

REKA BENTUK PENGHADANG BUNYI UNTUK
SUMBER HINGAR JALAN RAYA DAN KERETA API

MUHAMMAD ZULHIJAR BIN DJABIR

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

REKA BENTUK PENGHADANG BUNYI UNTUK SUMBER HINGAR JALAN RAYA DAN KERETA API

MUHAMMAD ZULHIJAR BIN DJABIR

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH SARJANA MUDA KEJURUTERAAN MEKANIKAL DENGAN
KEPUJIAN

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2025

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

24 Jun 2025

MUHAMMAD ZULHIJAR
BIN DJABIR
A187955

PENGHARGAAN

Segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadrat Allah SWT kerana dengan limpah kurnia dan izin-Nya, saya diberikan kekuatan, ketabahan serta kesempatan untuk menyiapkan tesis ini sebagai memenuhi keperluan pengajian saya. Tanpa rahmat dan pertolongan daripada-Nya, segala usaha ini tidak akan dapat dilaksanakan dengan sempurna.

Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada penyelia saya, Dr. Azli bin Arifin, atas segala bimbingan, tunjuk ajar, dorongan dan kepercayaan yang diberikan sepanjang perjalanan penyelidikan ini. Bimbingan beliau bukan sahaja dari sudut akademik, malah memberi impak besar kepada perkembangan sahsiah dan profesionalisme saya.

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh warga Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia atas segala kemudahan, sokongan teknikal, serta persekitaran pembelajaran yang kondusif sepanjang tempoh penyelidikan ini dijalankan. Tanpa sokongan jabatan, penyelidikan ini tidak mungkin dapat diselesaikan dengan jayanya.

Ucapan terima kasih yang tidak terhingga saya tujukan kepada kedua ibu bapa saya yang amat saya kasihi, Encik Djabir bin Halikin dan Puan Wati binti Bora, atas segala doa, kasih sayang, sokongan moral dan pengorbanan yang tidak ternilai sejak dari awal perjalanan akademik saya sehingga ke hari ini. Tidak lupa juga kepada adik-beradik saya yang tercinta iaitu Izzati, Redswan dan Aleesya yang sentiasa menjadi penyokong setia saya dalam susah dan senang, memberikan semangat dan memahami keutamaan saya dalam menyempurnakan pengajian ini.

Setulus hati saya ingin merakamkan penghargaan kepada sahabat-sahabat seperjuangan saya dalam Kor Sukarelawan Polis Siswa/Siswi (SUKSIS) UKM isitu Azizi, Jafni, Fakhrol, Mazlan, Rifdy, Thamal, Arif Hakimi, Izzairi, Hidayat, Amir Faiz, Ilham Najmi dan Arif Suhaimi yang sentiasa bersama saya dalam pelbagai pengalaman suka dan duka. Kehadiran mereka telah mencorakkan perjalanan hidup saya di universiti dengan nilai persaudaraan, disiplin, kerjasama dan semangat perjuangan yang tinggi.

Saya juga amat menghargai kehadiran sahabat-sahabat seperjuangan yang telah banyak berkongsi ilmu, pengalaman, dan motivasi sepanjang tempoh pengajian ini iaitu Yillson, Syahmie, Qamarul, Aizat, Jefri, Aimansoi, Adli, Nadzir dan Zariff. Mereka bukan sekadar rakan akademik, malah telah menjadi keluarga yang sentiasa memberi inspirasi dan semangat dalam menempuhi pelbagai cabaran.

Akhir kata, saya ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung telah membantu saya dalam menyiapkan tesis ini. Setiap sumbangan dan keprihatinan anda amat saya hargai dan akan sentiasa saya kenang. Semoga segala jasa dan kebaikan anda semua dibalas dengan keberkatan dan ganjaran oleh Allah SWT.

ABSTRAK

Kajian ini dijalankan bagi menangani isu pencemaran bunyi yang semakin membimbangkan akibat peningkatan penggunaan sistem pengangkutan darat, khususnya jalan raya dan kereta api yang melalui kawasan berpenduduk. Bunyi bising yang berterusan memberi kesan negatif terhadap kesihatan dan kesejahteraan masyarakat, sekali gus menimbulkan keperluan kepada reka bentuk penghadang bunyi yang berkesan. Tujuan utama kajian ini adalah untuk mereka bentuk dan menilai keberkesanan penghadang bunyi berdasarkan pelbagai parameter kejuruteraan akustik serta simulasi perisian bagi mengurangkan tahap hingar di kawasan yang terdedah. Kajian ini dijalankan di kawasan sekitar Stesen KTM UKM dan Masjid Teras Jernang, Bangi, Selangor yang merupakan lokasi aktif dengan pergerakan kereta api dan kawasan lebuhraya yang sibuk. Metodologi kajian melibatkan pengukuran data hingar sebenar di lapangan menggunakan peralatan bunyi yang mematuhi piawaian, diikuti dengan reka bentuk model penghadang bunyi yang berbeza dari segi bahan dan ketinggian menggunakan perisian iNoise. Keputusan simulasi menunjukkan bahawa bahan aluminium yang digabungkan dengan penyerapan mineral wool memberikan prestasi terbaik dalam menyerap bunyi berfrekuensi tinggi dan sederhana, manakala ketinggian penghadang 5.0 meter memberi pengurangan bunyi paling signifikan berdasarkan nilai LAeq. Penemuan ini membuktikan bahawa pemilihan bahan dan ketinggian penghadang memainkan peranan penting dalam keberkesanan mitigasi bunyi. Kajian ini menyumbang kepada penghasilan data teknikal tempatan berkaitan prestasi akustik pelbagai bahan dan reka bentuk penghadang bunyi yang boleh digunakan sebagai rujukan dalam pembangunan sistem pengurusan hingar di Malaysia. Implikasi terhadap dasar ialah kajian ini berpotensi menyokong perumusan garis panduan baharu dalam perancangan bandar dan infrastruktur pengangkutan yang lebih peka terhadap aspek pencemaran bunyi, sejajar dengan matlamat pembangunan mampan serta kesejahteraan awam.

DESIGN OF NOISE BARRIERS FOR ROAD AND RAILWAY NOISE SOURCES

ABSTRACT

This study was conducted to address the growing issue of noise pollution caused by the increasing use of land transportation systems, particularly roads and railways passing through residential areas. Continuous exposure to high noise levels negatively impacts public health and well-being, creating a need for the design of effective noise barriers. The main objective of this study is to design and evaluate the effectiveness of noise barriers based on various acoustic engineering parameters and software simulations to reduce noise levels in exposed areas. The study was conducted in the vicinity of KTM UKM Station and Masjid Teras Jernang, Bangi, Selangor which are areas with high train traffic activity and busy traffic. The methodology involved on-site noise measurements using standardized acoustic equipment, followed by the design of noise barrier models with varying materials and heights using iNoise simulation software. The simulation results show that aluminum combined with mineral wool absorption materials offers the best performance in absorbing medium to high-frequency noise, while a barrier height of 5.0 meters provides the most significant noise reduction based on LAeq values. These findings confirm that material selection and barrier height play critical roles in the effectiveness of noise mitigation. This study contributes to the generation of local technical data on the acoustic performance of various materials and noise barrier designs, serving as a reference for future noise control system development in Malaysia. In terms of policy implications, the study supports the formulation of new guidelines in urban planning and transportation infrastructure that are more sensitive to noise pollution, aligning with the goals of sustainable development and public well-being.

KANDUNGAN

		Halaman
PENGAKUAN		ii
PENGHARGAAN		iii
ABSTRAK		iv
ABSTRACT		v
KANDUNGAN		vi
SENARAI JADUAL		viii
SENARAI ILUSTRASI		ix
SENARAI SINGKATAN		xi
BAB I	Pengenalan	
1.1	Pendahuluan	12
1.2	Permasalahan Kajian	14
1.3	Objektif Kajian	15
1.4	Skop Kajian	16
BAB II	KAJIAN LITERASI	
2.1	Pengenalan	17
2.2	Konsep Asas Bunyi Dan Akustik	18
	2.2.1 Sifat Bunyi	19
	2.2.2 Prinsip Asas Akustik	19
2.3	Hingar	21
	2.3.1 Sumber Bunyi Hingar Kereta Api	22
	2.3.2 Hingar Jalan Raya	26
	2.3.3 Sumber Bunyi Hingar Jalan Raya	26
2.4	Penghadang Bunyi	28
	2.4.1 Ketinggian dan Panjang Penghadang	28
	2.4.2 Bentuk Geometri Penghadang Bunyi	29
2.5	Ciri Bahan Akustik	29
	2.5.1 Bahan Konvensional vs Inovatif	30
	2.5.2 Ketahanan Bahan	31
2.6	Tahap Hingar Di Malaysia Dan Negara Lain	31
2.7	Kesan hingar	33

2.8	Penebatan Bunyi Atau Pengurangan Bunyi	36
2.9	Mengurangkan Bunyi Hingar	37
BAB III	KAEDAH KAJIAN	
3.1	Pengenalan	39
3.2	Carta Aliran Proses	39
	3.2.1 Penentuan Lokasi Kajian	41
	3.2.2 Pengukuran Bunyi Hingar	43
	3.2.3 Analisis Data	44
	3.2.4 Mereka Bentuk Geometri Penghadang Bunyi	46
	3.2.5 Simulasi Menggunakan iNoise	48
BAB IV	HASIL KAJIAN	
4.1	Pengenalan	51
4.2	Bahan Penghadang Bunyi	51
4.3	Hasil Pengukuran Bunyi Hingar	54
	4.3.1 Jalan Raya	54
	4.3.2 Kereta Api	58
4.4	Analisis Pemilihan Bahan	59
4.5	Analisis Ketinggian Penghadang Bunyi	62
4.6	Rumusan	64
BAB X	RUMUSAN DAN CADANGAN	
5.1	Pengenalan	66
	5.1.1 Pencapaian Objektif 1	66
	5.1.2 Pencapaian Objektif 2	67
	5.1.3 Pencapaian Objektif 3	67
5.2	Cadangan Penambahbaikan	68
RUJUKAN		71
Lampiran A	Graf Bar Data Bunyi Jalan Raya Di Setiap Sela Masa Pada Frekuensi Berbeza	78
Lampiran B	Graf Bar Data Bunyi Kereta Api Di Setiap Sela Masa Pada Frekuensi Berbeza	86

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Tahap Had Bunyi (LAeq) daripada Kereta Api dan Tren Transit [Arbaan A. et al., 2022]	32
Jadual 2.2	Menghubungkan bunyi biasa dengan kesan terhadap pendengaran (Pertubuhan Kesihatan Dunia, 2011).	35
Jadual 3.1	Jadual Had Bunyi yang Ditetapkan Jabatan Alam Sekitar (DOE)	45
Jadual 4.1	Jadual Bacaan Bunyi Hingar Jalan Raya	54
Jadual 4.2	Jadual Bacaan Bunyi Hingar Kereta Api	58

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Lakaran interaksi roda-rel dan landasan termasuk pelapik dan pad (Ogren, 2006).	23
Rajah 2.2	Aliran kuasa dari kawasan sentuhan yang menghubungkan roda dan rel (Ogren, 2006).	24
Rajah 2.3	Sumber bunyi luar kereta api dan pergantungan biasa terhadap kelajuan kereta api (Komuniti Eropah, 2003).	25
Rajah 2.4	Kedudukan sumber hingar (Nagakura dan Zenda, t.t).	26
Rajah 2.5	Perbezaan Keamatan Bunyi Antara Dua Sisi Komponen Atau Sekatan [Arun Arjunan <i>et al.</i> (2024)]	36
Rajah 3.1	Carta Aliran Kerja	40
Rajah 3.2	Jenis-jenis Reka Bentuk Penghadang Bunyi	47
Rajah 4.1	Graf Bar Nilai Penyerapan Bunyi Bahan	52
Rajah 4.2	Graf Bar Indeks Pengurangan Bunyi Bahan	53
Rajah 4.3	Graf Bar Bacaan Bunyi Hingar Jalan Raya	55
Rajah 4.4	Graf Bar Bacaan Hingar Leq Jalan Raya	56
Rajah 4.5	Graf Bar Bacaan L10 & L90 Jalan Raya	57
Rajah 4.6	Graf Bar Bacaan Lmax & Lmin Jalan Raya	57
Rajah 4.7	Graf Bar Bacaan Bunyi Hingar Kereta Api	59
Rajah 4.8	Graf Nilai Hingar Jalan Raya Pada Penerima	60
Rajah 4.9	Graf Nilai Hingar Kereta Api Pada Penerima	60
Rajah 4.10	Graf Bar Kesan Ketinggian Penghadang Bunyi	63

No. Gambar	Halaman
Gambar 3.1 Lokasi Kajian 1 Stesen KTMB UKM	41
Gambar 3.2 Kawasan Kg. Sungai Tangkas bersebelahan Stesen KTMB UKM	41
Gambar 3.3 Lokasi Kajian 2 Masjid Teras Jernang	42
Gambar 3.4 Lebuhraya bersebelah Masjid Teras Jernang	42
Gambar 3.5 Sound level meter 01dB Solo GDS-S DUO	43

SENARAI SINGKATAN

AELB	Atomic Energy Licensing Board
CSV	Comma-Separated Value
DOE	Department of Environment
HVAC	Heating, Ventilation, And Air Conditioning
IAEA	International Atomic Energy Agency
KTM	Kereta Api Tanah Melayu
KTMB	Kereta Api Tanah Melayu Berhad
PLUS	Projek Lebuhraya Utara-Selatan
SLM	Sound Level Meter
UIC	International Union Of Railways
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
UNEP	United Nations Environment Programme
WHO	World Health Organization

BAB I

PENGENALAN

1.1 PENDAHULUAN

Dalam kehidupan moden yang semakin pesat dengan pembangunan, bunyi bising telah menjadi salah satu isu pencemaran alam sekitar yang sangat kritikal. Pertumbuhan pesat infrastruktur pengangkutan seperti jalan raya dan kereta api memainkan peranan penting dalam memacu pembangunan ekonomi, namun ia juga membawa cabaran yang besar terhadap kesejahteraan manusia dan alam sekitar. Sistem pengangkutan yang efisien kini telah menjadi keperluan utama dalam memastikan pergerakan manusia dan barang-barangan, namun kebergantungan terhadap infrastruktur ini telah meningkatkan pendedahan kepada pencemaran bunyi yang memberikan kesan langsung dan tidak langsung terhadap kualiti hidup penduduk di kawasan sekitarnya.

Pencemaran bunyi atau hingar, khususnya dari sumber jalan raya dan kereta api, adalah antara penyumbang terbesar kepada pencemaran bunyi di kawasan bandar. Di Malaysia, jumlah kenderaan di jalan raya terus meningkat setiap tahun (Abas et al. 2017), dan sistem kereta api yang sedang diperluaskan sebagai alternatif pengangkutan massa turut menyumbang kepada peningkatan hingar. Kajian mendapati bahawa bunyi dari enjin kenderaan, geseran tayar di atas permukaan jalan, hon, dan deruman kereta api menghasilkan bunyi yang sering melebihi had kebisingan yang ditetapkan oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia, iaitu 60 dBA pada waktu siang dan 55 dBA pada waktu malam (Jabatan Alam Sekitar 2020). Di kawasan padat penduduk seperti bandar-bandar utama, tahap kebisingan ini boleh mencecah sehingga 75-85 dBA, yang melebihi paras selamat untuk kesihatan manusia.

Pencemaran bunyi bukan sekadar gangguan bunyi biasa, tetapi ia memberikan kesan yang signifikan terhadap kesejahteraan manusia dan alam sekitar. Kajian menunjukkan bahawa pendedahan berterusan kepada hingar yang tinggi boleh menyebabkan pelbagai masalah kesihatan seperti tekanan, keletihan mental, gangguan tidur, kehilangan pendengaran, dan penyakit kardiovaskular (Yang et al. 2023). Di kawasan berhampiran jalan raya dan landasan kereta api, penduduk sering melaporkan masalah seperti ketidakselesaan ketika berkomunikasi, kesukaran untuk menumpukan perhatian, dan kualiti hidup yang terjejas akibat bunyi yang berterusan. Bagi golongan kanak-kanak, pendedahan kepada hingar yang tinggi boleh mengganggu perkembangan kognitif mereka, termasuk penurunan prestasi pembelajaran di sekolah (Rusmailani & Fatimah 2013).

