BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kebisingan

2.1.1 Definisi Kebisingan

Kebisingan adalah bunyi yang tidak diinginkan dari aktivitas atau kegiatan dalam tingkat waktu tertentu yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan manusia dan kenyamanan lingkungan. Bunyi atau suara didengar sebagai rangsangan pada sel saraf pendengaran dalam telinga oleh gelombang longitudinal yang ditimbulkan getaran dari sumber bunyi atau suara dan gelombang tersebut merambat melalui media udara atau penghantar lainnya, dan manakala bunyi atau suara tersebut tidak dikehendaki oleh karena mengganggu atau timbul diluar kemauan orang yang bersangkutan, maka bunyi-bunyian atau suara demikian dinyatakan sebagai kebisingan (Sari et al., 2023).

Kebising merupakan salah satu faktor pemicu stres pada individu. Apabila paparan tersebut terjadi secara berulang dan berkepanjangan hingga melebihi kemampuan adaptasi tubuh, maka dapat menimbulkan kondisi stres yang bersifat merugikan. Paparan bising tidak hanya dapat menyebabkan gangguan pada sistem pendengaran dan menurunkan kemampuan berkomunikasi, tetapi juga berperan sebagai stressor yang mampu mempengaruhi atau memodulasi respon sistem kekebalan tubuh (Yusmardiansyah & Zhara, 2019).

2.1.2 Sumber Kebisingan

Sumber kebisingan merupakan sumber bunyi yang terjadi pada waktu dan tempat tertentu yang berpotensi mengganggu fungsi sistem pendengaran, yang

berasal dari benda bergerak maupun diam. Secara umum, kebisingan dapat dihasilkan dari beberapa aktivitas meliputi sektor industri, aktivitas perdagangan, konstruksi, peralatan pembangkit listrik, sistem transportasi serta kegiatan domestik. Menurut Azzahra (2025), dalam sektor industri, kebisingan dapat dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu kebisingan akibat mesin, vibrasi serta pergerakan udara, gas dan cairan:

1. Mesin

   Kebisingan yang ditimbulkan oleh aktifitas mesin-mesin industri maupun pabrik.

2. Vibrasi

   Kebisingan yang ditimbulkan oleh akibat getaran yang ditimbulkan akibat gesekan, benturan atau ketidak seimbangan gerakan bagian mesin. Terjadi pada roda gigi, roda gila, batang torsi, piston, fan, bearing, dan lain-lain.

3. Pergerakan udara, gas dan cairan

   Kebisingan ini di timbulkan akibat pergerakan udara, gas, dan cairan dalam kegiatan proses kerja industri misalnya pada pipa penyalur cairan gas, outlet pipa, gas buang, jet, flare boom, dan lain-lain.

Kebising dapat diukur dengan alat bantuan meter tingkat bunyi dalam satuan desibel (dB). kebisingan dapat dikelompokan berdasarkan sumber bising menjadi 2:

1. Bising Interior

Bising interior adalah suara-suara yang tidak diinginkan yang terjadi di dalam ruang bangunan dan berasal dari sumber-sumber di dalam ruangan itu sendiri, seperti percakapan manusia, langkah kaki, peralatan mekanik, serta

perangkat bangunan yang bergerak atau beroperasi. Bunyi-bunyi ini dapat merambat melalui udara atau struktur bangunan, kemudian memantulkan antara permukaan dinding, lantai, dan langit-langit, sehingga memperkuat tingkat gangguan latar dalam ruang dan mempengaruhi kenyamanan. Sumber bising yang paling sering dibuat oleh manusia adalah bunyi radio, televisi, pembicaraan yang keras, bantingan pintu, langkah kaki di tangga. Bising yang disebabkan alat-alat rumah tangga seperti kipas angin, kompresor, pencuci piring, penghancur sampah, pembersih vakum, pembuat kilap lantai, pengering rambut, pencukur Listrik (Jevond et al., 2024).

2. Bising Eksterior

Bising eksterior atau bising luar dapat didefinisikan sebagai akumulasi bunyi yang tidak diinginkan yang berasal dari lingkungan luar bangunan dan merambat masuk ke dalam ruang atau mengganggu aktivitas di area terbuka. Sumber utama bising eksterior di kawasan perkotaan didominasi oleh arus transportasi darat (bermotor, mobil, truk, kereta), aktivitas transportasi udara (terutama pada hunian di sekitar bandara), serta kegiatan konstruksi dan industri. Bising ini bersifat subjektif dimana karakteristik gelombang suaranya sering kali dianggap sebagai stressor yang dapat menurunkan konsentrasi, mengganggu kenyamanan audial, hingga berdampak buruk pada kesehatan jangka panjang seperti gangguan tidur dan peningkatan tekanan darah. Pengendalian bising eksterior biasanya dilakukan melalui pada bagian luar bangunan. Gangguan bising eksterior di daerah perkotaan, dengan tingkat gangguan yang sering melebihi ambang batas kenyamanan dapat berdampak pada kualitas hidup dan kenyamanan warga sekitar. Kebisingan eksterior juga dikaitkan dengan potensi efek negatif

terhadap kesehatan dan kualitas hidup, termasuk peningkatan stres akibat paparan suara yang berkepanjangan di lingkungan umum atau tempat tinggal (Ndoen et al., 2024).

2.1.3 Klasifikasi Tingkat Kebisingan (rendah, sedang, tinggi)

Tingkat kebisingan adalah ukuran intensitas suara yang dinyatakan dalam satuan desibel (dB) dan digunakan untuk menggambarkan kuat-lemahnya bunyi yang diterima oleh telinga manusia. Semakin tinggi nilai desibel, semakin besar energi bunyi yang dipancarkan dan semakin berpotensi menimbulkan gangguan atau kerusakan pendengaran. Dalam konteks lingkungan dan kesehatan kerja, tingkat kebisingan diklasifikasikan mulai dari kategori rendah, sedang, hingga tinggi. Suara di bawah 55 dB umumnya masih dianggap aman dan tidak menyebabkan gangguan, terutama pada area pemukiman. Namun, paparan kebisingan yang melebihi 70 dB dapat menimbulkan stres fisiologis dan gangguan kenyamanan, sedangkan paparan di atas 85 dB secara terus-menerus berisiko menyebabkan gangguan pendengaran permanen. Oleh karena itu, berbagai lembaga seperti WHO dan standar Indonesia menetapkan ambang batas kebisingan untuk mencegah dampak negatif pada kesehatan (WHO, 2022).

