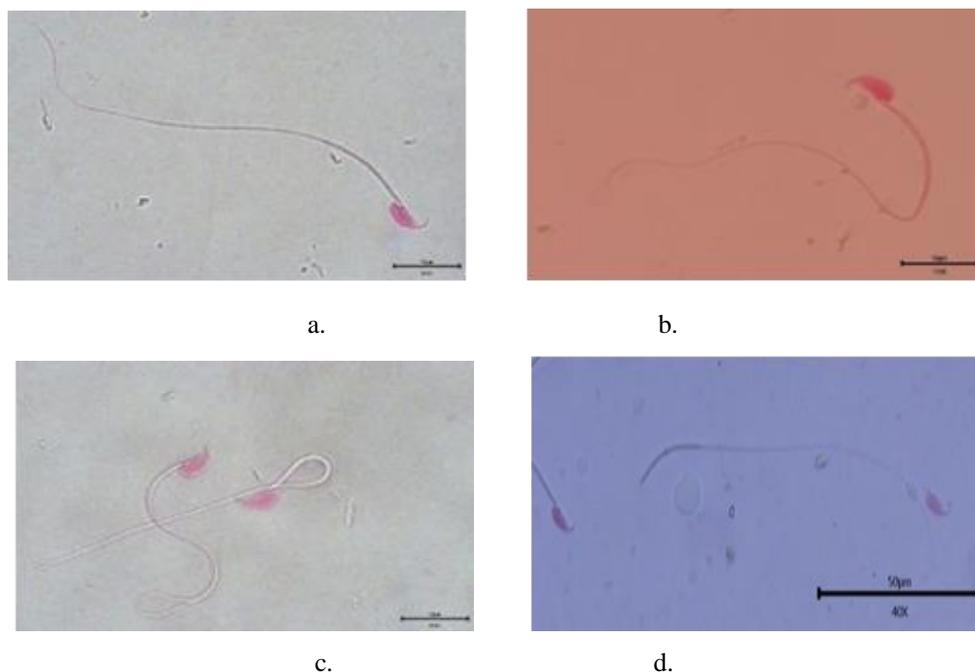
Sedangkan kelompok eksperimen 500 μ T 60 menit mengalami kenaikan dibandingkan kelompok *pre-test* dan eksperimen 500 μ T 15 menit, tetapi mengalami penurunan dari kelompok kontrol. Dapat dilihat bahwa paparan medan elektromagnetik ELF berpengaruh menurunkan jumlah populasi spermatozoa. Namun, lama paparan yang lebih tinggi dapat berpengaruh terhadap peningkatan populasi spermatozoa. Hasil uji *one way anova* nilai signifikansi (Sig.) antar kelompok pada populasi spermatozoa mencit Balb/C menunjukkan nilai $0,061 > 0,05$ yang berarti tidak terdapat perbedaan signifikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF memiliki pengaruh terhadap penurunan rata-rata populasi spermatozoa mencit Balb/C, tetapi dalam statistik tidak terdapat perbedaan signifikan antar kelompoknya. Selain itu, kondisi fisik lingkungan, seperti suhu dan kelembaban yang melebihi nilai normal, juga dapat berpengaruh terhadap populasi spermatozoa. Hal tersebut akan menjadikan mencit mengalami stress oksidatif maupun gangguan hormon yang berpengaruh terhadap populasi spermatozoa mencit Balb/C [15].

Pada pengamatan morfologi spermatozoa mencit, kelompok eksperimen paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T 15 dan 60 menit dibandingkan dengan kelompok kontrol yang terpapar medan alamiah mengalami penurunan jumlah spermatozoa normal mencit. Kelompok eksperimen dan kelompok kontrol mengalami kenaikan dibandingkan dengan kelompok *pre-test*. Pada hasil spermatozoa abnormal, paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μ T 15 dan 60 menit menyebabkan kenaikan jumlah spermatozoa abnormal mencit dibandingkan kelompok kontrol. Kelompok *pre-test* memiliki jumlah spermatozoa abnormal paling tinggi apabila dibandingkan dengan kelompok kontrol dan eksperimen. Dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF dengan lama paparan yang tinggi dapat mempengaruhi penurunan jumlah spermatozoa normal dan kenaikan jumlah spermatozoa abnormal. Jumlah spermatozoa normal yang dianggap fertil yaitu $> 60\%$ dan jumlah spermatozoa abnormal $< 40\%$ [6]. Hal tersebut dapat dilihat bahwa meskipun spermatozoa diberi paparan radiasi medan elektromagnetik ELF, tetapi jumlah spermatozoa normal dan abnormal masih dianggap fertil. Berdasarkan hasil uji normalitas pada morfologi spermatozoa normal dan abnormal mencit Balb/C memiliki hasil yang sama. Lalu, dilanjutkan dengan uji *Kruskall Wallis* nilai signifikansi (Sig.) antar kelompok pada morfologi spermatozoa normal dan abnormal mencit Balb/C menunjukkan nilai sebesar $0,001 < 0,05$ dimana memiliki arti terdapat perbedaan signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF memiliki pengaruh terhadap rata-rata morfologi spermatozoa mencit Balb/C.