Selain kesan kepada manusia, hingar juga memberi impak terhadap ekosistem semula jadi. Bunyi bising dari jalan raya dan kereta api boleh mengganggu pola kelakuan haiwan, termasuk mengurangkan kemampuan mereka untuk berkomunikasi, mencari makanan, dan membiak (Kok et al. 2023). Dalam konteks ini, kawasan hijau yang berfungsi sebagai penampan semula jadi turut terjejas akibat gangguan bunyi dari sumber pengangkutan.

Untuk menangani isu ini, penggunaan penghadang bunyi telah dikenalpasti sebagai salah satu kaedah yang paling berkesan dalam mengawal pencemaran bunyi daripada sumber jalan raya dan kereta api. Penghadang bunyi bukan sahaja berfungsi untuk mengurangkan intensiti bunyi tetapi juga melindungi penduduk yang tinggal berhampiran daripada kesan negatif bunyi bising. Penghadang ini direka bentuk untuk memantulkan, menyerap, atau memecahkan gelombang bunyi sebelum ia mencapai kawasan sensitif seperti perumahan, sekolah, hospital, atau taman awam (Eren et al. 2024).

Di Malaysia, reka bentuk penghadang bunyi masih dalam tahap perkembangan, dengan cabaran utama termasuk kos pembinaan yang tinggi, keperluan untuk penyelenggaraan, dan kesesuaian reka bentuk dengan persekitaran. Penghadang bunyi yang cekap perlu mempertimbangkan faktor seperti bahan binaan yang digunakan, ketinggian penghadang, jarak dari sumber hingar, dan keberkesanan akustiknya dalam pelbagai

keadaan (Kulkina et al. 2020). Bahan seperti konkrit, logam, dan polikarbonat sering digunakan, namun inovasi baru seperti penggunaan bahan mesra alam, teknologi hijau, dan penanaman tumbuhan pada penghadang telah mula diterokai untuk meningkatkan keberkesannya.

Selain itu, cabaran dalam mengurangkan hingar jalan raya dan kereta api memerlukan pendekatan bersepadu yang melibatkan pelbagai disiplin, termasuk kejuruteraan akustik, reka bentuk landskap, dan perancangan bandar. Penggunaan teknologi simulasi akustik untuk meramal prestasi penghadang bunyi, serta kajian lapangan untuk menilai kesan sebenar terhadap kawasan sekitar, adalah penting dalam memastikan keberkesanan reka bentuk. Kajian ini memberi tumpuan kepada pembangunan penghadang bunyi yang bukan sahaja mampu mengurangkan tahap kebisingan secara signifikan, tetapi juga memenuhi keperluan dari segi kos, ketahanan, dan keserasian dengan persekitaran fizikal dan sosial.

Melalui kajian ini, diharapkan reka bentuk penghadang bunyi yang inovatif dapat memainkan peranan penting dalam mengurangkan kesan negatif pencemaran bunyi daripada sumber jalan raya dan kereta api. Ini bukan sahaja menyokong matlamat pembangunan mampan tetapi juga memberikan penyelesaian praktikal untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan melindungi alam sekitar daripada kesan pencemaran bunyi yang semakin membimbangkan (Jiang et al. 2023).

1.2 PERMASALAHAN KAJIAN

Walaupun tahap hingar dari jalan raya dan kereta api diketahui berbeza mengikut jenis kenderaan, kelajuan, dan permukaan jalan, pencirian yang menyeluruh terhadap hingar ini masih menjadi cabaran. Namun begitu, faktor seperti cuaca, waktu beroperasi, dan corak lalu lintas juga sering diabaikan dalam analisis hingar, menyebabkan data yang diperoleh tidak konsisten dan sukar diterjemahkan ke dalam penyelesaian yang praktikal. Kekurangan pemahaman yang mendalam terhadap faktor-faktor ini mengakibatkan kesukaran dalam merancang langkah untuk mengatasi bunyi hingar yang benar-benar efektif (International Union of Railways (UIC) 2022).

Selain itu, meskipun pelbagai reka bentuk penghadang bunyi telah diperkenalkan, banyak yang tidak mengoptimalkan geometri untuk meningkatkan keupayaan penyerapan bunyi. Walaupun aspek seperti ketinggian, ketebalan, dan sudut penghadang diketahui mempengaruhi prestasinya, reka bentuk yang digunakan seringkali tidak berdasarkan kajian saintifik yang terperinci (Environment Protection Authority 2013). Walaubagaimanapun, kekurangan panduan yang jelas mengenai parameter ini menyebabkan penghadang yang dibina gagal mencapai keberkesanan maksimum, terutamanya di kawasan yang terdedah kepada hingar yang tinggi seperti lebuhraya dan landasan kereta api (Shahidan et al. 2017).

Bagi menangani cabaran ini, teknologi simulasi telah diperkenalkan sebagai alat untuk mempermudah penilaian dan penambahbaikan reka bentuk penghadang bunyi. Perisian simulasi hingar menawarkan keupayaan untuk menganalisis prestasi penghadang dalam pelbagai senario, termasuk kesan faktor seperti geometri penghadang, parameter hingar, dan persekitaran sekeliling. Walau bagaimanapun, keberkesanan perisian ini masih bergantung kepada ketepatan data yang dimasukkan dan algoritma pengiraan yang digunakan. Tanpa kajian yang menyeluruh melalui kajian lapangan atau data empirikal, hasil simulasi mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan situasi sebenar (Wrótny & Bohatkiewicz 2021). Oleh itu, penentusahan reka bentuk penghadang bunyi melalui perisian hingar adalah kritikal untuk memastikan penyelesaian yang dicadangkan bukan sahaja efektif dalam simulasi tetapi juga praktikal apabila diterapkan dalam keadaan sebenar (Park & Haan 2015).

1.3 OBJEKTIF KAJIAN

Kajian ini memfokuskan tentang reka bentuk penghadang bunyi untuk sumber hingar jalan raya dan kereta api bunyi hingar dengan:

- i. Pencirian hingar dari sumber jalan raya dan kereta api serta faktor-faktor yang mempengaruhinya.
- ii. Mereka bentuk geometri penghadang bunyi yang mampu memaksimumkan penyerapan bunyi

- iii. Penentusahan rekabentuk penghadang bunyi melalui perisian hingar

1.4 SKOP KAJIAN

Kajian ini memfokuskan kepada dua sumber hingar iaitu hingar pada kereta api dan juga hingar pada lebuh raya. Lokasi kajian telah dikenalpasti bagi setiap sumber hingar tersebut. Lokasi yang pertama ialah di Stesen KTM UKM dan lokasi kedua ialah di Masjid Teras Jernang yang bersebelahan dengan Lebuhraya PLUS. Kaedah pengumpulan data adalah menggunakan alat pengukur tahap bunyi dan pengumpulan data dilakukan semasa waktu puncak iaitu pada awal pagi dan juga pada waktu petang.

BAB II

KAJIAN LITERASI

2.1 PENGENALAN

Pada masa kini, isu hingar telah menjadi salah satu bentuk pencemaran alam sekitar yang semakin membimbangkan. Dalam usaha membendung masalah ini daripada menjadi lebih serius, Parlimen Malaysia telah menggubal Akta Kualiti Alam Sekeliling 1974, yang meliputi keseluruhan aspek pengurusan alam sekitar di seluruh negara. Akta ini telah melalui pindaan penting pada tahun 1985 dan 1996, dengan tujuan memperketatkan hukuman kepada pihak-pihak yang melanggar peraturan. Misalnya, bagi kesalahan serius yang melibatkan bunyi bising yang melebihi tahap yang dibenarkan, denda atau hukuman yang lebih berat dikenakan untuk memastikan pematuhan yang lebih baik (Jabatan Alam Sekitar 2020). Langkah ini sejajar dengan piawaian antarabangsa yang menetapkan kawalan hingar sebagai salah satu elemen penting dalam pembangunan mampan (UNEP 2019).

Secara umumnya, bunyi adalah isyarat akustik yang dapat didengar oleh telinga manusia, manakala hingar pula merujuk kepada bunyi yang tidak diingini atau mengganggu, terutamanya pada aras yang tinggi. Takrifan hingar sering kali menjadi subjektif kerana persepsi terhadap bunyi bergantung kepada individu. Menurut kajian Kerse (1975), kesukaran dalam menilai bunyi secara objektif menyebabkan cabaran dalam menentukan garis panduan yang universal. Di Malaysia, hingar sering berpunca daripada sumber seperti kenderaan di jalan raya, kereta api, kilang-kilang, stesen janakuasa, lapangan terbang, serta pusat hiburan dan aktiviti pembinaan. Kajian oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia (DOE) mendapati bahawa kenderaan merupakan penyumbang utama kepada hingar di kawasan bandar, dengan tahap hingar purata melebihi 70 dB(A), yang boleh menjejaskan keselesaan dan kesihatan awam jika tidak dikawal.

Jika bunyi bising daripada punca-punca ini tidak dikawal dengan berkesan, ia akan membawa pelbagai kesan negatif, bukan sahaja kepada manusia, malah kepada haiwan dan persekitaran. Menurut Pertubuhan Kesihatan Sedunia (WHO) 2018, pendedahan kepada hingar yang berlebihan boleh menyebabkan tekanan darah tinggi, gangguan tidur, gangguan mental, dan penurunan produktiviti. Di samping itu, haiwan yang terdedah kepada hingar yang tinggi mungkin menghadapi perubahan tingkah laku atau gangguan ekologi, terutamanya di kawasan habitat yang berdekatan dengan pembangunan manusia. Selain itu, ia juga turut mempengaruhi ekonomi negara, kerana gangguan terhadap aktiviti harian boleh menjejaskan keberkesanan kerja dan produktiviti. Oleh itu, kawalan yang lebih komprehensif terhadap pencemaran hingar diperlukan untuk memastikan kesejahteraan rakyat dan kelestarian alam sekitar terus terpelihara.

Kajian literasi ini bertujuan untuk mengkaji dan merumuskan pelbagai pendekatan yang digunakan dalam reka bentuk penghadang bunyi untuk sumber hingar jalan raya dan kereta api, serta menilai keberkesanan teknik dan bahan yang digunakan berdasarkan kajian-kajian terdahulu

2.2 KONSEP ASAS BUNYI DAN AKUSTIK

Bunyi adalah fenomena yang kompleks yang terdiri daripada pemampatan dan pengembangan udara yang bergantian yang menjana gelombang ke semua arah dari sumbernya. Bunyi juga ialah getaran yang bergerak sebagai gelombang mekanikal melalui pelbagai jenis medium mampat seperti udara, gas, cecair, atau pepejal (Scarneciu et al. 2010; Jaka Sodnik & Sašo Tomažič 2015). Getaran ini dihantar sebagai gelombang mekanikal, yang boleh bersifat membujur dalam kebanyakan kes atau melintang dalam pepejal (Jaka Sodnik & Sašo Tomažič 2015). Gelombang bunyi juga memainkan peranan penting dalam pelbagai aplikasi seperti komunikasi, perubatan, dan reka bentuk akustik.

Bunyi dirasai apabila getaran ini sampai ke telinga manusia atau haiwan, menyebabkan sistem pendengaran mentafsir gelombang mekanikal ini sebagai fenomena yang boleh didengar (Fink 2019; Ravikant Pareek 2022). Had pendengaran manusia biasa adalah sekitar 20 Hz hingga 20,000 Hz, tetapi kepekaan ini berkurang dengan usia. Dalam

aplikasi teknologi, seperti alat bantuan pendengaran, pemahaman tentang frekuensi bunyi yang dapat diterima manusia sangat penting untuk meningkatkan kualiti bunyi. Selain itu, faktor psikologi dan persekitaran, seperti tahap kebisingan latar belakang, turut mempengaruhi persepsi bunyi.

2.2.1 Sifat Bunyi

Menurut Scarneciu et al. (2010); Jaka Sodnik dan Sašo Tomažič (2015) lagi, dalam konsep transmisi gelombang bunyi pula, ianya memerlukan medium untuk bergerak dan ia merambat dengan menyebabkan zarah-zarah dalam medium berayun dan memindahkan tenaga dari satu zarah ke zarah yang lain. Contohnya, dalam aplikasi akustik, pemahaman mengenai perambatan bunyi melalui medium seperti udara dan air sangat penting untuk reka bentuk peranti seperti mikrofon dan sonar. Selain itu, kehadiran faktor seperti suhu, tekanan, dan ketumpatan medium juga mempengaruhi kecekapan transmisi gelombang bunyi.

Antara sifat-sifat utama bunyi ialah termasuk amplitud, frekuensi, panjang gelombang, dan kelajuan perambatan. Kelajuan bunyi bergantung pada medium yang dilaluinya, iaitu kira-kira 343 meter sesaat dalam udara pada suhu 20°C, 1500 meter sesaat dalam air, dan 5200 meter sesaat dalam besi (Jaka Sodnik & Sašo Tomažič 2015). Frekuensi menentukan nada bunyi, dengan frekuensi lebih tinggi menghasilkan bunyi yang lebih nyaring. Panjang gelombang dan amplitud pula mempengaruhi intensiti dan kelantangan bunyi, yang boleh diterapkan dalam reka bentuk sistem pembesar suara atau peralatan muzik.

2.2.2 Prinsip Asas Akustik

Prinsip asas akustik merangkumi pelbagai fenomena yang menjelaskan bagaimana bunyi berinteraksi dengan persekitaran. Antara prinsip penting yang sering dikaji ialah pemantulan, penyerapan, difraksi, dan transmisi bunyi. Pemahaman terhadap prinsip-prinsip ini adalah kunci dalam merancang dan mengawal kesan bunyi dalam pelbagai aplikasi, termasuk reka bentuk penghadang bunyi, bilik akustik, dan kawalan bunyi perindustrian. Dengan mengaplikasikan prinsip-prinsip ini, kecekapan dalam mengawal penyebaran bunyi dan mengurangkan hingar dapat dicapai dengan lebih berkesan.

Refleksi merujuk kepada fenomena apabila gelombang bunyi memantul dari suatu permukaan kembali ke medium asalnya. Refleksi bunyi boleh bersifat seperti cermin bergantung kepada ciri permukaan (Saviojemet al. 2015). Sama seperti gelombang cahaya, sudut pantulan adalah sama dengan sudut ianya datang (Lekner 2016). Keberkesanan refleksi bunyi turut dipengaruhi oleh impedans akustik bahan yang terlibat (Drury 2004). Refleksi bunyi memainkan peranan penting dalam akustik, terutamanya dalam menentukan kualiti gema dan kejelasan bunyi dalam ruang seperti auditorium atau teater.

Penyerapan pula ialah proses di mana tenaga bunyi diserap oleh bahan dan ditukar kepada bentuk tenaga lain, biasanya haba. Setiap bahan mempunyai pekali serapan yang berbeza, yang boleh diukur dalam kebuk gema. Serapan bunyi dipengaruhi oleh impedans permukaan bahan dan geometri permukaannya (Rindel et al. 2022). Dalam aplikasi kawalan hingar, bahan dengan pekali serapan tinggi, seperti panel akustik atau busa penyerap bunyi, sangat diperlukan untuk mengurangkan pantulan dan meningkatkan kualiti akustik persekitaran (Fang et al. 2018). Contohnya, dinding bersalut bahan penyerap digunakan dalam bilik rakaman untuk mengelakkan gema yang tidak diingini.

Manakala, difraksi adalah proses pembelokan dan penyebaran gelombang bunyi di sekitar halangan atau melalui bukaan. Difraksi sangat penting dalam meramalkan perambatan bunyi di sekitar penghadang, seperti penghadang hingar di sepanjang lebuh raya, dan dalam bilik akustik (Xiang & Rozynova 2017). Teori fizikal difraksi sering digunakan untuk menyelesaikan masalah penyebaran akustik. Kesan difraksi di tepi struktur sangat penting dalam memahami tingkah laku bunyi dalam persekitaran yang kompleks, seperti dalam rekaan penghadang bunyi untuk meminimumkan kebisingan lalu lintas (Xiang & Rozynova 2017).

Akhir sekali transmisi bunyi adalah proses di mana gelombang bunyi melalui suatu medium atau dari satu medium ke medium lain. Transmisi bunyi dipengaruhi oleh ketidakpadanan impedans akustik antara medium yang berbeza (Drury 2004). Pekali transmisi menentukan sejauh mana bunyi dapat melalui satu sempadan (Saimanova et al. 2020). Transmisi bunyi dapat dikawal menggunakan bahan yang direka untuk sifat

akustik tertentu, seperti metasurfaces, yang dapat mengarahkan atau mengurangi transmisi bunyi dengan berkesan. Dalam rekaan bangunan, contohnya, dinding yang diperkuat dengan lapisan akustik digunakan untuk mencegah pemindahan bunyi antara bilik.