Tingkat kebisingan juga dipengaruhi oleh karakter suara, durasi paparan, jarak, serta kondisi lingkungan, sehingga pemantauan secara berkala menggunakan alat Sound Level Meter (SLM) menjadi penting untuk memastikan batas aman tidak terlampaui (Keintjem et al., 2025).

Klasifikasi dalam tingkat kebisingan dapat dilihat pada Tabel 2.1, nilai ambang batas kebisingan dan Tabel 2.2, skala intensitas kebisingan sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Nilai Ambang Batas Kebisingan

Waktu pemaparan perhari	Intensitas kebisingan dalam dB
8 (jam)	85
4 (jam)	88
2 (jam)	91
1 (jam)	94
30 (menit)	97
15 (menit)	100
7,5 (menit)	103
3,75 (menit)	106
0,94 (menit)	112
28,12 (detik)	115
14,06 (detik)	118
1,88 (detik)	109
7,03 (detik)	121
3,52 (detik)	124
1,76 (detik)	127
0,88 (detik)	130
0,44 (detik)	133
0,22 (detik)	136
0,11 (detik)	139
Tidak Boleh	140

Sumber. Permenaker (No 5 tahun 2018).

Tabel 2. 2 Skala Intensitas Kebisingan

Intensitas	Desibel (dB)	Batas dengar tertinggi
Menulikan	>120	Ledakan bom, mesin jet, mesin roket
Sangat amat keras	120 110 100	Petir Konser musik rock Mesin pabrik
Sangat hiruk	100 90 80	Klason truk Bunyi kerata api Pluit polisi
Tinggi	80 70 60	Kantor ramai Jalan pada umumnya Radio
Sedang	60 50 40	Rumah gaduh Kantor umumnya Percakapan normal
Rendah	40 30 20	Rumah tenang Kantor perorangan Auditorium
Sangat tenang	20 10 0	Suara daun-daun Berbisik Terendah

Sumber. Suma'mur (1996) dalam (Syarifuddin, 2019 hlm 36-41).



Gambar 2. 1 Alat pengukur tingkat suara (SLM) (Elsevier, 2022)

2.1.4 Parameter Kebisingan (dB, frekuensi, durasi, itensitas)

Parameter kebisingan adalah sekumpulan aspek atau variabel yang digunakan untuk mengukur, menilai, dan menggambarkan karakteristik suatu bunyi yang dapat menimbulkan gangguan atau dampak kesehatan. Parameter ini membantu menentukan apakah suatu paparan suara termasuk aman, mengganngu, atau berbahaya. Menurut Kallankandy & Deswal (2023), umumnya parameter kebisingan meliputi:

1. Desibel (dB)

Kebisingan suara, salah satu parameter utama yang digunakan untuk menilai paparan suara adalah tingkat tekanan suara, yang dinyatakan dalam desibel (dB). Desibel adalah satuan logaritma yang menggambarkan perbandingan tekanan suara terhadap tekanan referensi dan memungkinkan pengukuran kekuatan suara dalam skala yang lebih mudah dibandingkan linearnya intensitas fisik suara. Pengukuran ini sering dilakukan dengan alat Sound Level Meter dan nilai dB(A-weighting) yang sudah sesuai sensitivitas telinga manusia umumnya dipakai dalam banyak studi kebisingan lingkungan dan kesehatan masyarakat.

2. Frekuensi

frekuensi suara, dinyatakan dalam Hertz (Hz), merupakan parameter penting karena menunjukkan jumlah getaran gelombang per detik dan berkaitan dengan persepsi nada suara. Rentang frekuensi yang biasanya dapat didengar manusia adalah antara sekitar 20 Hz hingga 20.000 Hz, dan karakteristik frekuensi ini berpengaruh terhadap kualitas kebisingan serta potensi gangguan yang ditimbulkannya (Nurhayati, 2022).

3. Durasi

   Durasi paparan kebisingan juga menjadi faktor kritis dalam penilaian dampak suara terhadap kesehatan dan kenyamanan manusia, semakin lama durasi seseorang terpapar pada tingkat tekanan suara tertentu, semakin besar kemungkinan terjadinya efek fisiologis seperti gangguan pendengaran atau stres yang terkait kebisingan. Penelitian-penelitian pengukuran kebisingan sering menyesuaikan periode monitoring sesuai standar agar data durasi paparan ini dapat evaluasi terhadap persyaratan ambang batas paparan harian.

4. Intensitas

   Intensitas suara pada dasarnya adalah ukuran energi akustik yang dipancarkan oleh sumber suara per satuan area dan berhubungan langsung dengan tingkat tekanan suara yang terukur dalam dB; intensitas yang lebih tinggi mencerminkan energi suara yang lebih besar dan secara umum terkait dengan peningkatan potensi efek buruk terhadap kesehatan pendengaran, terutama bila dikombinasikan dengan durasi paparan yang panjang.

2.1.5 Dampak Kebisingan

Dampak kebising dapat menyebabkan berbagai gangguan seperti gangguan fisiologis, gangguan psikologis, gangguan komunikasi dan ketulian. Ada yang menggolongkan gangguannya berupa gangguan auditory, misalnya gangguan terhadap pendengaran dan gangguan non- auditory, seperti gangguan komunikasi, ancaman bahaya keselamatan, menurunya performan kerja, stres dan kelelahan. Menurut Nasution (2019), secara lebih rinci dampak kebisingan terhadap kesehatan dijelaskan sebagai berikut:

1. Gangguan Fisiologis

Pada umumnya, bising bernada tinggi sangat mengganggu, apalagi bila terputus-putus atau yang datangnya tiba-tiba. Gangguan dapat berupa peningkatan tekanan darah, peningkatan nadi, konstriksi pembuluh darah perifer terutama pada tangan dan kaki, serta dapat menyebabkan pucat dan gangguan sensoris. Bising dengan intensitas tinggi dapat menyebabkan pusing atau sakit kepala. Hal ini disebabkan bising dapat merangsang situasi reseptor vestibular dalam telinga dalam yang akan menimbulkan efek pusing vertigo. Perasaan mual, susah tidur dan sesak nafas disebabkan oleh rangsangan bising terhadap sistem saraf, keseimbangan organ, kelenjar endokrin, tekanan darah, sistem pencernaan dan keseimbangan elektrolit.