Berdasarkan hasil uji *regresi linier berganda* untuk menentukan pengaruh medan listrik dan medan magnet terhadap populasi spermatozoa menunjukkan bahwa medan listrik yang berpengaruh dominan dibandingkan medan magnet. Terhadap morfologi spermatozoa normal menunjukkan bahwa medan magnet berpengaruh dominan dibandingkan medan listrik. Sedangkan terhadap morfologi spermatozoa abnormal menunjukkan bahwa medan listrik berpengaruh dominan dibandingkan medan magnet. Nilai kontribusi pengaruh medan magnet dan medan listrik dapat dilihat dari nilai R^2 . Medan magnet dan medan listrik pada populasi spermatozoa berpengaruh sebesar 13,5%. Pada morfologi spermatozoa normal dan abnormal berpengaruh sebesar 14,1%. Sehingga terdapat sisa persentase pada populasi spermatozoa dan morfologi spermatozoa sebesar 86,5% dan 85,9%. Dimana persentase tersebut merupakan adanya pengaruh dari faktor lain selain medan magnet dan medan listrik. Adanya pengaruh dari faktor lain seperti kondisi fisik lingkungan, kesehatan biologis, maupun pola makan atau pengelolaan nutrisi.

Tidak hanya pengukuran morfologi spermatozoa, tetapi juga dilakukan pengamatan morfologi spermatozoa dengan pewarnaan eosin untuk melihat morfologi spermatozoa normal dan abnormal. Lalu diamati menggunakan mikroskop IRIS-4 dan di foto dengan kamera Optilab yang terhubung dengan laptop. Selanjutnya, melakukan pengamatan dengan membandingkan bentuk morfologi spermatozoa dengan literatur terkait abnormalitas spermatozoa. Gambar 4 memperlihatkan hasil pengamatan morfologi spermatozoa normal dan abnormal mencit Balb/C yang diberi perlakuan paparan radiasi medan elektromagnetik ELF.

Gambar 4 menunjukkan bahwa terdapat morfologi spermatozoa normal dan abnormal yang teramati pada mencit Balb/C. Morfologi spermatozoa normal ditunjukkan pada Gambar 4a dengan morfologi yang lengkap dan sesuai seperti kepala berbentuk kait, serta badan dan ekor yang lurus memanjang. Morfologi spermatozoa abnormal teramati 3 jenis yaitu, spermatozoa ekor melingkar diperlihatkan pada Gambar 4b, spermatozoa badan bengkok dan melilit/melingkar yaitu pada Gambar 4c, dan spermatozoa tanpa kepala (kepala putus) yaitu pada Gambar 4d.



Gambar 4. Hasil pengamatan morfologi spermatozoa mencit Balb/C.

Paparan radiasi medan elektromagnetik ELF dapat menginduksi arus listrik dalam jaringan biologis, termasuk spermatozoa. Arus ini dapat mengubah potensial membran sel dan mempengaruhi saluran ion, terutama yang berkaitan dengan ion kalsium. Perubahan dalam aliran ion ini dapat mempengaruhi proses fisiologis penting dalam spermatozoa. Gangguan dalam proses tersebut dapat menyebabkan perubahan morfologi dan penurunan populasi spermatozoa. Selain itu, paparan radiasi medan elektromagnetik ELF dapat meningkatkan produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) [16]. ROS dapat berasal dari sumber eksogen maupun endogen, yang berpotensi merusak berbagai molekul serta komponen spermatozoa, sebuah sel dengan tingkat polarisasi yang tinggi. Keberadaan ROS ini dapat menghasilkan keuntungan dan kerugian. ROS dalam jumlah kecil memiliki manfaat fungsional seperti memicu kapasitas sperma, mengatur proses pematangan, dan meningkatkan jalur pensinyalan seluler. Namun, jika ROS terlalu tinggi, dampaknya bisa berlawanan yaitu dapat mengganggu fungsi sperma yang dapat menyebabkan infertilitas [6]. Bahkan, kelebihan ROS juga menyebabkan stress oksidatif yang mengakibatkan peroksidasi lipid serta dapat merusak DNA sperma [9].