Keempat-empat fenomena ini iaitu refleksi, serapan, difraksi, dan transmisi adalah asas dalam memahami tingkah laku bunyi dalam pelbagai konteks, daripada reka bentuk akustik dalaman hingga kawalan hingar dalam persekitaran luaran. Setiap fenomena mempunyai cara tersendiri untuk menguruskan bunyi secara berkesan.

2.3 HINGAR

Bunyi bising atau hingar secara umum didefinisikan sebagai bunyi yang tidak diingini, yang boleh menjadi tidak menyenangkan, mengganggu, atau tidak dikehendaki. Definisi ini adalah subjektif dan boleh berbeza bergantung kepada persepsi individu (Rood et al. 2016). Menurut Bridgewater et al. (2011), hingar ditakrifkan sebagai bunyi yang tidak diingini. Selain itu, hingar juga digambarkan sebagai tenaga akustik yang boleh didengar dan memberi kesan buruk terhadap kesejahteraan fisiologi dan psikologi manusia (Olaosun 2009). Ia boleh dicirikan berdasarkan frekuensinya, intensiti, spektrum frekuensi, dan bentuk tekanan bunyi dalam tempoh masa tertentu (Dimov 2023). Tambahan, bunyi bising sering dikaitkan dengan masalah alam sekitar seperti pencemaran bunyi dari lalu lintas, industri, atau pembinaan. Persepsi terhadap bunyi bising juga dipengaruhi oleh konteks, seperti waktu dan lokasi, di mana bunyi yang dianggap bising di satu tempat mungkin diterima sebagai bunyi biasa di tempat lain.

Secara fizikal, tiada perbezaan antara bunyi dan hingar: bunyi adalah persepsi deria yang ditimbulkan oleh proses fisiologi dalam otak pendengaran. Pola kompleks gelombang bunyi ini dipersepsikan sebagai "Gestalt" dan dilabelkan sebagai hingar, muzik, pertuturan, dan sebagainya. Oleh itu, tidak mungkin untuk mentakrifkan hingar semata-mata berdasarkan parameter fizikal bunyi. Sebaliknya, adalah amalan biasa untuk mentakrifkan hingar hanya sebagai bunyi yang tidak diingini. Walau bagaimanapun, dalam beberapa situasi, hingar mungkin memberi kesan buruk terhadap kesihatan dalam bentuk tenaga akustik (Berglund et al. 1995).

Berhubung dengan itu, Wardika et al. (2012) juga telah mendefinisikan hingar dalam tiga kelas;

- 1) Bunyi yang datang dalam gelombang terputus-putus dan bukannya berterusan yang dipanggil "impulsive noise". Contohnya adalah bunyi dram yang dipukul.
- 2) Bunyi berterusan yang berlangsung lama dipanggil "continuing noise". Contohnya adalah bunyi mesin bermotor yang berdengung semasa ia berjalan.
- 3) Akhir sekali adalah hingar separa berterusan atau hingar berselang-seli. Jenis hingar ini datang dalam gelombang sederhana panjang yang kadangkala muncul pada waktu tertentu, seperti bunyi kenderaan seperti kereta api, kapal terbang, kereta, lori, dan bas. Bunyi bising yang berlaku akibat trafik adalah bunyi yang tidak dapat dielakkan dalam dunia moden tetapi juga merupakan salah satu bunyi yang paling tidak diingini.

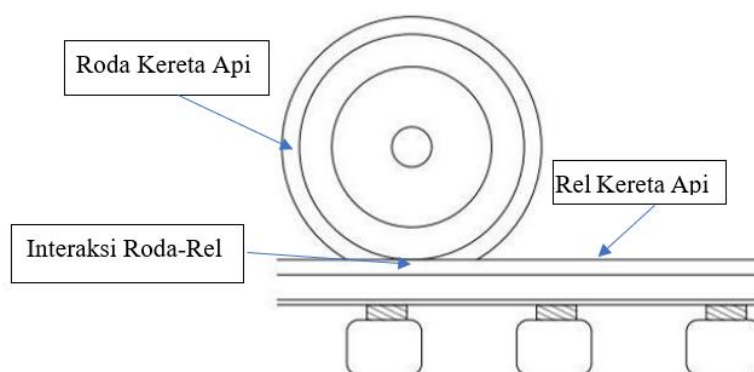
2.3.1 Sumber Bunyi Hingar Kereta Api

Pencemaran bunyi yang berpunca daripada kereta api di kawasan perumahan sering berlaku akibat peningkatan jumlah perjalanan kereta api, terutama semasa waktu puncak. Sumber bunyi kereta api mungkin berasal daripada badan kereta api itu sendiri atau interaksi dengan komponen lain seperti landasan dan daya angin. Dalam kereta api berkelajuan tinggi, bunyi aerodinamik daripada pantograf menjadi sumber utama bunyi (Xiaowan et al. 2021). Menurut Zhenxu et al. (2019), pantograf kereta api berkelajuan tinggi merupakan struktur kompleks yang terdiri daripada pelbagai komponen berbentuk rod dan segi empat tepat. Aliran udara di sekitar pantograf menghasilkan fenomena kompleks yang menyumbang kepada penghasilan bunyi aerodinamik.

Tae et al. (2011) pula menjelaskan bahawa peningkatan kelajuan kereta api akan meningkatkan bunyi aerodinamik yang dihasilkannya. Berdasarkan kajian mereka, kira-kira 1.7 juta orang yang tinggal berhampiran landasan kereta api di Korea terkesan dengan pencemaran bunyi. Bunyi daripada kereta api boleh didengar sama ada di dalam atau di luar kereta api. Banyak bahagian kereta api menyumbang kepada bunyi ini, terutamanya ketika ia bergerak di atas landasan. Sumber bunyi termasuk enjin, sistem penghawa dingin (HVAC), badan lokomotif, ruang udara antara gerabak, serta geseran antara roda dan landasan. Jadual 1 menunjukkan had bunyi maksimum yang dibenarkan

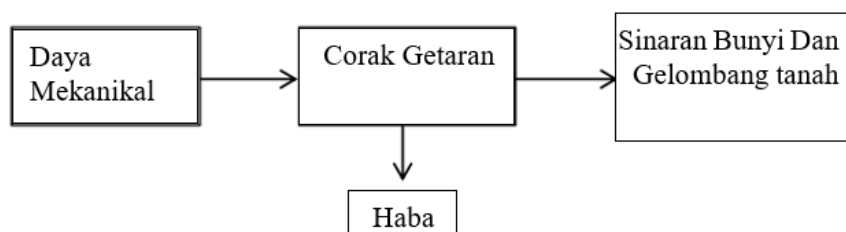
oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia. Oleh kerana sebahagian landasan kereta api berdekatan dengan kawasan perumahan, tahap bunyi yang dibenarkan untuk penduduk ialah 65 dBA pada waktu pagi dan 60 dBA pada waktu malam (Jabatan Alam Sekitar 2020).

Kajian-kajian terdahulu telah mendapati bahawa terdapat beberapa faktor yang menyumbang kepada sumber hingar daripada kereta api, sama ada kereta api kargo, kereta api berkelajuan tinggi, kereta api antara bandar, atau kereta api bandar (Na'im 2015). Menurut Ogren (2006) pula, terdapat tiga sumber utama yang menyumbang kepada hingar kereta api. Pertama, hingar berasal daripada objek bergolek iaitu interaksi antara roda dan rel di bawah gerabak kereta api. Ini berlaku disebabkan oleh sentuhan fizikal utama antara roda kereta api dan rel yang bertanggungjawab terhadap getaran yang terhasil. Rajah 1 menunjukkan lakaran roda di atas landasan rel. Apabila roda bergolek di atas rel, ketidaksamaan kecil pada roda dan rel menyebabkan daya pada kedua-duanya. Daya ini menghasilkan getaran ke seluruh sistem yang seterusnya memancarkan bunyi. Mekanisme penjanaan bunyi ini dikenali sebagai "rolling noise".



Rajah 2.1 Lakaran interaksi roda-rel dan landasan termasuk pelapik dan pad (Ogren, 2006).

Penjelasan lanjut mengenai aliran kuasa mekanikal melalui sistem ini boleh digambarkan melalui carta aliran mudah dalam Rajah 2. Tenaga dihasilkan oleh daya pada kawasan sentuhan dan dipancarkan melalui getaran atau hilang sebagai haba.



Rajah 2.2 Aliran kuasa dari kawasan sentuhan yang menghubungkan roda dan rel (Ogren, 2006).

Sumber hingar kedua ialah bunyi mencicit di selekoh, iaitu bunyi tonal yang kuat yang berlaku apabila kenderaan rel melalui selekoh atau suis. Proses ini bermula dengan sama ada geseran lateral di kawasan sentuhan antara rel dan roda atau geseran sisi roda terhadap rel. Apabila proses "stick-slip" di kawasan tersebut menjadi tidak stabil, sebagai contoh, apabila terdapat maklum balas yang menyebabkan ketidakstabilan, roda akan memancarkan bunyi tonal.

Ketiga, sumber hingar aeroakustik berkait rapat dengan aliran udara di mana turbulens dan bunyi akan dipancarkan. Pada kelajuan tinggi lebih daripada 300 km/j, bunyi yang pancarkan menjadi ketara. Pantograf merupakan kawasan yang sering menjadi masalah, selain struktur lain yang menonjol dari bahagian luar kereta api. Recesses dan lapisan sempadan turbulens pada permukaan kereta api juga penting. Tenaga bunyi yang dipancarkan oleh sumber aeroakustik sangat bergantung kepada kelajuan kereta api. Selain itu, sumber hingar yang lain ialah termasuk mesin pada kereta api seperti kipas penyejuk dan pemancar kuasa. Jika direka bentuk tanpa mengambil kira konsep aerodinamik, ia akan menyumbang kepada jumlah hingar yang tinggi oleh kenderaan (Ogren 2006).

Selain itu, menurut kajian daripada European Communities (2003) pula telah menyenaraikan kelajuan kereta api sebagai parameter utama yang mempengaruhi

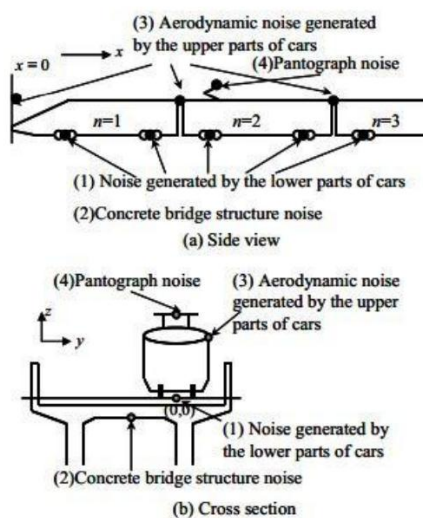
pelepasan hingar. Hingar yang dihasilkan oleh sistem tarikan dan sistem tambahan biasanya terhasil daripada kereta api yang menggunakan diesel, kereta api kuasa elektrik, dan juga peralatan penyejukan dan pemampat kereta api itu sendiri. Hingar "rolling noise" iaitu geseran antara roda-rel menjadi sumber utama sehingga kelajuan sekitar 200-300 km/j, selepas itu hingar aerodinamik menjadi sumber utama yang baru. Kelajuan peralihan dari hingar tarikan kepada hingar "rolling noise" dan dari "rolling noise" kepada hingar aerodinamik bergantung sepenuhnya kepada kekuatan relatif sumber-sumber ini.



Rajah 2.3 Sumber bunyi luar kereta api dan pergantungan biasa terhadap kelajuan kereta api (Komuniti Eropah, 2003).

Bagi kereta api Jepun 'shinkansen', sumber hingar dibahagikan kepada empat komponen iaitu hingar yang dijana oleh bahagian bawah gerabak (terdiri daripada hingar "rolling noise", hingar aerodinamik, dan hingar gear), hingar struktur jambatan konkrit, hingar aerodinamik yang dijana oleh bahagian atas gerabak, dan hingar pantograf yang terdiri daripada hingar aerodinamik dan hingar percikan. Kedudukan

sumber hingar pada kereta api shinkansen ditunjukkan dalam Rajah 4 di mana koordinat sumber hingar dilabelkan masing-masing (Nagakura dan Zenda, t.t).



Rajah 2.4 Kedudukan sumber hingar (Nagakura dan Zenda, t.t).

2.3.2 Hingar Jalan Raya

Pendedahan kepada bunyi hingar telah diakui sebagai salah satu faktor utama terhadap kesihatan manusia, dengan bunyi lalu lintas menjadi sumber bunyi yang paling dominan (Hanninen et al. 2014). Bunyi lalu lintas merupakan sumber utama pencemaran bunyi di persekitaran bandar moden (Thakre et al. 2020). Menurut statistik pada tahun 2020, lebih dari satu per lima populasi eropah terdedah kepada bunyi hingar lalu lintas yang memberikan kesan kepada kesihatan mereka, dan purata bunyi hingar lalu lintas harian di bandar-bandar utama di China melebihi 66 dB (Kementerian Ekologi dan Alam Sekitar Republik Rakyat China 2021).

2.3.3 Sumber Bunyi Hingar Jalan Raya

Menurut penemuan penyelidikan fizik, bunyi lalu lintas dihasilkan bersama dengan kehilangan tenaga dalam kenderaan yang bergerak (Wentzel & Aubert 2008). Bunyi difahami sebagai satu bentuk pertukaran tenaga dalam kenderaan (Acri et al. 2019). Penghasilan bunyi kenderaan berkait rapat dengan kehilangan tenaga. Sebagai contoh, kehilangan tenaga daripada geseran tayar kenderaan dikaitkan dengan bunyi tayar, penggunaan tenaga akibat rintangan udara dikaitkan dengan bunyi angin, dan

kehilangan tenaga dalaman dalam kenderaan pula dikaitkan dengan bunyi dari sistem enjin dan transmisi (Kim & Yoon 2017).

Kebisingan lebuhraya merupakan salah satu isu alam sekitar yang signifikan, terhasil daripada tiga sumber utama yang berkaitan dengan kenderaan, iaitu interaksi tayar-permukaan jalan, bunyi enjin dan ekzos, serta kesan aerodinamik. Dalam interaksi antara tayar dan permukaan jalan, ia sering dirujuk sebagai bunyi gelungan, ia menjadi penyumbang utama kebisingan. Bunyi ini dipengaruhi oleh tekstur dan bahan permukaan jalan serta kelajuan dan jenis kenderaan (Putman et al. 2005). Ketidakrataan pada permukaan jalan, seperti sambungan konkrit atau jambatan, turut menghasilkan bunyi impuls akibat interaksi unik tayar-permukaan jalan di lokasi tersebut (Rasmussen et al. 2009). Selain itu, pemilihan bahan permukaan jalan seperti asfalt getah dapat membantu mengurangkan bunyi yang dijana melalui interaksi ini, menjadikannya pilihan praktikal untuk kawasan sensitif bunyi seperti kawasan perumahan.

Seterusnya ialah bunyi enjin dan sistem ekzos kenderaan yang juga merupakan penyumbang utama kebisingan lebuhraya. Bunyi ini merangkumi getaran enjin, ekzos, dan operasi mekanikal kenderaan (Putman et al. 2005; Simion et al. 2024). Kenderaan berat seperti lori dan bas menghasilkan tahap bunyi enjin dan ekzos yang lebih tinggi berbanding kenderaan ringan seperti sedan atau trak pikap (Shaaban & Abdelrahman Abouzaid 2023). Faktor ini lebih ketara di kawasan berbukit atau semasa kenderaan berat bergerak perlahan, kerana beban enjin yang lebih tinggi meningkatkan kebisingan. Penggunaan teknologi moden seperti enjin hibrid dan ekzos bersenyap boleh menjadi langkah penting dalam mengurangkan bunyi yang dijana oleh kenderaan berat, terutamanya di kawasan bandar (Simion et al. 2024).

Sumber seterusnya berlaku pada kelajuan tinggi, iaitu bunyi aerodinamik yang menjadi dominan. Bunyi ini terhasil daripada aliran udara di sekeliling badan kenderaan dan dipengaruhi oleh bentuk serta kelajuan kenderaan (Putman et al. 2005). Kenderaan dengan reka bentuk aerodinamik yang lebih baik, seperti kereta elektrik moden, cenderung menghasilkan bunyi aerodinamik yang lebih rendah, yang menjadikannya pilihan yang lebih mesra alam. Di samping itu, penggunaan pelindung angin pada

kenderaan berat dapat membantu mengurangkan bunyi aerodinamik yang dihasilkan, terutamanya semasa perjalanan di lebuhraya (Putman et al. 2005).