2. Gangguan Psikologis

Gangguan psikologis dapat berupa rasa tidak nyaman, kurang konsentrasi, susah tidur, dan cepat marah. Bila kebisingan diterima dalam waktu lama dapat menyebabkan penyakit psikosomatik berupa gastritis, jantung, stres, kelelahan dan lain-lain.

3. Gangguan Komunikasi

Gangguan komunikasi biasanya disebabkan *masking effect* (bunyi yang menutupi pendengaran yang kurang jelas) atau gangguan kejelasan suara. Komunikasi pembicaraan harus dilakukan dengan cara berteriak. Gangguan ini menyebabkan terganggungan, sampai pada kemungkinan terjadinya kesalahan karena tidak mendengar isyarat atau tanda bahaya. Gangguan komunikasi ini secara tidak langsung membahayakan keselamatan seseorang.

2.2 Bunyi Sound Horeg Sebagai Sumber Kebisingan

2.2.1 Definisi Sound Horeg

Sound horeg merupakan tradisi penggunaan sound sistem berdaya tinggi dalam berbagai acara sosial di sejumlah wilayah Indonesia, khususnya di Jawa Timur, telah melekat sebagian dari ekspresi budaya masyarakat setempat (Prihandini & Kurnia, 2025). Istilah ini merujuk pada memainkan perangkat sound sistem berdaya tinggi dengan dentuman bass ekstrem yang dilakukan sekelompok komunitas anak muda, biasanya di jalan-jalan kampung secara konvoi dan kompetisi antar perangkat audio. Kegiatan ini tidak hanya menjadi ajang aduteknologi dan estetika suara, tetapi juga berfungsi sebagai medium ekspresi identitas, solidaritas komunitas, dan kreativitas generasi muda. Namun, praktik ini menuai polemik karena dianggap mengganggu ketertiban umum, menciptakan kebisingan, dan memicu keresahan sosial (Fikri et al., 2025).

2.2.2 Fenomena Sound Horeg

Fenomena kebudayaan popular yang terdapat di kalangan remaja Indonesia ini terus mengalami perkembangan seiring dengan dinamika zaman, kemajuan teknologi informasi, serta globalisasi. Salah satu fenomena yang sempat marak dalam beberapa tahun terakhir yang terjadi di sejumlah daerah di Indonesia yaitu adanya tren “sound horeg” yang merupakan modifikasi sound system audio yang terdapat dalam kendaraan seperti truk yang menghasilkan suara dengan intensitas yang tinggi. Dari segi budaya sendiri, sound horeg ini menjadi lambang keceriaan (Devi et al., 2025).

Akan tetapi, keberadaan sound horeg ini juga dapat memicu berbagai tanggapan yang negatif yang berasal dari masyarakat. Suara bising dan getaran

yang dihasilkan sound horeg mengganggu ekosistem sekitar, getaran suara yang sangat kuat dapat menyebabkan kerusakan fisik pada bangunan warga, seperti retaknya kaca jendela, pecahnya genteng, dan retakan pada atap rumah. Kerusakan ini menimbulkan kerugian material bagi warga dan menambah ketidaknyamanan selama acara dan setelah acara berlangsung. Dari sisi ekosistem, kebisingan yang intens mengganggu keseimbangan lingkungan alam, khususnya hewan yang sensitif terhadap suara seperti ikan dan burung, bahkan dapat menyebabkan gangguan reproduksi dan kematian pada ikan. Suara keras juga menghambat komunikasi antar manusia maupun hewan, yang berpotensi mengganggu siklus hidup dan kelangsungan ekosistem. Polusi suara yang terus menerus juga dapat mengurangi kualitas lingkungan hidup secara umum, memicu ketidak kenyamanan dan ketertiban masyarakat (Apriliyanti et al., 2025).

2.2.3 Tingkat Intensitas Kebisingan Sound Horeg

Paparan kebisingan yang melebihi ambang batas ini berpotensi menyebabkan gangguan bagi pendengaran. World Health Organization (WHO) menetapkan tiga tingkatan kebisingan berdasarkan desibel (dB): 1) Aman dengan rentang 0-75 dB, 2) Ambang batas bahaya untuk rentang 75-85 dB, dan 3) Bahaya untuk lebih dari 85 dB (Almutadibillah et al., 2025).

Tingkat intensitas dari fenomena sound horeg yang dikenal sebagai karakter suara sangat kuat dan menggelegar umumnya berada pada tingkat suara yang sangat tinggi, jauh melampaui batas kenyamanan dan bahkan ambang batas aman pendengaran manusia. Sound system ini dirancang untuk menghasilkan frekuensi rendah (bass) yang dominan bertekanan tinggi, seringkali kegiatan sound horeg yang memang mengandalkan suara keras sebagai daya tarik utama. Hasil

pengukuran di lapangan menunjukkan suara yang dihasilkan bisa mencapai 120-140 desibel, jauh di atas batas yang ditetapkan (Wildan et al., 2025).

Intensitas yang ekstrem ini tidak hanya terdengar, tetapi juga terasa secara fisik sebagai getaran kuat di dada dan seluruh tubuh. Tujuannya adalah menciptakan efek suara yang "mengguncang", memberikan pengalaman fisik yang mendalam namun berpotensi merusak jika terpapar dalam durasi yang lama, sehingga intensitasnya dapat dikategorikan sebagai bahaya kebisingan tingkat tinggi yang memerlukan kewaspadaan (Najah & Rosyidiin, 2024).