Paparan radiasi medan elektromagnetik ELF intensitas 500 μT dengan lama paparan secara intermiten 15 dan 60 menit dalam dua kali sehari selama 5 hari dapat mempengaruhi populasi dan morfologi spermatozoa mencit Balb/C. Terdapat beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik ELF mengakibatkan perubahan morfologi spermatozoa [7]. Penelitian lain menunjukkan penurunan jumlah spermatosit yang dapat berpengaruh terhadap penurunan populasi spermatozoa [17]. Penurunan populasi dan jumlah spermatozoa normal serta kenaikan jumlah spermatozoa abnormal pada penelitian ini dapat berpotensi mempengaruhi kualitas sperma yang dapat mengalami *infertil* [18]. Pada hasil pengukuran populasi spermatozoa yang terkena paparan selama 15 menit menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda dengan jumlah populasi normal, maka spermatozoa dianggap *infertil* karena memiliki populasi spermatozoa sebesar 18,71 juta/ml < 20 juta/ml [6]. Sedangkan populasi spermatozoa yang terkena paparan radiasi elektromagnetik ELF 500 μT 60 menit menunjukkan nilai yang berkisar nilai normal, maka masih dianggap sperma *fertil*.

Selanjutnya, pada hasil pengukuran morfologi spermatozoa normal yang terkena paparan radiasi elektromagnetik ELF 500 μT selama 15 dan 60 menit berturut-turut menunjukkan presentase 82% dan 73%. Pada morfologi spermatozoa abnormal menunjukkan presentase 18% dan 27%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sperma tersebut masih dianggap *fertil* dikarenakan jumlah sperma abnormal < 40% [6]. Hal tersebut menunjukkan bahwa paparan radiasi medan elektromagnetik ELF dengan intensitas 500 μT berdasarkan pedoman yang ditetapkan oleh *World Health Organization* (WHO) dianggap masih aman dan tidak membahayakan bagi masyarakat dan pekerja yang berada di sekitar paparan medan elektromagnetik.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah, bahwa paparan medan elektromagnetik ELF dengan intensitas 500 μ T yang diaplikasikan secara intermiten yaitu 15 dan 60 menit dalam dua kali sehari dan dilakukan selama 5 hari, tidak berpengaruh signifikan terhadap populasi spermatozoa mencit Balb/C. Tetapi paparan tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap morfologi spermatozoa mencit. Lama paparan menjadi faktor dominan dalam perubahan yang mempengaruhi populasi dan morfologi spermatozoa. Medan magnet dan medan listrik berpengaruh terhadap populasi dan morfologi spermatozoa, yaitu medan listrik berpengaruh lebih dominan pada populasi dan morfologi spermatozoa abnormal, sedangkan medan magnet berpengaruh lebih dominan pada morfologi spermatozoa normal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak Laboratorium Hewan Fakultas Kedokteran Gigi, Laboratorium ELF Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, dan Laboratorium Zoologi Pendidikan Biologi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember yang telah mengizinkan dan memberi kesempatan untuk melakukan penelitian. Serta kepada Dosen Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember yang telah membimbing dalam pelaksanaan penelitian ini.