2.4 PENGHADANG BUNYI

Penghadang bunyi adalah struktur yang direka khas untuk mengurangkan tahap bunyi udara antara sumber bunyi dan penerima. Ia didapati berkesan untuk mengurangkan pencemaran bunyi (Halim et al. 2018). Penghadang bunyi ini biasanya digunakan untuk mengawal bunyi yang berasal daripada lalu lintas jalan raya, kereta api, peralatan industri, dan sumber bunyi alam sekitar lainnya (Gasparoni et al. 2012). Tujuan utama penghadang bunyi adalah untuk meminimumkan gangguan bunyi yang boleh memberi kesan negatif kepada kualiti hidup manusia dan ekosistem sekitar. Bunyi yang dihasilkan oleh kenderaan di jalan raya atau kereta api boleh menjejaskan kesejahteraan dan kesihatan penduduk yang tinggal berhampiran. Oleh itu, penghadang bunyi berfungsi sebagai pelindung yang menghalang bunyi daripada merentasi jarak yang besar, mengurangkan kebisingan di kawasan yang terdedah, seperti kawasan perumahan atau kawasan sensitif alam sekitar.

2.4.1 Ketinggian dan Panjang Penghadang

Ketinggian penghadang memainkan peranan penting dalam menentukan keberkesanannya. Sebagai contoh, penghadang berbentuk T setinggi 3 meter boleh memberikan prestasi yang setanding dengan penghadang rata setinggi 10 meter, menunjukkan bahawa bentuk dan bahan penghadang boleh menggantikan keperluan ketinggian tertentu (Ishizuka et al. 2004). Selain itu, meningkatkan ketinggian penghadang juga penting untuk mengelakkan kenderaan daripada terbabas di jalan raya, terutama di kawasan berisiko tinggi seperti selekoh tajam .

Reka bentuk ketinggian yang optimum mengambil kira keperluan untuk mengurangkan kebisingan serta keselamatan lalu lintas. Gabungan reka bentuk aerodinamik dan bahan penyerap bunyi boleh meningkatkan keberkesanan penghadang tanpa perlu menggunakan ketinggian yang melampau. Panjang penghadang juga perlu dirancang untuk memastikan perlindungan yang menyeluruh di sepanjang kawasan yang terdedah kepada bunyi bising.

2.4.2 Bentuk Geometri Penghadang Bunyi

Penghadang berbentuk sudut dengan sudut sekitar 19 derajat telah menunjukkan peningkatan yang ketara dalam pengurangan bunyi, terutamanya pada frekuensi rendah (Moradi et al. 2019). Penghadang berbentuk T, terutamanya yang mempunyai bahagian tepi yang lembut atau bahan penyerap, juga meningkatkan keberkesanan dengan mengurangkan bunyi lebih efisien berbanding penghadang rata (Ishizuka et al. 2004). Reka bentuk ini bukan sahaja memanfaatkan bentuk geometri untuk memaksimumkan penyerap bunyi tetapi juga mengurangkan pantulan bunyi ke arah sumber.

Penghadang melengkung dan yang menggunakan tiang gantung dapat meningkatkan penyebaran bunyi secara berkesan, sekaligus mengurangkan kesan visual yang mencolok tanpa mengurangkan tahap prestasi (Venckus et al. 2011). Reka bentuk melengkung memberikan sudut pantulan yang lebih baik, yang membantu menyebarkan bunyi ke kawasan yang lebih luas, mengurangkan impak bunyi kepada penerima langsung.

Penghadang dengan reka bentuk bercorak, seperti jaring tenun dengan bentuk geometri seperti segi empat dan berlian, bukan sahaja berfungsi menyerap bunyi tetapi juga berkesan dalam menyerap tenaga impak dan mengurangkan tekanan pada struktur (Mikołajczyk et al. 2020). Struktur ini sesuai untuk kawasan yang memerlukan kombinasi perlindungan bunyi dan keselamatan struktur, seperti laluan yang kerap mengalami beban impak.

2.5 CIRI BAHAN AKUSTIK

Ketumpatan bahan adalah sifat penting yang mempengaruhi keupayaan menyerap bunyi. Bahan dengan ketumpatan rendah, seperti gentian kaca, membolehkan gelombang bunyi meresap ke dalam strukturnya, mengurangkan tenaga bunyi melalui geseran dalam ruang pori-porinya (Hur et al. 2005). Sebaliknya, bahan yang lebih padat, seperti konkrit, lebih cenderung memantulkan bunyi berbanding menyerapnya, menjadikannya kurang berkesan dalam mengurangkan kebisingan.

Porositi merujuk kepada jumlah ruang kosong dalam bahan. Bahan berpori seperti buih logam dan gentian kaca mempunyai rongga yang membolehkan gelombang bunyi memasuki bahan tersebut, di mana gelombang ini diubah menjadi tenaga haba melalui geseran dan disipasi. Porositi tinggi selalu dikaitkan dengan keupayaan bahan untuk menyerap bunyi pada pelbagai frekuensi, menjadikannya pilihan utama untuk aplikasi penghadang bunyi (Hur et al. 2005).

Pekali ini adalah ukuran keberkesanan bahan dalam menyerap bunyi. Nilainya adalah di antara 0 hingga 1, di mana 0 bermaksud semua bunyi dipantulkan, dan 1 bermaksud semua bunyi diserap. Bahan seperti gentian sinter dan buih logam mempunyai pekali penyerapan bunyi yang tinggi pada julat frekuensi tertentu, menjadikannya ideal untuk aplikasi pengurangan bunyi (Hur et al. 2005).

2.5.1 Bahan Konvensional vs Inovatif

Bahan tradisional seperti konkrit telah digunakan secara meluas untuk penghadang bunyi kerana ketumpatannya yang tinggi, yang memberikan prestasi penebatan bunyi yang baik. Kelebihannya termasuk kos yang rendah, mudah diperolehi, dan ketahanan terhadap api serta elemen persekitaran seperti angin dan hujan. Namun, bahan ini mempunyai kelemahan seperti berat yang tinggi, yang menyukarkan pemasangan dan memerlukan asas struktur yang kukuh. Selain itu, ia kurang fleksibiliti dalam reka bentuk untuk memenuhi keperluan bentuk atau corak tertentu (Ni Et al. 2008). Sebaliknya, bahan inovatif seperti komposit gentian karbon dan panel akustik berlubang menawarkan kelebihan yang lebih besar. Komposit gentian karbon yang terdiri daripada gentian karbon dan resin PU hibrid memberikan kekuatan tinggi dengan berat yang ringan serta peningkatan dalam kehilangan transmisi bunyi (Ridd dan Gilbert 2005). Menurut Chang (2024), panel akustik berlubang pula direka dengan struktur poros dan lubang yang meningkatkan keupayaan menyerap bunyi melalui porositi ganda, manakala bahan berasaskan seramik menunjukkan prestasi penyerapan bunyi yang tinggi akibat struktur mikroporinya. Bahan baru ini bukan sahaja lebih ringan dan mudah dipasang tetapi juga memberikan fleksibiliti reka bentuk dan prestasi penyerapan bunyi yang lebih baik, terutamanya pada frekuensi tinggi.

2.5.2 Ketahanan Bahan

Ketahanan bahan terhadap faktor persekitaran seperti cuaca, haba, dan kelembapan juga perlu diberi perhatian. Cuaca seperti angin silang dan kecerunan suhu boleh menjejaskan keberkesanan penghadang bunyi dengan mengubah trajektori gelombang bunyi, yang memerlukan bahan yang stabil secara termal dan mekanikal (Burgé 2010). Selain itu, haba yang tinggi, seperti di kawasan berhampiran rel kereta api atau kilang, boleh mengurangkan keberkesanan penghadang bunyi akibat radiasi haba, namun masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan bahan tahan haba seperti komposit gentian karbon (Shimizu et al. 2011). Kelembapan juga memainkan peranan penting, di mana bahan seperti gentian kaca menunjukkan penurunan dalam pekali penyerapan bunyi pada frekuensi tinggi apabila kandungan kelembapan meningkat, menurut D'Alessandro F. (2018) lagi, beberapa bahan semula jadi menunjukkan hubungan positif antara kandungan air dan prestasi akustik. Oleh itu, pemilihan bahan yang sesuai, termasuk pelapisan kalis air, amat penting untuk mengekalkan prestasi akustik penghadang bunyi dalam pelbagai keadaan persekitaran.

2.6 TAHAP HINGAR DI MALAYSIA DAN NEGARA LAIN

Menurut Golmohammadi et al. (2009), bunyi daripada lalu lintas jalan raya menjadi gangguan yang ketara, terutamanya di kawasan perumahan, dan merupakan sumber utama pencemaran bunyi persekitaran di kawasan bandar. Sehubungan itu, banyak negara telah menetapkan had pelepasan bunyi untuk kenderaan serta melaksanakan undang-undang untuk mengawal pencemaran bunyi lalu lintas. Di Malaysia, kawalan dan pemantauan bunyi dilakukan oleh Jabatan Alam Sekitar di bawah Kementerian Sumber Asli dan Alam Sekitar. Terdapat tiga dokumen panduan perundangan yang menyediakan had bunyi yang boleh diterima bagi pelbagai jenis guna tanah dan aktiviti manusia. Dokumen-dokumen ini menjadi rujukan penting untuk perancang, pembuat dasar, dan pihak-pihak lain yang terlibat dalam reka bentuk atau kelulusan pembangunan perancangan bandar dan infrastruktur.

Menurut garis panduan had dan kawalan bunyi persekitaran yang diterbitkan oleh Jabatan Alam Sekitar (DOE), terdapat jadual had kebisingan yang dibenarkan berdasarkan kategori kegunaan tanah untuk pelbagai aktiviti manusia. Ini termasuk

pembangunan kawasan baru, kawasan sedia ada, lalu lintas jalan raya, kereta api dan transit, serta aktiviti pembinaan, penyelenggaraan, dan perobohan (Jabatan Alam Sekitar 2020). Jadual perbandingan menunjukkan bahawa had bunyi yang ditetapkan di Malaysia lebih tinggi berbanding China dan Jepun. Walau bagaimanapun, had ini dianggap sesuai berdasarkan keadaan sosial dan ekonomi semasa negara. Sementara itu, garis panduan bunyi persekitaran yang dikeluarkan oleh WHO menyarankan agar pendedahan purata terhadap bunyi kereta api pada waktu siang dikurangkan kepada paras di bawah 54 dBA (WHO 2018).

Jadual 2.1 Tahap Had Bunyi (L_{Aeq}) daripada Kereta Api dan Tren Transit [Arbaan A. et al., 2022]

Kategori Penerima	L_{Aeq} Pagi (Malaysia)	L_{Aeq} Pagi (China)	L_{Aeq} Pagi (Japan)
	7.00 am – 10.00 pm	7.00 am – 10.00 pm	7.00 am – 10.00 pm
Kawasan sensitif bunyi, Kawasan Perumahan Berdensiti rendah dan sub-bandar	60 dBA	50 dBA	50 dBA
Kawasan Perumahan Bandar	65 dBA	55 dBA	55 dBA
Kawasan Komersial, Pembangunan Campuran	70 dBA	60 dBA	55 dBA
Kawasan Perindustrian	75 dBA	65 dBA	60 dBA

2.7 KESAN HINGAR

Peningkatan perkhidmatan kereta api di pelbagai negara telah membawa kepada masalah pencemaran bunyi. Bunyi daripada kereta api merupakan salah satu bentuk pencemaran bunyi persekitaran yang boleh mengganggu keupayaan menyelesaikan tugas kompleks, mempengaruhi tingkah laku sosial, serta menyebabkan gangguan kepada penumpang dan penduduk berhampiran. Kereta api menjadi salah satu penyumbang utama kepada bunyi bising yang memberi kesan buruk kepada persekitaran serta kesihatan manusia, termasuk kanak-kanak dan orang dewasa (Grubliauskas 2014).

Bunyi yang melebihi 55 dBA dianggap sebagai pencemaran bunyi, dan pendedahan kepada bunyi pada tahap ini untuk tempoh yang panjang boleh memberi kesan buruk terhadap kesihatan dan prestasi seseorang. Tahap bunyi yang berada dalam lingkungan 65 hingga 75 dBA boleh menyebabkan tekanan fizikal (Clausen et al. 2012). Bunyi yang kuat juga dikaitkan dengan peningkatan tekanan darah, penyakit jantung, gangguan tidur, dan stres (WHO 2018).

Kesan utama bunyi adalah gangguan tidur, dengan bunyi pada waktu malam sebagai sumber kebimbangan utama, terutamanya bagi golongan yang lebih tua. Kesan gangguan tidur cenderung menyebabkan kekurangan jam tidur, terbangun dari tidur, perubahan dalam tahap tidur, serta respons autonomi (contohnya perubahan dalam kadar denyutan jantung) (Tassi et al. 2010). Selain itu, pengurangan kualiti tidur mempunyai kesan sampingan yang biasanya dirasai pada hari berikutnya, termasuk keletihan, tidak dapat melakukan kerja dengan produktif, prestasi kognitif yang berkurang, perubahan dalam tingkah laku siang hari, serta perubahan mood dan emosi negatif. Sebenarnya, pendedahan kronik terhadap hingar persekitaran boleh menyebabkan gangguan tidur yang kekal (Murphy & King 2013).

Pelbagai kajian epidemiologi telah dilakukan untuk menunjukkan bahawa pendedahan jangka masa panjang kepada bunyi lalu lintas akan memberikan kesan kesihatan bukan sahaja kepada pendengaran, malah ia juga memberikan kesan ke atas sistem kardiovaskular (Babisch et al. 2005), kemurungan (Orban et al. 2016), gangguan tidur (Halonen et al. 2012), dan disfungsi kognitif (Stansfeld & Clark 2015). Persekitaran

akustik bandar yang keras ini bukan sahaja meningkatkan kejadian penyakit seperti diabetes (Shin et al. 2020) dan hipertensi (Stansfeld et al. 2021) dalam kalangan individu yang terdedah, tetapi juga mengganggu rutin kehidupan biasa haiwan seperti tikus (Di & Xu 2017). Oleh itu, mengurangkan bunyi lalu lintas adalah penting untuk mencapai pembangunan bandar yang mampan.

Menurut WHO (2011), kesan fisiologi dan psikologi hingar terhadap kanak-kanak adalah gangguan dalam pembelajaran dan ingatan. Kebolehan yang terjejas dalam pembelajaran adalah seperti pemprosesan bahasa, seperti kefahaman membaca, mengingat dan memberikan perhatian. Terdedah kepada hingar semasa tempoh kritikal pembelajaran di sekolah boleh menjejaskan perkembangan dan memberi kesan sepanjang hayat terhadap pencapaian pendidikan.

Kajian turut menunjukkan bahawa bunyi kereta api berkait rapat dengan peningkatan risiko kanser payudara (Sørensen et al. 2021). Bunyi yang kuat juga dikaitkan dengan gejala psikososial seperti stres, keletihan, ketidakselesaan perut, marah, kekecewaan, ketidakpuasan, pengasingan, keputusasaan, kemurungan, kebimbangan, atau kegelisahan (Elmenhorst et al. 2012). Gejala psikososial yang berkaitan dengan stres turut termasuk keletihan, ketidakselesaan perut, dan stres yang dikaitkan dengan pendedahan kepada hingar serta gangguan akibat hingar.

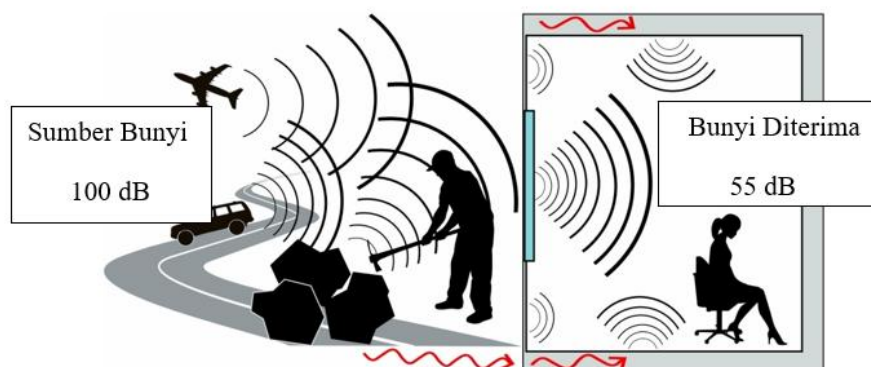
Pemantauan tahap bunyi di kawasan perumahan, khususnya bagi penduduk yang tinggal berhampiran landasan kereta api, amat penting. Pendedahan kepada bunyi bising ini boleh menyebabkan pelbagai kesan negatif terhadap kesihatan seperti gangguan tidur, peningkatan tekanan darah, masalah pada sistem kardiovaskular, dan mengganggu aktiviti harian (Kim 2015; Stansfeld & Matheson 2003; Ising & Kruppa 2004; Croy et al. 2013). Selain itu, antara gejala lain kesan hingar terhadap kesihatan manusia adalah pada pendengaran. Terdapat beberapa kesan yang dinyatakan dalam Jadual 2.2 di bawah dengan pelbagai sumber hingar dan tahap bunyi.