2.3 Mekanisme Pengaruh Kebisingan Terhadap Sistem Stres

2.3.1 Respon Stres Fisiologi Akibat Kebisingan

Paparan tidak hanya berdampak pada fungsi pendengaran, tetapi juga dapat memicu respon stres fisiologis yang signifikan pada tubuh. Kebisingan bertindak sebagai stresor lingkungan yang merangsang sistem saraf simpatik dan sumbu hipotalamus-hipofisis-adrenal (HPA), sehingga memicu pelepasan hormon stres seperti kortisol, adrenalin, dan noradrenalin (Hahad et al., 2024). Aktivasi sistem saraf simpatik tersebut memicu berbagai perubahan fisiologis akut, seperti peningkatan frekuensi denyut jantung, kenaikan tekanan darah, serta peningkatan aktivitas metabolisme tubuh. Perubahan-perubahan ini merupakan bagian dari mekanisme adaptif tubuh dalam menghadapi stresor atau ancaman lingkungan, yang dikenal sebagai respons "fight or flight" (Clark et al., 2020). Paparan gangguan kronis juga dikaitkan dengan stimulasi berulang sumbu HPA yang dapat menghasilkan sinkronisasi hormonal serta peningkatan kadar hormon stres, yang tampak pada peningkatan kortisol baik secara akut maupun dalam periode paparan

panjang, dan dapat berkontribusi pada gangguan sistem kardiovaskular dan metabolik (Montgomery, 2025).

2.3.2 Aktivasi Sistem Saraf Simpatik

Aktivasi sistem saraf simpatik merupakan salah satu mekanisme adaptasi tubuh dalam merespons berbagai stresor, baik yang bersifat fisik maupun psikologis, seperti kebisingan, nyeri, dan tekanan emosional. Ketika tubuh menerima rangsangan stres, informasi sensorik akan diproses oleh sistem saraf pusat, terutama hipotalamus, yang kemudian mengaktifkan sistem saraf simpatik melalui jalur medula spinalis Pelepasan kedua zat tersebut menyebabkan berbagai perubahan fisiologis, antara lain peningkatan denyut jantung, tekanan darah, frekuensi pernapasan, pelebaran bronkus, dan peningkatan distribusi darah menuju otot rangka. Respons terpadu ini dikenal sebagai mekanisme "fight or flight" yang bertujuan meningkatkan kesiapan tubuh dalam menghadapi ancaman. Meskipun aktivasi sistem saraf simpatik secara akut berperan penting dalam menjaga homeostasis, paparan stres yang berlangsung terus-menerus dapat menyebabkan gangguan pada sistem kardiovaskular, metabolik, dan neuroendokrin (Sollers et al., 2022).

2.3.3 Aktivasi Sistem Hormon Endokrin

Aktivasi sistem hormon endokrin merupakan respon biologis utama tubuh terhadap stresor fisik, psikologis, maupun lingkungan, yang terutama dimediasi oleh sumbu hipotalamus-hipofisis-adrenal (HPA) (Herman et al., 2020). Respons ini dimulai ketika hipotalamus mendeteksi stres dan mensekresikan *Corticotropin-Releasing-Hormone* (CRH), yang kemudian menstimulasi hipofisis anterior untuk melepaskan *Adrenocorticotropic Hormone* (ACTH) ke dalam sirkulasi darah

(Russell & Lightman, 2019). ACTH selanjutnya merangsang korteks adrenal untuk menghasilkan kortisol, hormon stres utama yang berfungsi meningkatkan ketersediaan energi, mengatur metabolisme glukosa dan lipid, serta memodulasi respon imun dan inflamasi. Selain aktivasi seperti HPA, stres juga memicu sistem adreno-medular, yang menyebabkan pelepasan adrenalin dan noradrenalin dari medula adrenal untuk memperkuat respons fisiologis seperti peningkatan denyut jantung, tekanan darah, dan kewaspadaan (Ulrich-Lai & Herman, 2023). Aktivasi sistem hormon endokrin secara akut bersifat adaptif dan penting untuk kelangsungan hidup, namun aktivasi kronis dapat menyebabkan disregulasi (respons emosional) hormonal yang berkontribusi terhadap gangguan metabolik, kardiovaskular, serta kesehatan mental (Hahad et al., 2024).

2.3.4 Respon Stres Oksidatif Akibat Kebisingan

Respon stres oksidatif akibat kebisingan terjadi ketika paparan bertindak sebagai stresor lingkungan yang memicu peningkatan aktivitas metabolik dan neuroendokrin tubuh. Kebisingan kronis diketahui mengaktivasi sistem saraf simpatis dan poros hipotalamus-pituitari-adrenal (HPA), yang secara tidak langsung meningkatkan produksi spesies oksigen reaktif (ROS) melalui peningkatan konsumsi oksigen jaringan dan aktivasi jalur inflamasi (Münzel et al., 2018). Peningkatan ROS ini merupakan respon awal tubuh terhadap stres, namun bila berlangsung terus-menerus dapat berkembang menjadi kondisi stres oksidatif.

Pada kondisi stres oksidatif, terjadi ketidakseimbangan antara produksi ROS dan kapasitas sistem antioksidan tubuh. Paparan gangguan kronis terbukti meningkatkan pembentukan radikal bebas seperti superoksida dan hidrogen peroksida, yang dapat menyerang lipid, protein, dan DNA. Sel kerusakan membran

lipid akibat peroksidasi lipid menjadi salah satu dampak utama stres oksidatif, karena dapat mengganggu integritas dan fungsi membran sel (Sies & Jones, 2020).

Stres oksidatif akibat gangguan juga berdampak pada sistem hematopoietik. Peningkatan ROS dapat merusak sel progenitor eritroid di sumsum tulang, sehingga mengganggu proses eritropoiesis dan menurunkan efisiensi pembentukan eritrosit yang matang. Selain itu, stres oksidatif dapat mempengaruhi stabilitas dan fungsi hemoglobin melalui oksidasi struktur protein dan heme, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap perubahan kadar maupun fungsi hemoglobin dalam darah. Dengan demikian, respon stres oksidatif akibat gangguan merupakan mekanisme penting yang menjembatani paparan gangguan kebisingan dengan berbagai gangguan fisiologis, termasuk kerusakan sel, gangguan eritropoiesis, dan perubahan fungsi hemoglobin, terutama bila paparan terjadi dalam intensitas tinggi dan durasi yang lama (Münzel et al., 2018).