Pustaka

- [1] Kanza N.R.F., Sudarti, dan Maryani, Pengaruh Paparan Medan Magnet Extremely Low Frequency (ELF) Terhadap Ph Dan Daya Hantar Listrik Pada Proses Fermentasi Basah Kopi Liberika (*Coffea Liberica*) Dengan Penambahan A-Amilase, *Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 6, no. 2, 2020, pp. 315-321.
- [2] Rahman R.A. dan Sudarti, Pengaruh Paparan Medan Magnet Extremely Low Frequency (ELF) 500 μ T Terhadap Derajat Keasaman (Ph), Massa Jenis, dan Kualitas Fisik Jambu Air, *Jurnal Inovasi Penelitian dan Pembelajaran Fisika (JIPPF)*, vol. 2, no. 2, 2021, pp. 62-66.
- [3] Ratnasari, I., Sudarti, dan Yushardi, Pengaruh Paparan Medan Magnet Extremely Low Frequency (ELF) Terhadap Derajat Keasaman (pH) Susu Sapi Segar, *Jurnal Pijar Mipa*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 276-281.
- [4] Ariyani, D.T., S. Najah, E. Cahayati, Sudarti, dan K. Mahmudi, Konsep Radiasi Medan Elektromagnetik ELF (*Extremely Low Frequency*) Oleh Peralatan Rumah Tangga, *Optika: Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 8, no. 1, 2024, pp. 147-156.
- [5] Sudarti N.W., Yulihastiti, D.A., dan Suartini, N.M, Penurunan Kualitas Sperma Tikus (*Rattus Novergivus*) yang Diinjeksi Vitamin C Dosis Tinggi dalam Jangka Waktu Lama, *Jurnal Metamorfosa*, vol. 6, no. 1, 2019, pp. 7-13.
- [6] Dillasamola D, *Infertilitas*, Lppm Universitas Andalas, Padang, 2020.
- [7] Górski, R., M. Kotwicka, I. Skibińska, M. Jendraszak, dan S. Wosiński, Effect of low-frequency electric field screening on motility of human sperm, *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, vol. 27, no. 3, 2020.
- [8] Mu'nisa A., O. Jumadi, M. Junda, M.W. Caronge, dan H. Hamjaya, *Teknik Manajemen dan Pengelolaan Hewan Percobaan*, Jurusan Biologi FMIPA UNM, Makassar, 2022.
- [9] Guleken Z, Chronic Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Before and After Neonatal Life Induces Changes On Blood Oxidative Parameters of Rat Offspring, *Annals of Medical Research*, vol. 28, no. 2, 2021, pp. 361-365.
- [10] Muti N.D., G. Salvio, A. Ciarloni, M. Perrone, G. Tossetta, R. Lazzarini, M. Bracci, dan G. Balercia, Can Extremely Low Frequency Magnetic Field Affect Human Sperm Parameters and Male Fertility?, *Tissue Cell*, vol. 82, 2023.
- [11] Klimek, A., A. Nowakowska, H. Kletkiewicz, J. Wyszowska, J. Maliszewska, M. Jankowska, L. Peplowski, dan J. Rogalska, Bidirectional Effect of Repeated Exposure to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Field (50 Hz) of 1 and 7 mT on Oxidative/Antioxidative Status in Rat's Brain: The Prediction for the Vulnerability to Diseases, *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, vol. 1, no. 14, 2022.

- [12] Hindiyati S. H., Sudarti, dan Bektiarso S, Korelasi Bobot Tubuh Terhadap Detak Jantung Mencit Balb-C yang Dipapar Medan Magnet Extremely Low Frequeuncy (ELF) Intensitas 100 μ T, *Jurnal Ilmu Fisika Dan Pembelajarannya*, vol. 7, no. 1, 2022, pp. 34–38.
- [13] Chen Y, Braun BJ, Menger MM, Ronniger M, Falldorf K, Histing T, Nussler AK, Ehnert S, Intermittent Exposure to a 16 Hz Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Field Promotes Osteogenesis In Vitro through Activating Piezo 1-Induced Ca(2+) Influx in Osteoprogenitor Cells, *J Funct Biomater*, vol. 14, no. 3, 2023, pp. 165.
- [14] Andika, L. W. G. dan N. R. Shafriani, Paparan Radiasi Gelombang Elektromagnetik terhadap Kualitas Sperma: Tinjauan Literatur dalam Konteks Pendidikan Kesehatan, *Edukatif: Jurnal Ilmu Pendidikan*, vol. 6, no. 5, 2024, pp. 6252-6260.
- [15] Mutiarahmi C.N., T. Hartady, dan R. Lesmana, Kajian Pustaka: Penggunaan Mencit Sebagai Hewan Coba di Laboratorium yang Mengacu pada Prinsip Kesejahteraan Hewan, *Indonesia Medicus Veterinus*, vol. 10, no. 1, 2021, pp. 134-145.
- [16] Sinuraya W.T., A.A. Siahaan, dan Sudarti, Potensi Pemanfaatan Radiasi Medan Elektromagnetik Extremely Low Frequency untuk Terapi Kesehatan Tulang, *Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)*, vol. 3, no. 3, 2023, pp. 597-604.
- [17] Doust S.K., M. Darabyan, M. Sisakht, G. Haddadi, N. Sotoudeh, M. Haghani, dan S.M.J. Mortazavi, Extremely Low Frequency-Electromagnetic Fields (ELF-EMF) Can Decrease Spermaocyte Count And Motility And Change Testicular Tissue, *Journal of Biomedical Physics dan Engineering*, vol. 13, no. 2, 2023, pp. 135-146.
- [18] Kasmeri, R. dan Putri A, Pengaruh Ekstrak Pedada Merah (*Sonneratia Careolaris* L.) Terhadap Jumlah dan Morfologi Spermatozoa Mencit (*Mus Musculus* L.), *Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, vol 6, no. 1, 2020, pp. 7-13.