Jadual 2.2 Menghubungkan bunyi biasa dengan kesan terhadap pendengaran
(Pertubuhan Kesihatan Dunia, 2011).

CONTOH BIASA	dBA	KESAN
Pernafasan	0-10	Ambang pendengaran
Perbualan di rumah	50	Senyap
Trafik lebuh raya (15m), pembersih vakum, parti bising	70	Menjengkelkan, mengganggu, mengganggu penggunaan telefon
Kilang biasa, kereta api (pada 15m)	80	Kemungkinan kerosakan pendengaran
Pesawat berlepas (pada 305m), motosikal	100	Kerosakan jika lebih 1 minit
Dentuman guruh, mesin tenun tekstil, gergaji rantai, siren, konsert rock	120	Ambang kesakitan manusia
Pistol mainan, pesawat berlepas (pada 25m), mercun	150	Gegendang telinga pecah

2.8 PENEBATAN BUNYI ATAU PENGURANGAN BUNYI

Menurut Arun Arjunan et al. (2024), penebatan bunyi merujuk kepada pengurangan bunyi yang dihantar merentasi sekatan pepejal atau berudara. Ini berbeza dengan penyerapan bunyi yang diukur dalam desibel (dB) yang dikurangkan tanpa dihantar dari satu sisi sekatan ke sisi yang lain. Dalam kes sekatan, penebatan bunyi sering dicirikan oleh kehilangan penghantaran bunyi (STL) atau indeks pengurangan bunyi (R). Manakala kehilangan sisipan (IL) pula berlaku dalam kes penghadang yang berudara. STL dan R digunakan untuk menunjukkan perbezaan keamatan bunyi antara dua sisi komponen atau sekatan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 di bawah. Sebaliknya, IL didefinisikan sebagai pengurangan tahap bunyi akibat penempatan penyenyap dalam laluan bunyi.



Rajah 2.5 Perbezaan Keamatan Bunyi Antara Dua Sisi Komponen Atau Sekatan
[Arun Arjunan *et al.* (2024)]

Menurut Arun Arjunan et al. (2024) lagi, bahan penebat bunyi yang paling mudah boleh difikirkan ialah sekatan nipis yang diletakkan dalam laluan penghantaran bunyi. Tenaga akustik mendekati permukaan sebagai gelombang tekanan, dan sebahagiannya melalui penghadang sementara selebihnya memantul. Sebahagian bunyi yang melalui mungkin diserap dan diubah menjadi haba. Secara tipikal, keberkesanan bahan penebat bunyi ditentukan oleh nisbah tenaga yang masuk kepada tenaga yang keluar, yang dinyatakan sebagai kehilangan penghantaran bunyi (STL) atau indeks pengurangan bunyi (SRI) dalam desibel (Davies 2002).

Dalam konteks penebatan bunyi, prestasi akustik dalaman pejabat atau rumah biasanya ditetapkan pada 45 dB. Ini bermakna jika tahap bunyi di luar ruang penerima adalah sekitar 100 dB, tahap bunyi di dalam bilik yang bersebelahan atau ruang penerima mestilah ≈ 55 dB. Oleh itu, penebatan bunyi menggambarkan kehilangan tekanan akustik merentasi elemen sekatan. Berbeza dengan penyerapan bunyi, pendekatan penebatan bunyi menumpukan kepada meningkatkan STL dengan mengambil kira kekakuan, bahan, jisim, dan pengasingan elemen sekatan.

2.9 MENGURANGKAN BUNYI HINGAR

Mengurangkan bunyi hingar memerlukan penyelesaian secara teknikal yang menyasarkan pelbagai peringkat. Iaitu mengawal pembentukan bunyi dari sumbernya, melaksanakan penyelesaian berhampiran penerima, atau penyelesaian dalam laluan penyebaran bunyi.

Bunyi hingar lalu lintas jalan raya boleh dikurangkan melalui pelbagai pendekatan yang efektif. Antaranya ialah pengawalan waktu operasi lalu lintas, khususnya bagi kenderaan berat seperti lori dan bas, serta pengurangan had kelajuan yang dapat mengurangkan bunyi enjin dan geseran tayar. Selain itu, menyesuaikan reka bentuk dan susun atur jalan raya, seperti membina jalan pintas untuk mengalihkan lalu lintas dari kawasan berpenduduk, atau menggunakan penghadang bunyi dan menanam pokok sebagai penghadang semula jadi, turut membantu mengurangkan penyebaran hingar. Penggunaan permukaan jalan yang direka khas untuk menyerap bunyi, seperti turapan berliang, juga terbukti berkesan dalam mengurangkan bunyi geseran tayar, terutama di kawasan yang sibuk (Brown & van Kamp 2017). Langkah-langkah ini, jika dilaksanakan secara menyeluruh, dapat memberikan impak positif terhadap kualiti kehidupan dan kesejahteraan penduduk di kawasan terjejas.

Selain itu, perubahan dalam sifat akustik envelope bangunan dapat mengurangkan tahap bunyi di penerima, walaupun ia merupakan alternatif yang kompleks dan mahal (Redondo et al. 2021). Penghadang bunyi luar juga sering digunakan sebagai halangan antara sumber bunyi dan penerima. Penghadang ini akan memantulkan dan menyebarkan sebahagian daripada tenaga bunyi yang dikeluarkan kembali ke sumbernya dan menyerap sebahagian ke dalam struktur penghadang itu. Selebihnya

akan sampai ke penerima, sama ada melalui peralihan di tepi penghadang atau disalurkan melaluinya (Redondo et al. 2021).

Penyelesaian pengurangan bunyi ini banyak digunakan untuk memperbaiki persekitaran akustik di kawasan kediaman yang terletak di sepanjang jalan raya yang sibuk. Ianya terbukti dapat mengurangkan bunyi hingar sebanyak 5–15 dB bergantung pada ketinggian penghadang, kedudukan relatif antara sumber-penerima, dan arah angin (Eggers et al. 2022; Van Renterghem & Botteldooren 2012).

Berbeza dengan pendekatan seperti susun atur jalan atau lapisan permukaan, penghadang bunyi sering dianggap sebagai elemen yang mencemarkan landskap. Kesan visual negatif yang berlaku adalah termasuk kawasan itu terlindung dari cahaya matahari dan kawasan itu menjadi sasaran lukisan grafiti dan pengiklanan haram (Arenas 2008). Sebaliknya, penghadang bunyi yang menarik secara estetika boleh mempengaruhi penilaian auditori dengan positif (Joynt & Kang 2010).

BAB III

KAEDAH KAJIAN

3.1 PENGENALAN

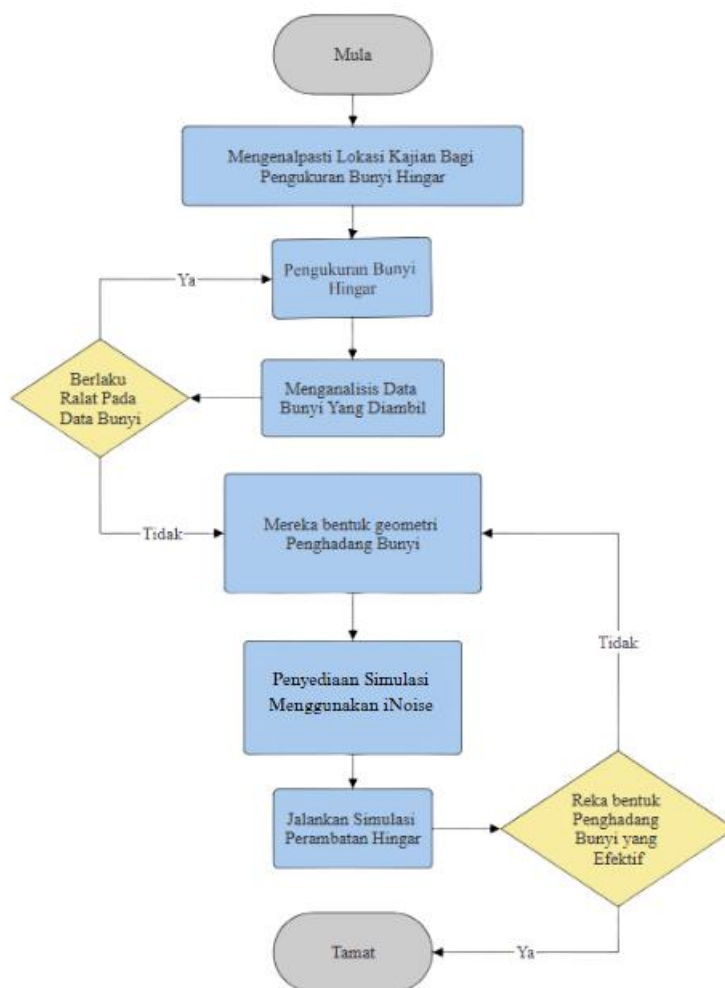
Bab ini menerangkan proses yang terlibat untuk menjalankan kajian ini. Sebelum sebarang tindakan diambil untuk memulakan projek ini, perancangan yang rapi diperlukan untuk memastikan projek ini berjalan dengan lancar dan berjaya. Metodologi projek akan diterangkan dengan lebih lanjut dalam carta aliran kerja. Dalam kajian ini, alat pengukur bunyi akan digunakan bagi mengukur bunyi hingar dari sumber kereta api dan juga jalan raya. Geometri yang sesuai bagi penghadang bunyi juga akan ditentukan agar dapat memaksimumkan penyerapan. Setelah itu, penentusahan reka bentuk penghadang bunyi akan dilakukan menggunakan perisian hingar.

3.2 CARTA ALIRAN PROSES

Rajah 3.1 di bawah mempersembahkan carta aliran kerja yang dijalankan untuk mereka bentuk penghadang bunyi bagi mengurangkan tahap hingar yang dihasilkan oleh sumber seperti jalan raya dan kereta api. Aliran kerja ini merangkumi langkah-langkah yang sistematik dan terancang, bermula daripada mengenal pasti lokasi kajian hingar sehinggalah kepada simulasi dan reka bentuk akhir penghadang bunyi yang efektif.

Setiap langkah dalam carta aliran kerja ini dirancang untuk memastikan proses kajian berjalan dengan teratur dan memberikan hasil yang konsisten. Pengukuran dan analisis data hingar yang diambil bertujuan untuk mengenal pasti ciri-ciri bunyi yang dominan serta faktor yang mempengaruhi penyebarannya. Langkah ini penting untuk memastikan reka bentuk geometri penghadang bunyi memenuhi keperluan fungsinya dalam menyerap dan memantulkan bunyi dengan efektif.

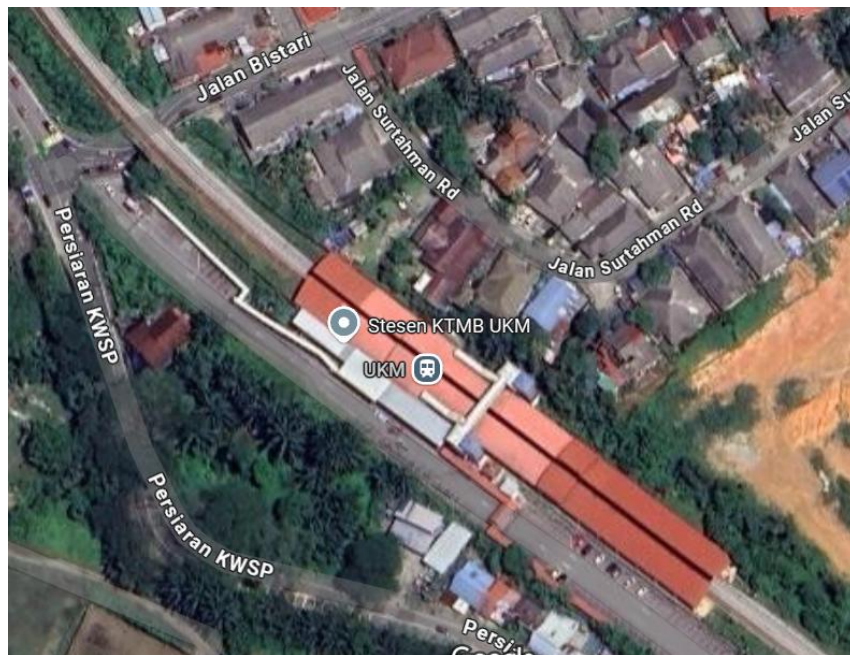
Selain itu, simulasi dengan menggunakan perisian iNoise membolehkan kajian terhadap prestasi reka bentuk penghadang bunyi dijalankan sebelum pembinaan sebenar dilakukan. Ini memberikan peluang untuk mengoptimumkan reka bentuk dari segi geometri, bahan, dan penempatan berdasarkan analisis prestasi.



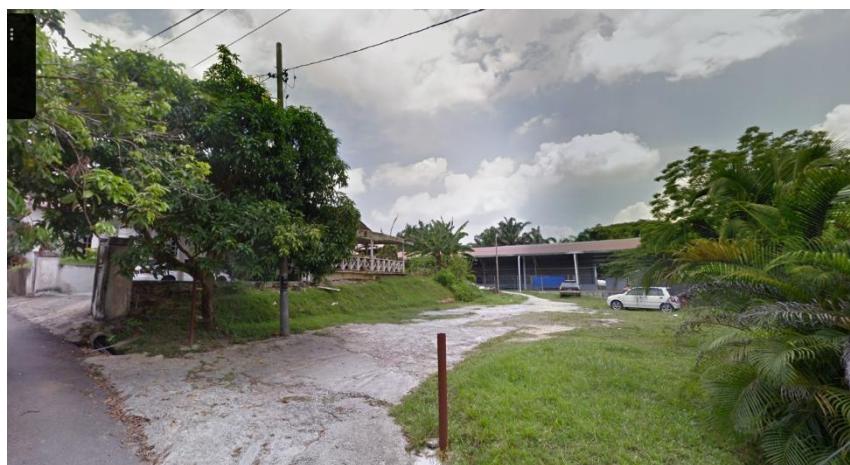
Rajah 3.1 Carta Aliran Kerja

3.2.1 Penentuan Lokasi Kajian

Kajian ini dijalankan pada 2 lokasi yang berbeza mengikut jenis sumber bunyi hingar. Lokasi ini dipilih berdasarkan lokasi nya agak terdedah kepada bunyi hingar. Lokasi yang pertama ialah di kawasan Stesen KTMB UKM. Lokasi ini sangat terdedah kepada sumber hingar kereta api dan ianya juga berdekatan dengan kawasan rumah penduduk Kg. Sungai Tangkas. Lokasi kajian ini terdedah kepada bunyi kereta api yang bergerak dari Batu Caves ke Pulau Sebang dan juga dari Pulau Sebang ke Batu Caves.