2.3.5 Dampak Stres Oksidatif Terhadap Sel Darah dan Hemoglobin

Kondisi stres oksidatif berperan dalam menimbulkan kerusakan pada eritrosit dan hemoglobin, mengingat sel darah merah memiliki kandungan oksigen serta zat besi yang tinggi sehingga lebih rentan terhadap reaksi oksidatif. (Molina et al., 2022) Peningkatan spesies oksigen reaktif (ROS) dapat menyebabkan peroksidasi eritrosit membran lipid, sehingga menurunkan elastisitas membran, meningkatkan kerapuhan sel, dan memperpendek umur eritrosit yang berakhir pada hemolisis (Sies, 2017). Pada tingkat molekuler, stres oksidatif dapat mengoksidasi hemoglobin dari bentuk oksihemoglobin (Fe^{2+}) menjadi methemoglobin (Fe^{3+}) yang tidak mampu mengikat oksigen, sehingga menurunkan kapasitas transportasi oksigen. Selain itu, oksidasi hemoglobin dapat menghasilkan hemichrome (bentuk

hemoglobin), yang memicu pembentukan badan heinz (gumpalan hemoglobin) dan mempercepat destruksi eritrosit di limpa (Mohanty et al., 2020). Stres oksidatif kronis juga mengganggu sistem antioksidan eritrosit seperti glutathione, superoxide dismutase, dan katalase, sehingga membantu kerusakan sel darah merah dan berkontribusi terhadap kondisi seperti anemia hemolitik dan gangguan oksigenasi jaringan (Sies, 2017).

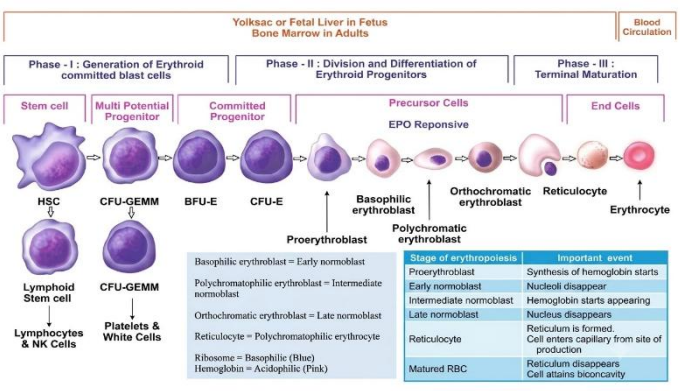
2.4 Eritropoiesis

2.4.1 Pengertian Eritropoiesis

Eritropoiesis adalah proses membentukan yang menghasilkan sel darah merah (eritrosit) dari sel punca hematopoietik multipoten di sumsum tulang. Proses ini dimulai ketika sel punca berdiferensiasi menjadi progenitor eritroid yang kemudian mengalami beberapa tahap maturasi melalui eritroblast (termasuk proeritroblast, eritroblast basofilik, dan polikromatik) hingga normoblast yang akhirnya mengeluarkan esensi (enukleasi) untuk menjadi retikulosit, yakni bentuk eritrosit muda. Retikulosit kemudian memasuki sirkulasi darah dan mengalami pendinginan akhir menjadi eritrosit dewasa yang berfungsi mengangkut oksigen ke seluruh jaringan tubuh. Regulasi eritropoiesis sangat dipengaruhi oleh hormon eritropoietin (EPO) yang diproduksi ginjal sebagai respon terhadap hipoksia untuk memicu proliferasi dan diferensiasi progenitor eritroid, serta oleh berbagai faktor molekular seperti faktor transkripsi dan mekanisme epigenetik yang memodulasi ekspresi gen selama perkembangan eritroid. Kekacauan dalam proses ini dapat menyebabkan gangguan hematologis, seperti anemia apabila produksi eritrosit tidak mencukupi (Zhu et al., 2023).

2.4.2 Pembentukan Eritropoiesis

Pembentukan eritropoiesis merupakan proses biologi kompleks yang dimulai dari sel punca hematopoietik multipoten (Hematopoietic Stem Cells/HSC) yang berada di sumsum tulang merah, kemudian berdiferensiasi menjadi progenitor eritroid dan akhirnya menjadi eritrosit (sel darah merah) matang. Pada manusia dewasa, HSC terlebih dahulu berubah menjadi progenitor khusus seperti burst-forming unit-erythroid (BFU-E) dan colony-forming unit-erythroid (CFU-E), yang kemudian melalui beberapa tahap eritroblas (proerythroblast → basofilik → polikromatik → eritroblas ortokromatik) mengalami proliferasi dan sintesis hemoglobin. Pada tahap akhir, eritroblas ortokromatik mengeluarkan nukleusnya (enukleasi) sehingga terbentuk retikulosit, yang kemudian matang menjadi eritrosit yang beredar dalam darah. Proses ini diatur secara ketat oleh berbagai faktor, termasuk hormon eritropoietin (EPO) yang diproduksi oleh ginjal dalam respon terhadap hipoksia, serta berbagai faktor transkripsi (mis. GATA-1, STAT5) dan jalur sinyal seluler yang mengontrol proliferasi, diferensiasi, dan kelangsungan hidup sel progenitor eritroid. Regulasi molekular dan epigenetik selama eritropoiesis memastikan produksi eritrosit yang efektif dan responsif terhadap kebutuhan oksigen tubuh, dan gangguan ini dapat menyebabkan kelainan hematologi (Mitre et al., 2024).



Gambar 2. 2 Proses pembentuk eritropoiesis (Tang & Wang, 2023)

2.4.3 Faktor Yang Mempengaruhi Eritropoiesis

Eritropoiesis adalah proses pembentukan sel darah merah (eritrosit) di sumsum tulang yang diatur oleh berbagai faktor fisiologis, molekuler, dan lingkungan. Secara umum, proses ini dipengaruhi oleh hormon, nutrisi, sitokin, dan pengaturan gen-gen. Salah satu faktor utama adalah eritropoietin (EPO), hormon glikoprotein yang diproduksi terutama oleh ginjal sebagai respon terhadap hipoksia (kekurangan oksigen). EPO berikatan dengan reseptornya di progenitor eritroid untuk merangsang proliferasi, kelangsungan hidup, dan diferensiasi sel darah merah di sumsum tulang, suatu mekanisme yang dijelaskan dalam banyak pengamatan literatur tentang regulasi eritropoiesis. Selain EPO, ketersediaan zat besi dan metabolisme besi sangat mempengaruhi eritropoiesis karena zat besi merupakan komponen krusial hemoglobin. Regulasi zat besi yang melibatkan protein seperti *transferrin* dan *hepcidin*, di mana gangguan pada metabolisme ini dapat menghambat produksi eritrosit (Ling et al., 2024).