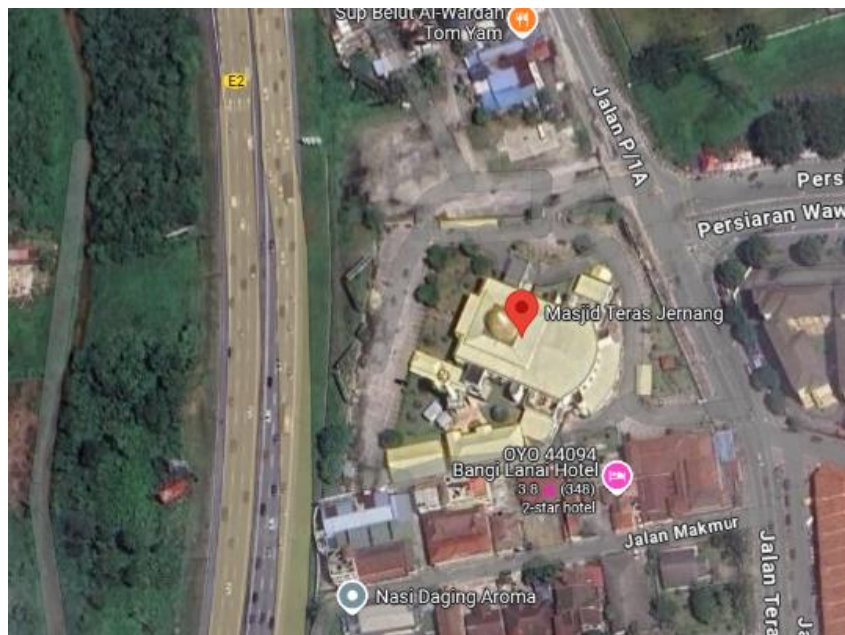


Gambar 3.1 Lokasi Kajian 1 Stesen KTMB UKM

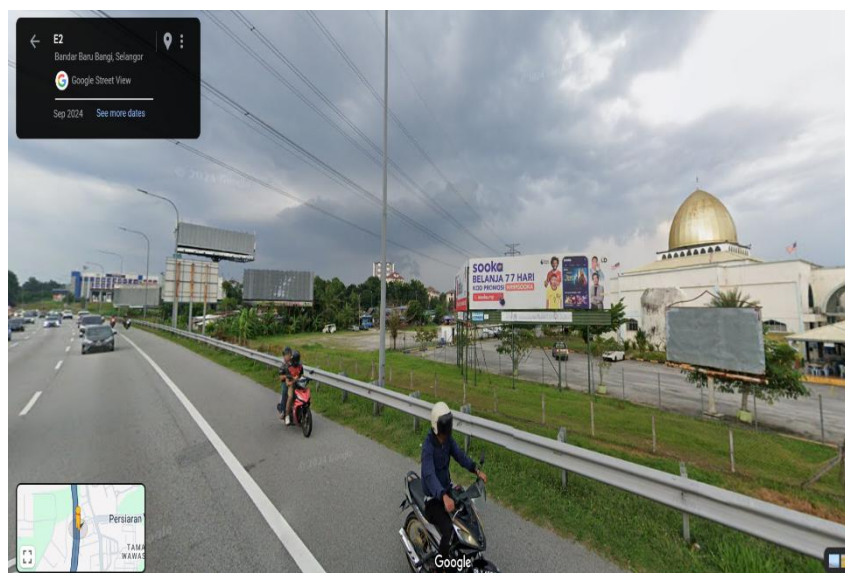


Gambar 3.2 Kawasan Kg. Sungai Tangkas bersebelahan Stesen KTMB UKM

Lokasi kajian kedua yang dipilih pula ialah di Masjid Teras Jernang. Lokasi ini dipilih berikutan kedudukannya yang begitu hampir dengan Lebuhraya Utara-Selatan PLUS. Lokasi ini dikenali pasti terdedah kepada bunyi hingar jalan raya. Ia termasuk daripada bunyi enjin kereta, hon kereta, kenderaan berat dan pelbagai lagi jenis sumber bunyi hingar jalan raya. Selain itu, lokasi ini juga merupakan tempat beribadah umat Islam dan juga berhampiran dengan kawasan perumahan Kg. Teras Jernang.



Gambar 3.3 Lokasi Kajian 2 Masjid Teras Jernang



Gambar 3.4 Lebuhraya bersebelah Masjid Teras Jernang

3.2.2 Pengukuran Bunyi Hingar

Setelah selesai proses pemilihan lokasi kajian, pengukuran bunyi hingar akan dilakukan bagi mengenal pasti tahap bunyi hingar di kawasan tersebut dan menentukan apakah sumber-sumber hingar. Bagi menjalankan proses pengukuran kita akan menggunakan kaki tripod dan Sound Level Meter (SLM) yang telah dikalibrasi untuk memastikan bacaan yang didapatkan adalah tepat dan konsisten. Kedudukan mikrofon pada Sound Level Meter (SLM) akan dipasang sekurang-kurangnya 1.2 m di atas permukaan tanah dan sekurang-kurangnya 3.5 m dari mana-mana permukaan pantulan selain daripada permukaan tanah. Mikrofon akan diorientasikan supaya ia paling sensitif secara seragam terhadap bunyi yang datang dari jalan lebuhraya.

Sound Level Meter 01dB Solo GDS-S DUO yang digunakan dalam kajian ini, mengikut piawaian IEC 61672-1 Class 1, yang menyediakan pemberat dBA untuk pengukuran bunyi dengan ketepatan tinggi. Piawaian IEC 61672 merupakan piawaian terkini dan paling meluas digunakan untuk sound level meter, menggantikan piawaian terdahulu seperti IEC 60651 dan IEC 651. Sound Level Meter 01dB Solo GDS-S DUO mengukur bunyi frekuensi rendah, sederhana, dan tinggi dalam unit desibel (dB), di mana nilai desibel yang lebih tinggi menunjukkan bunyi yang lebih kuat.



Gambar 3.5 Sound level meter 01dB Solo GDS-S DUO

Parameter bunyi yang sering digunakan dalam analisis bunyi persekitaran merangkumi beberapa jenis. L_{Aeq} atau Purata Tahap Bunyi Setara dalam tempoh tertentu, merujuk kepada tahap bunyi purata berwajaran A yang diukur dalam tempoh masa tertentu. Ia digunakan untuk menilai pendedahan bunyi secara keseluruhan dengan mengukur tenaga akustik bunyi sebagai purata sepanjang tempoh tersebut. Selain itu, L_{Amax} , iaitu tahap bunyi maksimum, menunjukkan nilai tertinggi tahap bunyi yang direkodkan dalam sesuatu tempoh masa, yang berguna untuk mengenal pasti bunyi puncak yang berpotensi mengganggu atau membahayakan. Seterusnya, L_{Amin} atau tahap bunyi minimum pula merujuk kepada nilai terendah tahap bunyi yang dicatatkan, memberikan gambaran tentang latar bunyi dalam kawasan kajian. Ketiga-tiga parameter ini penting dalam kajian hingar, terutama dalam reka bentuk penghadang bunyi.

Pengukuran bunyi akan dilakukan dalam tempoh 4 jam, terutama sekali pada selang waktu-waktu berikut: 7.00am-8.00am, 8.00am-9.00am, 5.00pm-6.00pm, and 6.00pm-7.00pm. Tempoh masa ini dipilih untuk mewakili waktu kemuncak di mana kebanyakan aktiviti pergerakan menggunakan kenderaan sedang aktif. Pada waktu pagi, dari jam 7:00 pagi hingga 9:00 pagi, ia dijangka menjadi waktu paling sibuk untuk perjalanan ke tempat kerja menggunakan KTM komuter dan juga pelbagai jenis kenderaan. Kebanyakan pengguna akan bergerak awal ke tempat kerja kerana kebanyakan waktu bekerja bermula sekitar jam 8:00 pagi. Selain itu, dari jam 5:00 petang hingga 7:00 petang, ia merupakan waktu puncak bagi perjalanan pulang dari tempat kerja ke rumah. Dengan menjalankan pengukuran pada selang waktu tertentu ini, kajian ini akan dapat mencerap data pengukuran bunyi pada tahap aktiviti lalu lintas dan komuter yang tertinggi.

3.2.3 Analisis Data

Analisis data bagi tahap hingar ini melibatkan beberapa langkah utama untuk memastikan hasil yang diperoleh dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai situasi hingar di lokasi kajian. Pertama, pengiraan purata tahap hingar menggunakan nilai L_{Aeq} sebagai parameter utama dilakukan untuk menilai tahap bunyi purata dalam tempoh masa tertentu. Nilai L_{Aeq} dikira dengan menggabungkan semua bacaan bunyi

dalam tempoh tersebut dan dibahagikan dengan bilangan data, ia akan memberikan nilai purata berwajaran.

Seterusnya, nilai yang diperoleh boleh dibandingkan dengan piawaian yang ditetapkan oleh Jabatan Alam Sekitar (DOE), contohnya had bunyi untuk kawasan kediaman telah ditetapkan ditetapkan pada 60 dBA pada siang hari dan 55 dBA pada waktu malam bagi bunyi hingar jalan raya dan juga bunyi hingar kereta api. Melalui piawaian yang dikeluarkan Jabatan Alam Sekitar (DOE) juga, untuk sumber hingar kereta api terdapat tambahan di mana terdapat juga nilai L_{Amax} yang mewakili had bunyi untuk kereta api yang melalui kawasan tersebut.

Jadual 3.1 Jadual Had Bunyi yang Ditetapkan Jabatan Alam Sekitar (DOE)

Receiving Land Use Category	L_{Aeq} Day 7.00 am - 10.00 pm	L_{Aeq} Night 10.00 pm - 7.00 am	L_{max} Day & Night
Noise Sensitive Areas, Low Density and Suburban Residential Areas	60 dBA	55 dBA	75 dBA*
Urban Residential Areas	65 dBA	60 dBA	80 dBA*
Commercial, Mixed Development	70 dBA	65 dBA	80 dBA*
Industrial	75 dBA	75 dBA	NA

Receiving Land Use Category	L_{Aeq} Day 7.00 am - 10.00 pm	L_{Aeq} Night 10.00 pm - 7.00 am
Noise Sensitive Areas Low Density Residential Areas	60 dBA	55 dBA
Suburban and Urban Residential (Medium and Density)	65 dBA	60 dBA
Commercial and Mixed Development	70 dBA	65 dBA
Industrial	75 dBA	70 dBA

Oleh itu, data-data yang diperolehi akan dibandingkan dengan jadual piawaian yang telah dikeluarkan oleh Jabatan Alam Sekitar (DOE) seperti di atas. Lokasi yang tidak mematuhi piawaian ini akan dianalisis untuk mengenal pasti faktor penyebab seperti sumber hingar utama, contohnya trafik jalan raya atau aktiviti manusia.

Bagi mempersembahkan hasil analisis, visualisasi data akan dilakukan melalui penggunaan graf atau carta bagi menunjukkan perubahan tahap hingar mengikut masa dan lokasi. Di dalam graf itu, nilai-nilai bagi L_{Aeq} , L_{Amin} , L_{Amax} akan di plot agar dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tahap bunyi hingar di kawasan tersebut pada selang masa yang telah ditetapkan. Selain itu, peta bunyi juga akan digunakan untuk memetakan taburan hingar di kawasan kajian. Peta ini membantu mengenal pasti kawasan yang terdedah kepada tahap bunyi tinggi serta kawasan yang lebih tenang.

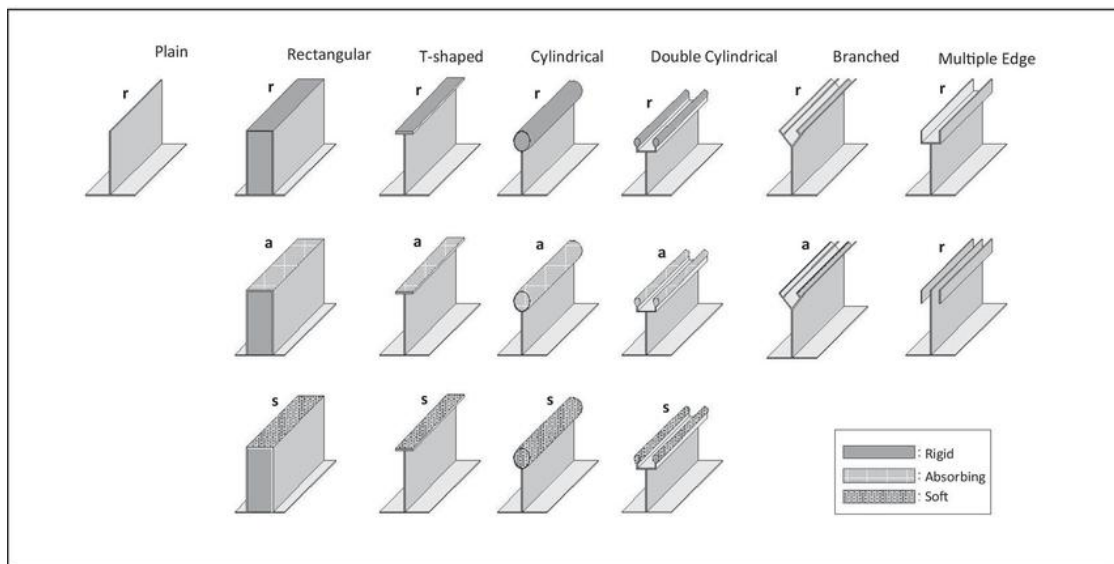
3.2.4 Mereka Bentuk Geometri Penghadang Bunyi

Metodologi kajian ini melibatkan pengujian dan perbandingan empat jenis bahan yang sering digunakan dalam aplikasi kawalan bunyi, iaitu softwood (pine) sebagai bahan semula jadi, dinding konkrit sebagai bahan binaan padat, gabungan aluminium dengan mineral wool sebagai bahan komposit, dan acrylic glass sebagai bahan sintetik lutsinar. Setiap bahan tersebut mempunyai sifat-sifat akustik yang berbeza pada julat frekuensi berbeza-beza iaitu 16 Hz, 31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz dan 8000 Hz. Nilai penyerapan bunyi mewakili keupayaan bahan menyerap gelombang bunyi, manakala indeks pengurangan bunyi menunjukkan keupayaan bahan dalam menghalang transmisi bunyi.

Seterusnya, kita perlu menetapkan parameter rekabentuk awal. Parameter ini melibatkan penentuan ciri-ciri geometri seperti ketinggian, panjang, dan ketebalan penghadang bunyi. Ketinggian penghadang ditentukan berdasarkan ciri-ciri sumber bunyi dan lokasi penerima yang ingin dilindungi, manakala panjang penghadang perlu mencukupi untuk meliputi sepenuhnya kawasan sumber bunyi, termasuk lanjutan di hujungnya untuk memastikan keberkesanan penghadang bunyi itu. Ketebalan pula ditentukan berdasarkan sifat bahan yang digunakan serta keperluan pembinaan. Selain itu, bahan penghadang juga perlu dikenal pasti, sama ada bersifat penyerap, pemantul, atau hibrid, bergantung kepada keperluan projek.

Setelah parameter awal ditentukan, proses rekabentuk iteratif dijalankan. Proses ini melibatkan eksperimen dengan pelbagai geometri penghadang. Contohnya, penghadang lurus lebih mudah direka tetapi mungkin kurang berkesan di sudut tertentu,

manakala penghadang melengkung lebih efektif untuk memantulkan bunyi. Rekabentuk seperti bentuk-T di bahagian atas atau sambungan condong boleh digunakan untuk mengurangkan difraksi bunyi di bahagian tepi. Selain itu, penghadang berlapis dengan lapisan dalaman penyerap dan lapisan luar pemantul juga boleh meningkatkan keberkesanan penyerapan bunyi. Keberkesanan setiap rekabentuk ini perlu diuji melalui simulasi menggunakan perisian seperti SoundPLAN, di mana keputusan seperti pengurangan hingar di lokasi penerima dan peta kontur hingar dapat dianalisis. Berdasarkan hasil analisis ini, rekabentuk akan diperbaiki secara iteratif sehingga sasaran pengurangan hingar tercapai.



Rajah 3.2 Jenis-jenis Reka Bentuk Penghadang Bunyi

Dalam masa yang sama, pemilihan bahan turut dijalankan. Ujian dijalankan untuk memilih bahan yang mempunyai pekali penyerapan bunyi yang tinggi, seperti gentian kaca, mineral wool, atau buih akustik. Bahan cangkih seperti panel berlubang juga boleh digunakan untuk meningkatkan penyerapan bunyi. Selain itu, gabungan bahan pemantul dan penyerap dapat digunakan untuk menghasilkan prestasi yang seimbang. Pemilihan bahan juga perlu mengambil kira faktor kos dan ketahanan, di mana bahan yang digunakan mestilah tahan terhadap pendedahan cuaca seperti sinar UV, hujan, dan angin.

Akhirnya, parameter rekabentuk dan bahan yang telah dipilih akan digunakan untuk membina model simulasi. Proses simulasi ini akan membantu dalam menilai keberkesanan rekabentuk berdasarkan piawaian hingar yang ditetapkan. Rekabentuk akan terus diperhalusi sehingga mencapai tahap keberkesanan yang optimum, dan hasil akhir akan didokumentasikan untuk tujuan penilaian dan pelaksanaan projek.

3.2.5 Simulasi Menggunakan iNoise

Kajian ini menjalankan simulasi akustik menggunakan perisian iNoise bagi tujuan merekabentuk dan menganalisis keberkesanan penghadang bunyi di dua kawasan yang terdedah kepada pencemaran bunyi yang signifikan, iaitu laluan kereta api berhampiran KTM UKM dan laluan jalan raya utama berdekatan Masjid Teras Jernang. iNoise dipilih sebagai alat simulasi utama kerana keupayaannya memodelkan penyebaran bunyi persekitaran dengan mengambil kira faktor topografi, cuaca, jenis permukaan tanah, serta pengaruh halangan seperti penghadang bunyi dan bangunan, berdasarkan piawaian ISO 9613-2: Attenuation of sound during propagation outdoors. Piawaian ini memastikan bahawa semua parameter penyebaran bunyi disimulasikan mengikut pendekatan saintifik yang diterima secara meluas dalam kajian impak bunyi persekitaran.

Dalam simulasi ini, unit ukuran yang digunakan ialah meter (m) bagi semua dimensi seperti ketinggian sumber, penerima, dan penghadang; manakala unit tahap kebisingan ialah desibel A-tertimbang [dB(A)], yang mencerminkan kepekaan telinga manusia terhadap bunyi dalam julat frekuensi berbeza. Sumber bunyi dimodelkan sebagai “line source” yang mewakili aliran trafik berterusan iaitu satu untuk aliran kereta api di sepanjang trek KTM UKM dan satu lagi untuk lalu lintas kenderaan di jalan raya bersebelahan Masjid Teras Jernang. Ini adalah penting kerana kedua-dua jenis pengangkutan ini menyumbang tahap kebisingan yang tinggi dan mempunyai spektrum bunyi yang berbeza. Ketinggian sumber dan penerima bunyi masing-masing ditetapkan pada 1.5 meter, berdasarkan purata ketinggian enjin kenderaan atau bahagian bawah gerabak kereta api, serta paras pendengaran manusia dalam keadaan berdiri.

Tahap kebisingan dimasukkan sebagai nilai purata LAeq, iaitu tahap tekanan bunyi yang dikira secara purata dalam tempoh masa tertentu dan digunakan secara meluas dalam penilaian kesan bunyi jangka panjang. Nilai LAeq ini ditentukan mengikut band oktav frekuensi, dari 63 Hz hingga 8000 Hz, bagi menggambarkan spektrum bunyi penuh yang terhasil daripada sumber jalan raya dan kereta api. Dengan menganalisis berdasarkan spektrum ini, keberkesanan penghadang dalam menyerap atau menyekat frekuensi tertentu dapat dikenal pasti, terutamanya frekuensi rendah yang cenderung lebih sukar untuk dihalang.

Simulasi dilakukan dalam dua fasa utama. Fasa pertama bertujuan menilai kesan penggunaan bahan penghadang yang berbeza. Empat jenis bahan yang sering digunakan dalam industri pembinaan penghadang bunyi dipilih, iaitu: softwood (pine) sebagai bahan semula jadi yang ringan dan menyerap bunyi pada frekuensi tertentu; konkrit, yang kukuh dan mempunyai indeks pengurangan bunyi tinggi terutama untuk frekuensi rendah; gabungan aluminium dengan lapisan mineral wool, yang direka khusus untuk penyerapan bunyi yang baik di frekuensi menengah hingga tinggi; serta kaca akrilik, bahan lutsinar yang sesuai untuk estetika visual tetapi dengan keupayaan akustik yang terhad. Bagi setiap bahan, dua parameter utama diambil kira: pekali penyerapan bunyi (α) yang menunjukkan keupayaan bahan menyerap bunyi, dan indeks pengurangan bunyi yang menunjukkan keupayaan bahan menyekat pemindahan bunyi dari satu sisi ke sisi lain. Data ini dimasukkan ke dalam iNoise bagi membolehkan simulasi dilakukan secara realistik dan terkawal.

Setelah bahan yang paling berkesan dikenal pasti berdasarkan keputusan penurunan tahap bunyi pada penerima, kajian diteruskan ke fasa kedua, iaitu penilaian terhadap variasi ketinggian penghadang bunyi. Dalam fasa ini, ketinggian penghadang diubah secara sistematik kepada empat nilai iaitu 2.0 meter, 3.5 meter, 5.0 meter dan 6.5 meter. Bagi setiap ketinggian, simulasi dilakukan dengan mengekalkan parameter bahan yang sama seperti dalam fasa pertama. Tujuan utama adalah untuk mengenalpasti ketinggian optimum yang memberikan pengurangan bunyi paling signifikan di kawasan sensitif seperti perkarangan masjid, tanpa menyebabkan kos pembinaan yang terlalu tinggi atau gangguan visual yang berlebihan.

Sepanjang simulasi, titik penerima diletakkan secara strategik di lokasi-lokasi kritikal seperti kawasan solat, laluan pejalan kaki, dan ruang terbuka masjid yang terdedah kepada bunyi. iNoise kemudiannya menjana peta kontur bunyi (noise contour maps) yang menggambarkan penyebaran tahap kebisingan sebelum dan selepas pemasangan penghadang, serta laporan terperinci tentang perubahan nilai LAeq di setiap titik penerima. Hasil daripada kedua-dua fasa simulasi ini kemudiannya digunakan untuk menilai keberkesanan setiap reka bentuk penghadang bunyi secara kuantitatif dan visual, serta menjadi asas kepada cadangan teknikal dalam laporan akhir projek.

BAB IV

HASIL KAJIAN

4.1 PENGENALAN

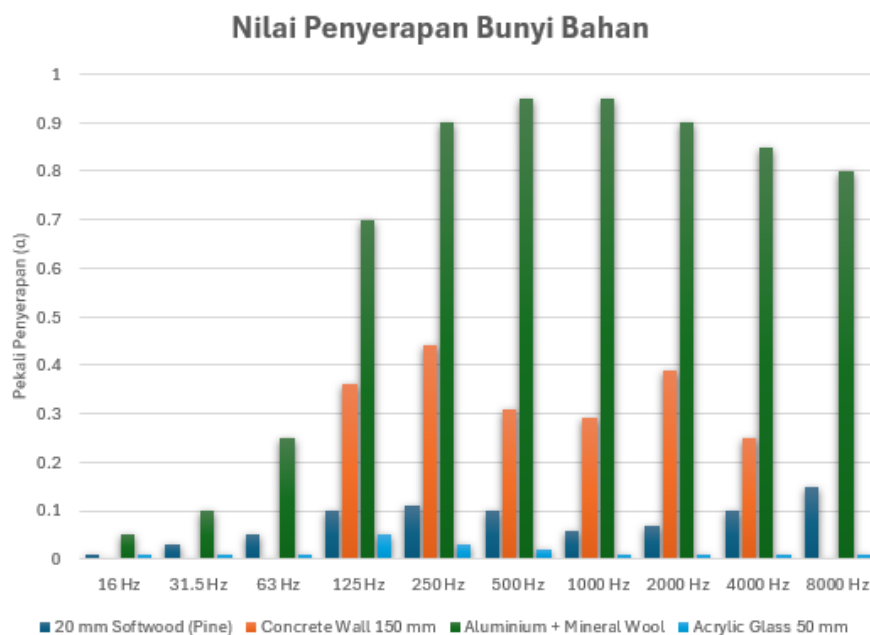
Bab ini membentangkan hasil simulasi perambatan hingar yang telah dijalankan menggunakan perisian iNoise berdasarkan piawaian ISO 9613-2. Fokus utama kajian ini adalah untuk menilai keberkesanan rekabentuk penghadang bunyi di dua lokasi terpilih iaitu kawasan berhampiran KTM UKM yang mewakili sumber hingar kereta api, dan Masjid Teras Jernang yang mewakili sumber hingar jalan raya. Hasil simulasi merangkumi analisis terhadap tahap kebisingan purata (LAeq) dalam spektrum frekuensi oktav serta perubahan tahap bunyi selepas pelaksanaan pelbagai rekabentuk penghadang. Kajian ini turut menilai kesan parameter seperti jenis bahan penghadang (mengikut pekali penyerapan dan indeks pengurangan bunyi) dan ketinggian penghadang terhadap prestasi pengurangan bunyi. Semua keputusan ditunjukkan dalam bentuk jadual dan graf untuk membolehkan perbandingan secara visual dan kuantitatif terhadap pelbagai senario simulasi. Perbincangan hasil turut meneliti sejauh mana rekabentuk yang diusulkan berpotensi mengurangkan kesan hingar terhadap kawasan sensitif seperti masjid dan kawasan kediaman berdekatan.

4.2 BAHAN PENGHADANG BUNYI

Dalam kajian ini, empat jenis bahan yang lazim digunakan sebagai penghadang bunyi telah dipilih untuk dianalisis berdasarkan ciri-ciri akustiknya, sebelum digunakan dalam simulasi menggunakan perisian iNoise. Bahan tersebut ialah kayu lembut (softwood – pine) yang mewakili bahan semula jadi, dinding konkrit, gabungan aluminium dan mineral wool, serta kaca akrilik. Pemilihan ini dibuat bagi mewakili pelbagai kategori

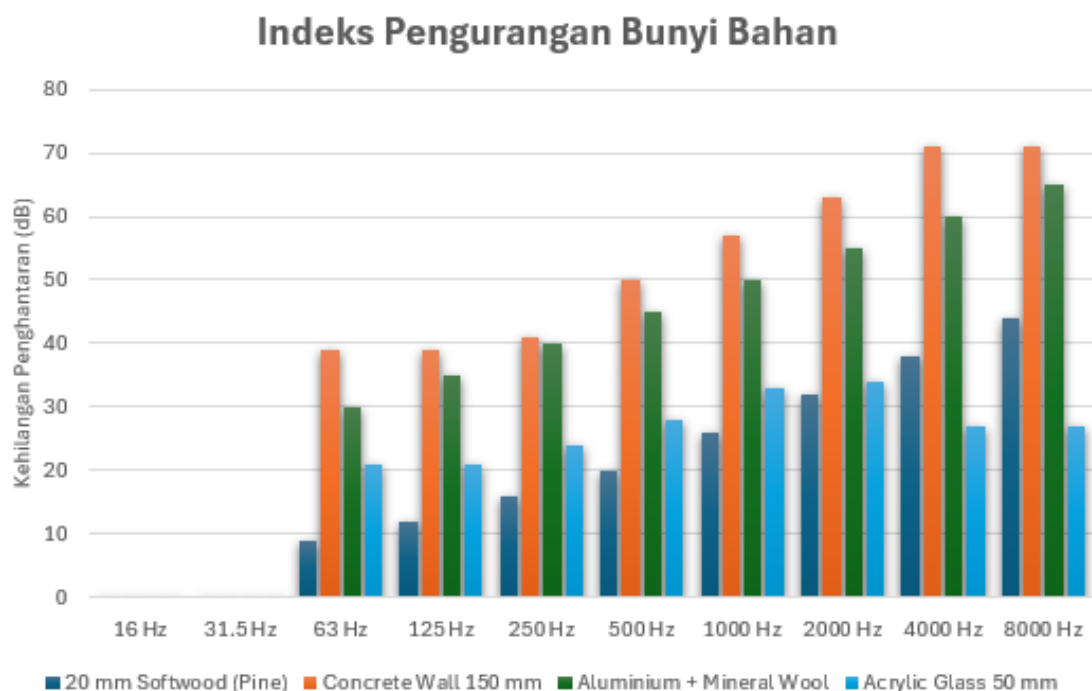
bahan dari segi ketumpatan, struktur dalaman, dan keupayaan menyerap serta menghalang perambatan bunyi. Setiap bahan dikaji dari segi dua parameter utama iaitu pekali penyerapan bunyi (α) bagi setiap band frekuensi oktav, dan indeks pengurangan bunyi yang menggambarkan keberkesanan bahan dalam menghalang transmisi bunyi.

Dari sudut pekali penyerapan bunyi (α), bahan Aluminium yang digabungkan dengan Mineral Wool menunjukkan kecekapan penyerapan bunyi paling tinggi merentas kebanyakan julat frekuensi, terutama pada frekuensi pertengahan hingga tinggi (500 Hz hingga 4000 Hz), dengan nilai α melebihi 0.9. Ini menjadikannya sangat efektif dalam menyerap tenaga bunyi yang datang daripada sumber lalu lintas atau kereta api. Sebaliknya, Dinding konkrit 150 mm mencatatkan prestasi serapan yang sangat rendah sekitar 0.001 pada frekuensi rendah, namun sedikit meningkat kepada 0.36–0.44 di frekuensi 125 Hz hingga 250 Hz sebelum turun semula. Bahan ini cenderung memantulkan bunyi lebih banyak daripada menyerapnya. Softwood (pine) pula mempunyai nilai penyerapan sederhana rendah, dengan prestasi yang agak seragam dalam julat rendah hingga tinggi sekitar 0.05–0.15, menjadikannya hanya sedikit berkesan dari aspek pengurangan pantulan. Kaca akrilik menunjukkan nilai pekali penyerapan yang sangat rendah dalam semua julat sekitar 0.01, menandakan ia hampir tidak menyerap bunyi langsung dan lebih banyak bertindak sebagai pemantul bunyi.



Rajah 3.3 Graf Bar Nilai Penyerapan Bunyi Bahan

Dari aspek pengurangan transmisi bunyi atau R' (dB), dinding konkrit jelas menunjukkan kemampuan paling tinggi sebagai penghalang bunyi, dengan nilai R' yang konsisten tinggi terutamanya pada frekuensi menengah dan tinggi yang melebihi 50 dB di atas 500 Hz dan mencapai sehingga 71 dB pada 4000 - 8000 Hz. Ini menunjukkan keberkesanan konkrit dalam menyekat perambatan hingar. Bahan Aluminium + Mineral Wool turut mencatatkan prestasi baik dengan R' melebihi 50 dB bermula dari 1000 Hz ke atas, dan berada pada julat 30 - 40 dB untuk frekuensi rendah, menjadikannya pilihan yang sangat sesuai untuk penghadang akustik. Kaca akrilik 50 mm pula mencatatkan nilai R' sederhana, antara 21 dB hingga 34 dB, dengan kecekapan tertinggi pada 2000 Hz, tetapi merosot semula pada 4000 - 8000 Hz. Softwood (pine) berada pada tahap paling rendah dari segi R' , dengan nilai sekitar 9 dB pada 63 Hz dan hanya mencapai 44 dB pada frekuensi 8000 Hz. Oleh itu, konkrit dan struktur berkomposit seperti aluminium + mineral wool adalah lebih berkesan untuk mengurangkan transmisi bunyi secara keseluruhan berbanding bahan ringan dan semula jadi seperti kayu dan kaca akrilik.



Rajah 3.4 Graf Bar Indeks Pengurangan Bunyi Bahan

Daripada analisis ini, dapat dirumuskan bahawa setiap bahan mempunyai kekuatan dan kelemahan tersendiri dari segi prestasi akustik. Oleh itu, pemilihan bahan penghadang

perlu disesuaikan dengan jenis sumber bunyi, julat frekuensi dominan, dan keperluan persekitaran. Analisis ini menjadi asas kepada fasa simulasi seterusnya dalam iNoise, di mana prestasi sebenar bahan dalam keadaan persekitaran sebenar akan dinilai secara kuantitatif.

4.3 HASIL PENGUKURAN BUNYI HINGAR

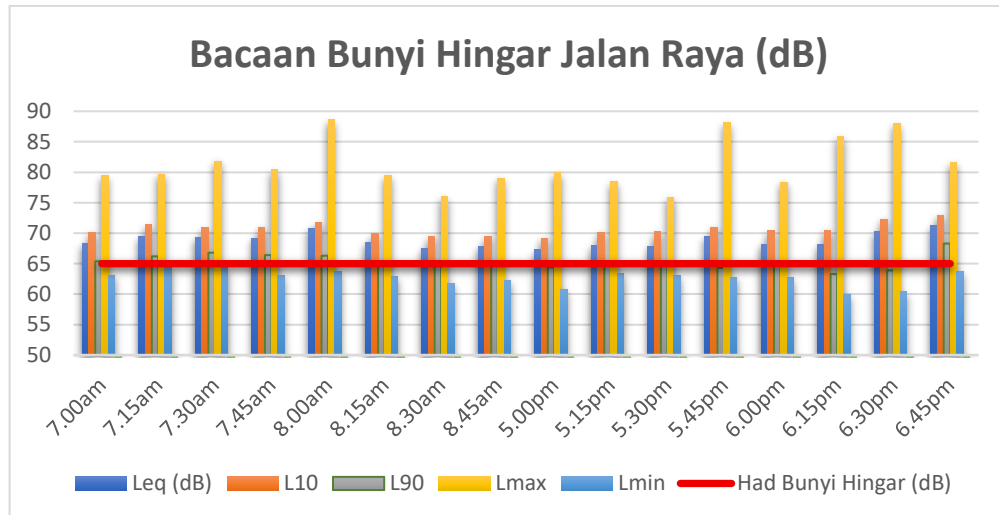
4.3.1 Jalan Raya

Pengukuran tahap bunyi hingar jalan raya telah dilaksanakan di lokasi kajian dengan membahagikan masa pengukuran kepada dua tempoh puncak iaitu waktu pagi (7:00 – 9:00 pagi) dan waktu petang (5:00 – 7:00 petang). Setiap tempoh dibahagikan kepada sela masa 15 minit, menjadikan jumlah keseluruhan sebanyak 16 titik masa pengukuran. Data yang direkodkan merangkumi parameter akustik penting iaitu Leq (tahap bunyi setara), Lmax (maksimum), Lmin (minimum), L10 dan L90, di samping nilai tahap bunyi mengikut jalur frekuensi octave band dari 16 Hz hingga 8000 Hz. Semua data ini dikumpulkan dan disusun dalam bentuk jadual, seterusnya dianalisis secara visual melalui pembinaan graf untuk setiap kategori metrik bunyi.