Proses ini juga dipengaruhi oleh sitokin dan faktor pertumbuhan lainnya seperti IL-3, SCF (stem cell factor), IGF-1, dan GM-CSF, yang berinteraksi dengan jalur sinyal untuk mendukung proliferasi dan maturasi sel eritroid. Sitokin pro-inflamasi (misalnya TNF-α) dapat memiliki efek negatif terhadap eritropoiesis melalui hambatan proliferasi atau diferensiasi sel progenitor (Sato et al., 2022).

Faktor transkripsi dan molekuler seperti GATA-1, STAT5, dan faktor transkripsi lainnya juga memainkan peran penting dalam menentukan komitmen dan diferensiasi sel progenitor menjadi eritrosit matang. Regulasi ini semakin kompleks dengan peran microRNA yang mengontrol ekspresi gen yang terkait dengan proliferasi, maturasi, dan sintesis hemoglobin. Secara fisiologis, kondisi

hipoksia meningkatkan ekspresi EPO melalui *Hypoxia-Inducible Faktor* (HIFs), yang mengoptimalkan respon eritropoiesis terhadap kebutuhan oksigen jaringan (Mitre et al., 2024).

Ringkasnya, eritropoiesis dipengaruhi oleh: (1) pengatur hormon seperti EPO, (2) status nutrisi (termasuk zat besi, B12, folat), (3) faktor sitokin dan pertumbuhan, (4) faktor transkripsi dan mikroRNA, serta (5) kondisi fisiologis seperti hipoksia. Interaksi berbagai faktor ini memastikan produksi sel darah merah yang memadai untuk fungsi transportasi oksigen dalam tubuh (Mitre et al., 2024).

2.4.4 Hubungan Etritropoiesis Dengan Hemoglobin

Hubungan antara eritropoiesis dan hemoglobin bersifat saling bergantung, produksi eritrosit melalui eritropoiesis secara langsung mempengaruhi jumlah total hemoglobin dalam darah karena setiap eritrosit membawa ratusan juta molekul hemoglobin. Eritropoietin (EPO) hormon yang dihasilkan ginjal sebagai respons terhadap hipoksia atau rendahnya kadar hemoglobin, adalah pengatur utama eritropoiesis dan merangsang proliferasi serta diferensiasi prekursor eritroid di sumsum tulang, sehingga meningkatkan jumlah eritrosit dan secara tidak langsung meningkatkan kapasitas hemoglobin darah. Ketika eritropoiesis meningkat, kebutuhan sintesis hemoglobin juga meningkat karena sel-sel baru harus mensintesis hemoglobin secara optimal untuk berfungsi. Sebaliknya, gangguan dalam eritropoiesis, misalnya akibat kekurangan EPO atau nutrisi penting seperti zat besi, dapat mengakibatkan produksi eritrosit yang kurang efektif dan penurunan kadar hemoglobin, yang menyebabkan anemia. Mekanisme ini didukung oleh bukti ilmiah bahwa stimulasi eritropoiesis oleh EPO membekukan dengan peningkatan produksi sel darah merah dan hemoglobin, sedangkan ke sirkulasi antara keduanya,

misalnya dalam anemia defisiensi besi atau gangguan globin, menurunkan konsentrasi hemoglobin meskipun eritropoiesis terjadi secara aktif (Panjeta et al., 2020).

2.5 Hemoglobin

2.5.1 Pengertian Hemoglobin

Hemoglobin merupakan komponen penting dalam sel darah merah. Hemoglobin terdiri dari dua kata yaitu *haem* dan *globin* (Aliviameita, 2019). Hemoglobin adalah protein globular yang mengandung besi dan tersusun atas empat rantai polipeptida. Molekul ini terdiri atas bagian heme dan globin, di mana globin merupakan rantai asam amino, sedangkan heme tersusun dari atom besi (Fe) dan cincin protoporfirin yang dibentuk di dalam mitokondria. Setiap rantai globin memiliki satu gugus heme yang berfungsi memberi warna merah pada darah sekaligus berperan dalam pengikatan oksigen (Anamisa, 2021).

Warna merah ini berbeda-beda bergantung pada kadar hemoglobin yang terkandung pada sel darah. Semakin tinggi kadar hemoglobin di dalam sel makan warna darah akan semakin pekat. Hemoglobin mempunyai kemampuan mengikat Oksigen (O_2) dan karbondioksida (CO_2) dalam sistem respirasi. Warna merah darah bergantung pada dua faktor, yaitu kandungan hemoglobin dan jenis ikatan dalam sel. Semakin tinggi kadar hemoglobin maka warna sel darah semakin cerah. Selanjutnya, apabila O_2 yang diikat lebih banyak maka warna darah akan semakin cerah. Namun, jika lebih banyak mengikat CO_2 maka warna darah akan menjadi merah pekat Sekitar 65% hemoglobin disintesis pada stadium eritoblast dan 35% sisanya pada stadium reikulosit. (Nurjanah et al., 2021).

2.5.2 Struktur Hemoglobin

Struktur hemoglobin merupakan protein globular kompleks yang tersusun atas empat subunit polipeptida (struktur kuartener), yaitu dua rantai alfa (α) dan dua rantai beta (β) pada hemoglobin dewasa (HbA). Setiap subunit mengandung satu gugus heme, sehingga satu molekul hemoglobin memiliki empat gugus heme. Gugus heme terdiri dari cincin protoporfirin IX yang di pusatnya mengikat satu atom besi fero (Fe^{2+}). Atom besi inilah yang berperan langsung dalam mengikat oksigen secara reversibel. Setiap rantai globin memiliki struktur tersier khas berupa lipatan alfa-heliks yang membentuk kantong hidrofob untuk menempatkan gugus heme secara stabil. Interaksi antarsubunit globin memungkinkan hemoglobin mengalami perubahan konformasi dari bentuk deoksihemoglobin (T-state) ke oksihemoglobin (R-state), yang menjadi dasar sifat kooperativitas dalam pengikatan oksigen. Struktur ini sangat penting karena menentukan afinitas hemoglobin terhadap oksigen serta kemampuannya berfungsi optimal dalam mengangkut gas respirasi di dalam darah (Montgomery, 2025).

2.5.3 Fungsi Hemoglobin

Hemoglobin, sebagai protein dalam eritrosit, memiliki peran utama dalam mengangkut oksigen dan karbondioksida antara paru-paru dan jaringan tubuh. Dua fungsi penting hemoglobin dalam tubuh manusia adalah mengangkut oksigen ke jaringan tubuh dan mengangkut karbondioksida serta proton dari jaringan perifer menuju organ respirasi. Pemeriksaan kadar hemoglobin berguna untuk mengevaluasi tingkat anemia, respons terhadap pengobatan anemia, atau perkembangan penyakit yang terkait dengan anemia dan polisitemia (Atik et al., 2022).

2.5.4 Kadar Hemoglobin

Kadar hemoglobin adalah jumlah hemoglobin yang terkandung dalam darah, biasanya dinyatakan dalam satuan gram per desiliter (g/dL), dan digunakan sebagai salah satu indikator utama status kesehatan seseorang. Nilai kadar hemoglobin mencerminkan kemampuan darah dalam mengangkut oksigen ke jaringan tubuh, sehingga sangat berperan dalam mendukung proses metabolisme dan fungsi organ.

Menurut WHO, telah menetapkan batas kadar hemoglobin normal berdasarkan umur dan jenis kelamin (Denny et al., 2025).

Tabel 2. 3 Kadar Hemoglobin

Kelompok Umur	Kadar Hemoglobin Normal
Bayi baru lahir	13-23 g/dL
Anak - anak	9-14 g/dL
Remaja	10-15 g/dL.
Pria dewasa	13-17 g/dL
Wanita dewasa	12-15 g/dL
Wanita hamil	11-13 g/dL

Sumber (Denny et al., 2025).

Pada tikus putih (Rattus norvegicus), nilai normal jumlah sel darah merah adalah berkisar antara 7,30 - 9,68 (10^6 sel/µL). Jumlah sel darah merah dalam tubuh dapat mengalami perubahan oleh beberapa faktor, salah satunya dalah komposisi nutrisi dalam diet makanan yang dikonsumsi. Selanjutnya, kadar hemoglobin dalam darah pada tikus putih dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti umur, lingkungan tempat tinggal dan makanan. Normalnya, pada tikus putih kadar hemoglobin dapat berkisar antara 13,5-17,4 g/dL. Berikutnya, pada tikus putih,

persentase normal hematokrit berkisar antara 40,5-52,0%. Persentase hematokrit pada tikus putih sangat dipengaruhi oleh umur, makanan dan kondisi kesehatan tubuh. Ketiga komponen profil eritrosit ini memiliki peran sebagai pembawa oksigen dan nutrisi ke seluruh tubuh (Dewi et al., 2022).

2.5.5 Faktor yang Mempengaruhi Kadar Hemoglobin

Kadar hemoglobin dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berhubungan dengan proses pembentukan dan pemeliharaan sel darah merah. Faktor utama yang mempengaruhi kadar hemoglobin adalah eritropoiesis di sumsum tulang, yang dikendalikan oleh hormon eritropoietin dan berperan langsung dalam produksi eritrosit serta sintesis hemoglobin (Kaushansky, 2021). Proses ini sangat bergantung pada ketersediaan zat besi, vitamin B12, dan asam folat, di mana defisiensi salah satu nutrisi tersebut dapat menghambat pembentukan hemoglobin dan menyebabkan anemia (Means, 2020). Selain faktor nutrisi, usia dan jenis kelamin juga mempengaruhi kadar hemoglobin, karena laki-laki dewasa umumnya memiliki kadar hemoglobin lebih tinggi dibandingkan perempuan akibat pengaruh hormon androgen dan kehilangan fisiologis darah saat menstruasi (Guyton & Hall, 2021). Kondisi kesehatan seperti penyakit kronis, gangguan ginjal, infeksi, dan pendarahan dapat menurunkan kadar hemoglobin melalui penurunan produksi eritropoietin atau peningkatan destruksi eritrosit (WHO, 2021).

Adapun faktor yang mempengaruhi kadar hemoglobin juga dilihat dari faktor pra-analitik yang berkaitan dengan kualitas sampel darah. Kesalahan pada tahap pengambilan dan penanganan sampel seperti pemasangan tourniquet yang terlalu lama, volume darah yang tidak sesuai dengan antikoagulan EDTA, atau penundaan waktu pemeriksaan dapat menyebabkan perubahan nilai hemoglobin

yang tidak mencerminkan kondisi sebenarnya, misalnya hemokontraksi atau hemolisis, sehingga menghasilkan nilai hemoglobin yang tidak akurat. Kondisi-kondisi ini merupakan bagian dari faktor pra-analitik yang sangat penting untuk diperhatikan agar hasil pemeriksaan hemoglobin valid, karena jika persyaratan sampel tidak dipenuhi dengan benar dapat mempengaruhi kadar hemoglobin (Hartini et al., 2025).

2.5.6 Gangguan atau Kelainan Hemoglobin

Gangguan atau kelainan hemoglobin merupakan kondisi abnormal yang memengaruhi struktur, fungsi, atau jumlah hemoglobin dalam darah sehingga mengganggu kemampuan eritrosit dalam mengangkut oksigen ke jaringan tubuh. Kelainan hemoglobin secara umum dibagi menjadi kelainan kuantitatif dan kelainan kualitatif. Kelainan kuantitatif ditandai dengan penurunan atau peningkatan kadar hemoglobin, seperti pada anemia dan polisitemia, yang sering disebabkan oleh gangguan eritropoiesis, defisiensi zat besi, perdarahan, atau penyakit kronis (Guyton & Hall, 2021). Sementara itu, kelainan kualitatif terjadi akibat perubahan struktur molekul globin yang bersifat genetik, seperti pada talasemia dan anemia sel sabit, yang menyebabkan hemoglobin tidak berfungsi optimal dalam mengikat dan melepaskan oksigen (Weatherall, 2018). Talasemia ditandai oleh penurunan sintesis rantai globin alfa atau beta sehingga mengakibatkan anemia hemolitik kronis, sedangkan anemia sel sabit disebabkan oleh mutasi gen β-globin yang menghasilkan hemoglobin S (HbS) dengan bentuk eritrosit abnormal (Kaushansky et al., 2021). Selain faktor genetik, kondisi lingkungan seperti hipoksia kronis, stres oksidatif, dan paparan kebisingan juga

dapat memengaruhi stabilitas eritrosit dan memperberat gangguan hemoglobin melalui peningkatan kerusakan sel darah merah (Sies, 2020).

2.6 *Rattus* Sebagai Hewan Uji Penelitian

2.6.1 Definisi *Rattus norvegicus*

Rattus norvegicus adalah spesies tikus dari keluarga *Muridae* dalam ordo *Rodentia* yang dikenal secara umum sebagai tikus coklat atau tikus norwegia, dan merupakan salah satu spesies pengerat paling tersebar luas secara global karena kemampuannya beradaptasi dengan lingkungan yang dekat dengan aktivitas manusia serta menjadi model organisme penting dalam penelitian biomedis. Selain sebagai hama, *Rattus norvegicus* juga banyak digunakan dalam berbagai kajian ilmiah karena siklus hidupnya yang pendek, kemampuan reproduksi tinggi, dan relevansi fisiologisnya dengan mamalia lain (Cohen & Ho, 2023).

Klasifikasi tikus putih (*Rattus novergicus*) menurut (Hulme-beaman et al., 2021) adalah sebagai berikut:

Kingdom : *Animalia*
Filum : *Chordata*
Kelas : *Mamalia*
Ordo : *Rodentia*
Subordo : *Odontoceti*
Familia : *Muridae*
Genus : *Rattus*
Spesies : *norvegicus*

2.6.2 Karakteristik Morfologi dan Fisiologis *Rattus norvegicus*

Rattus norvegicus , yang sering disebut tikus putih atau *tikus Norwegia* , merupakan salah satu spesies pengerat terbesar dalam famili *Muridae* yang

memiliki ciri morfologi khas berupa tubuh besar dengan panjang sekitar 25-45 cm termasuk ekor dan bobot dewasa berkisar antara 140-500 g atau lebih tergantung strain atau habitatnya; bagian punggung umumnya berwarna coklat abu dengan bagian bawah tubuh lebih pucat, kepala berukuran sedang dengan moncong tumpul, telapak kaki belakang panjang (>40 mm), telinga relatif kecil, serta ekor yang panjangnya hampir sama dengan tubuh yang bersisik dan sedikit berbulu (Taufiqurrahman et al., 2024). Secara fisiologis, *Rattus norvegicus* adalah mamalia endoterm yang menunjukkan sistem fisiologis kompleks seperti metabolisme basal yang tinggi, ritme jantung cepat (~300–400 bpm), kemampuan beradaptasi terhadap lingkungan perkotaan dan stres, serta sistem sensorik (olfaktori dan auditori) yang tajam meskipun penglihatan relatif lemah; Hal ini menjadikan model tikus ini penting dalam studi biomedis terutama fisiologi mamalia, adaptasi terhadap stres, dan respon imun (Wati et al., 2024).



Gambar 2. 3 Tikut putih (*Rattus novercigus*) (Nwuke et al., 2021).

2.6.3 Alasan Memilih *Rattus* Sebagai Model Penelitian

Rattus norvegicus dipilih sebagai salah satu model hewan utama dalam penelitian biomedis dan praklinik karena kombinasi karakteristik biologi dan praktis yang mendukung validitas serta replikasi penelitian. *Rattus* memiliki kesamaan genetik yang tinggi dengan manusia (sekitar 90 % gen yang serupa),

sehingga banyak proses fisiologis, penyakit, dan respons dapat mencerminkan kondisi pada manusia secara lebih akurat dari pada spesies hewan jenis lain. Selain itu, *Rattus norvegicus* memiliki siklus reproduksi yang cepat, ukuran tubuh yang relatif kecil, biaya pemeliharaan yang rendah, serta agam galur yang terstandarisasi secara genetik, yang memudahkan manipulasi eksperimen, pengendalian variabel, serta produksi sampel yang cukup untuk analisis statistik yang kuat. Ketersediaan data genom dan sumber daya ilmiah yang luas (seperti dasar data genetika tikus) juga memperkuat kegunaan tikus sebagai model untuk mempelajari mekanisme penyakit, jalur molekuler, serta uji keamanan dan efektivitas senyawa terapeutik sebelum dilanjutkan ke uji pada manusia (Wati et al., 2024).

Penelitian biomedis dengan *Rattus* (tikus), banyak peneliti memilih tikus jantan daripada tikus betina bukan karena tikus betina tidak penting, tetapi karena beberapa alasan tradisional dan metodologi yang berkaitan dengan desain eksperimen. Alasan yang paling sering dikemukakan adalah kekhawatiran bahwa siklus estrus (siklus reproduksi) pada tikus betina menyebabkan fluktuasi hormon estrogen dan progesteron yang dianggap dapat meningkatkan variabilitas data fisiologis atau perilaku. Karena siklus ini berlangsung setiap beberapa hari, para peneliti khawatir perubahan hormon itu akan menambah variabilitas dalam pengukuran yang tidak berhubungan langsung dengan reproduksi sehingga menyulitkan interpretasi hasil (Allegra et al., 2023).

2.7 Pengaruh Hemoglobin Akibat Paparan Kebisingan

Paparan kebisingan tidak hanya menyebabkan kerusakan pendengaran tetapi juga memicu respons stres sistemik (aktivasi sumbu HPA dan sistem saraf

simpatik) yang mendorong produksi radikal bebas dan pergeseran keseimbangan oksidan - antioksidan stres oksidatif (Moradpour et al., 2024).

Stres oksidatif dan peradangan dapat merusak membran sel eritrosit dan mengoksidasi molekul hemoglobin, sehingga menurunkan fungsi pemeliharaan oksigen dan kadang menurunkan jumlah eritrosit maupun hemoglobin, efek ini dicatat konsistensinya pada studi hewan dan beberapa studi pekerja yang mengukur penanda oksidatif dan parameter darah (Molina et al., 2022). Di samping itu, paparan lingkungan atau pabrik yang berkaitan dengan gangguan paparan kebisingan dikaitkan dengan perubahan hormon eritropoietin sebagai respons konstan. Secara ringkas, menunjukkan mekanisme (stres oksidatif → kerusakan eritrosit maupun hemoglobin dan modulus EPO) yang mendasari adanya pengaruh akibat gangguan paparan kebisingan terhadap kadar hemoglobin (Ameen, 2024).