Selain daripada parameter umum, data turut menunjukkan taburan hingar mengikut jalur frekuensi octave band dari 16 Hz hingga 8000 Hz. Hasil pemerhatian mendapati bahawa frekuensi dominan tertumpu pada julat 500 Hz hingga 2000 Hz, yang dikaitkan dengan bunyi enjin, geseran tayar dan hon kenderaan. Bunyi pada frekuensi tinggi (4000 – 8000 Hz) didapati semakin menurun, manakala frekuensi rendah (16 – 125 Hz) menunjukkan kehadiran getaran daripada kenderaan berat, namun tidak dominan.

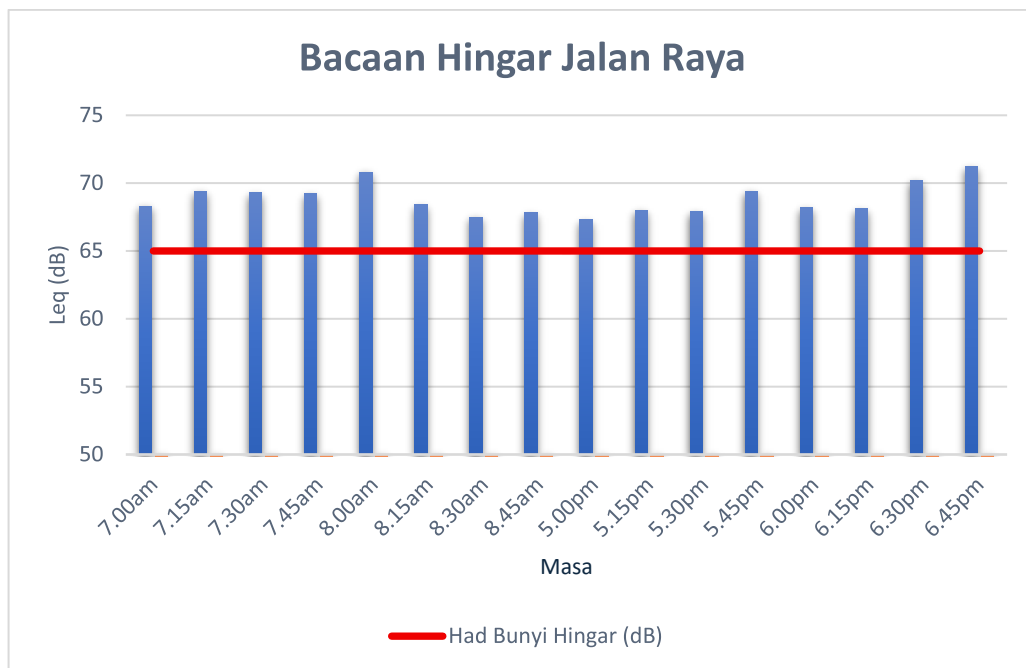
Jadual 3.2 Jadual Bacaan Bunyi Hingar Jalan Raya

HINGAR JALAN RAYA																
NO DATA	MASA	Leq (dB)	L10	L90	Lmax	Lmin	16 Hz	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
209	7.00am	68.3	70.1	65.4	79.4	63.1	58.7	62	71.2	69.7	60.2	60.6	59.8	50.5	49	47.8
210	7.15am	69.4	71.4	66.2	79.7	64.4	60.5	63.4	71.9	72	61	61.5	61.1	52.2	49.3	48
211	7.30am	69.3	70.9	66.8	81.8	64.3	59.9	62.5	71.9	71.3	61.2	61.3	60.9	51.7	48.8	47.8
212	7.45am	69.2	71	66.4	80.4	63.1	60.1	62.1	72.8	72	61.9	62.1	60.6	51.8	47.7	47.5
213	8.00am	70.8	71.7	66.3	88.6	63.8	60.9	62.1	72.7	72.9	62.5	65.4	61.1	53	50.6	48.1
214	8.15am	68.4	69.9	65.3	79.4	62.9	61.4	62.5	72.1	71	60.2	61.5	59.1	52	47.6	46.7
215	8.30am	67.5	69.5	64.6	76	61.7	61.9	62.9	72.2	70.1	60.7	60.3	58.8	49.4	45.1	44.9
216	8.45am	67.8	69.5	65.2	79	62.3	62.7	62.6	70.9	69.9	60.7	60.6	59.4	50.1	45.2	44.9
217	5.00pm	67.3	69.2	64.4	79.9	60.7	65.1	65.6	72.7	70.1	59.5	60.1	58.8	50.8	45.6	41.7
218	5.15pm	68	70.1	64.8	78.5	63.4	65.8	65.6	72.5	70.6	60.6	60.9	59.1	51.4	46.3	42.8
219	5.30pm	67.9	70.2	64.9	75.9	63	64	67	73.1	71.5	60.6	60.2	59.1	51.3	47	43.6
220	5.45pm	69.4	71	64.3	88.1	62.8	64.6	65.5	73.2	72.5	61.1	61.1	62.3	51.4	47.7	44.7
221	6.00pm	68.2	70.4	64.8	78.4	62.7	66.9	66.6	72.6	71.3	61.1	61.7	58.4	51.6	47.3	44.2
222	6.15pm	68.1	70.5	63.3	85.8	59.9	61.7	64	74.6	72.4	61	61.1	57.3	51.7	48.3	45
223	6.30pm	70.2	72.3	63.9	88	60.4	61.1	64.1	73.3	72.7	63	62.6	59.2	50.7	46.6	44
224	6.45pm	71.2	72.9	68.3	81.6	63.7	60.6	63.1	72.2	69.4	64.6	64.4	58.2	50.7	46.8	43.1



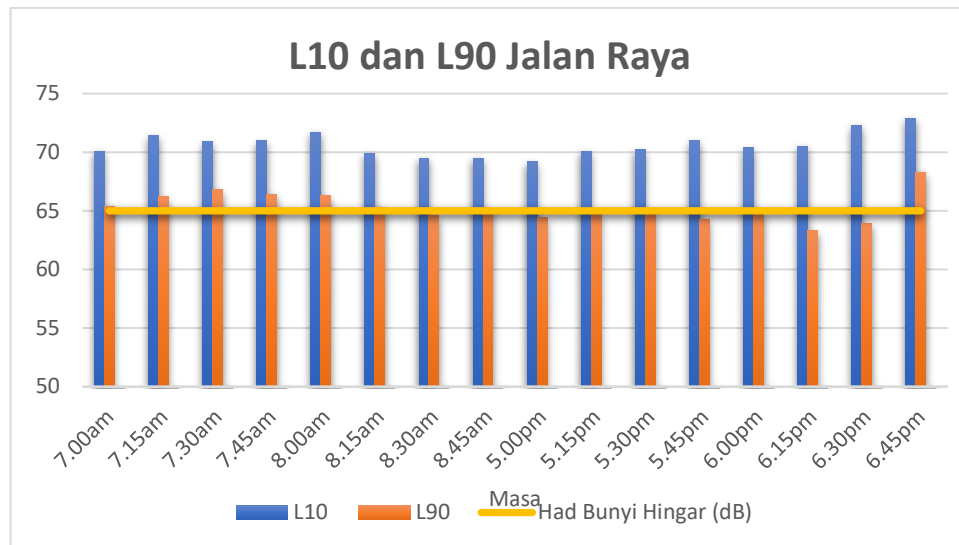
Rajah 3.5 Graf Bar Bacaan Bunyi Hingar Jalan Raya

Graf Leq memberikan gambaran menyeluruh tentang tahap purata tenaga bunyi yang dialami dalam tempoh tertentu, iaitu setiap 15 minit antara jam 7:00–9:00 pagi dan 5:00–7:00 petang. Berdasarkan hasil pengukuran, bacaan Leq secara konsisten melebihi paras 65 dB(A), iaitu had maksimum yang ditetapkan oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia untuk kawasan sensitif seperti perumahan dan institusi pendidikan. Pada graf ini, satu garis merah ditandakan sebagai sempadan 65 dB(A), dan jelas menunjukkan hampir semua nilai Leq berada di atas had tersebut, terutamanya sekitar jam 8:00 pagi dan 6:00 petang iaitu waktu yang lazim dikaitkan dengan kesesakan trafik harian. Ini menandakan bahawa pendedahan kepada bunyi bising bukan bersifat sementara, tetapi berterusan sepanjang hari. Bacaan Leq juga memperlihatkan variasi kecil antara waktu pagi dan petang, menandakan sumber bunyi utama adalah trafik jalan raya yang tidak putus dan bukan hanya disebabkan oleh lonjakan tiba-tiba. Oleh itu, graf Leq membuktikan secara empirikal keperluan mendesak untuk langkah mitigasi seperti pembinaan penghadang bunyi bagi mengurangkan tahap kebisingan dan melindungi kualiti hidup penduduk setempat.



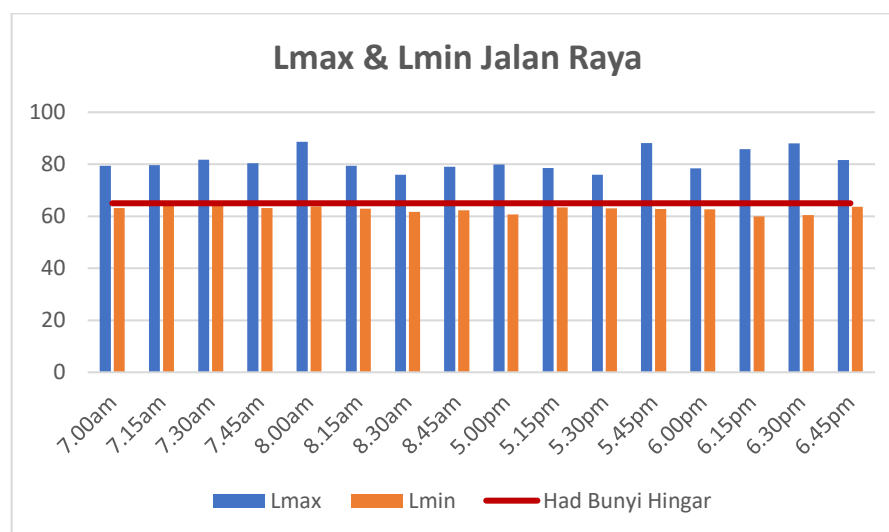
Rajah 3.6 Graf Bar Bacaan Hingar Leq Jalan Raya

Sementara itu, graf L10 dan L90 digunakan untuk menilai kestabilan dan kebolehubahan bunyi di lokasi kajian. Nilai L10, yang mewakili tahap hingar yang hanya dilepasi 10% masa, berada dalam julat 69.2 – 72.9 dB(A), manakala L90 mencatat bacaan antara 63.3 – 68.3 dB(A). Kehadiran jurang besar antara L10 dan L90 menunjukkan bahawa bunyi bersifat tidak sekata dan berubah-ubah, dengan gangguan hingar impulsif yang kerap berlaku. Dalam graf yang dibina, kedua-dua L10 dan L90 sering kali melepasi paras 65 dB(A), dengan L90 hanya sesekali mendekati garis had. Ini menggambarkan bahawa bukan sahaja bunyi jangka pendek yang kuat berlaku secara kerap, malah bunyi latar (background noise) juga tinggi dan konsisten. Implikasi ini adalah penting kerana ia menunjukkan bahawa kawasan ini mengalami pencemaran bunyi yang menyeluruh, bukan sekadar berpunca daripada gangguan bersifat sementara.



Rajah 3.7 Graf Bar Bacaan L10 & L90 Jalan Raya

Bagi graf Lmin dan Lmax, perbezaan yang ketara dapat dilihat di antara nilai minimum dan maksimum hingar untuk setiap masa pengukuran. Nilai Lmax menunjukkan lonjakan ketara, terutamanya sekitar jam 8:00 pagi (88.6 dB) dan 5:45 petang (88.1 dB), jauh melebihi paras had bunyi 65 dB(A). Nilai Lmin pula secara konsisten melebihi 59 dB(A), membuktikan bahawa walaupun dalam keadaan paling senyap, bunyi di kawasan tersebut masih melepasi ambang yang ditetapkan. Graf Lmin dan Lmax yang dibina dengan garis merah rujukan 65 dB(A) ini memperlihatkan bahawa kesemua nilai Lmax dan hampir kesemua Lmin melepasi paras yang dibenarkan, menunjukkan tahap kebisingan yang tinggi serta potensi gangguan kepada keselesaan dan kesihatan awam.



Rajah 3.8 Graf Bar Bacaan Lmax & Lmin Jalan Raya

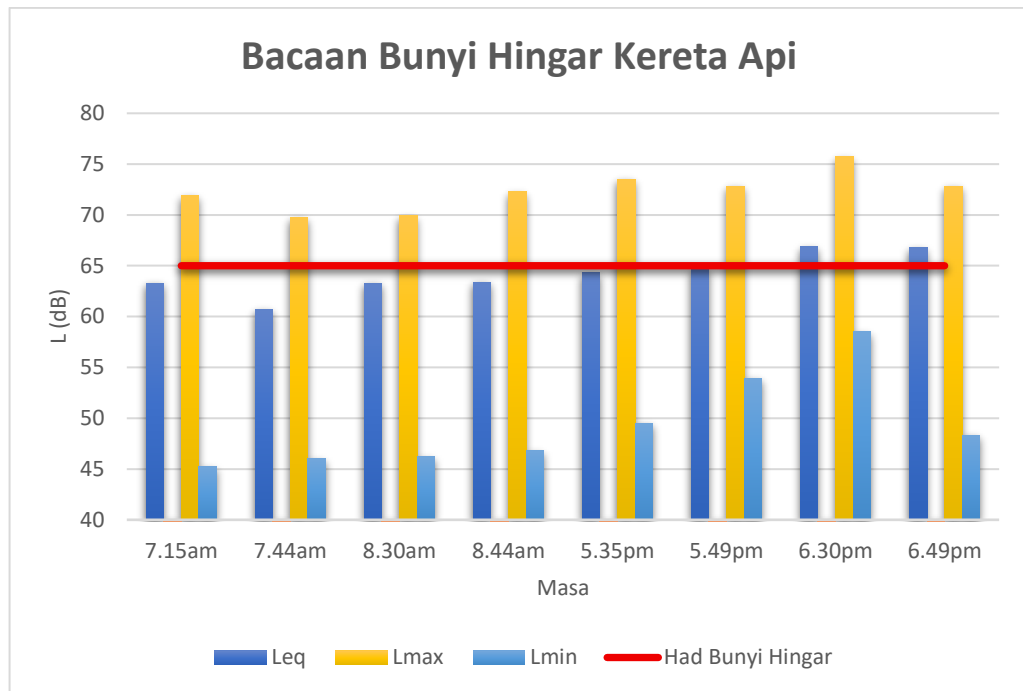
4.3.2 Kereta Api

Pengukuran bunyi hingar keretapi ini dilaksanakan secara langsung semasa keretapi melintasi kawasan pengukuran, bukan berdasarkan tempoh purata selama 15 minit. Ini bermakna setiap bacaan mewakili tahap bunyi sebenar yang dihasilkan oleh keretapi semasa pergerakan aktifnya, dan lebih tepat menggambarkan kesan sebenar terhadap persekitaran. Berdasarkan bacaan yang diperolehi, nilai L_{eq} (tahap bunyi purata berterusan semasa lintasan) direkodkan antara 60.7 dB(A) hingga 66.9 dB(A), menunjukkan hampir semua lintasan menghasilkan hingar yang menghampiri atau melepasi had 65 dB(A) yang ditetapkan oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia. Nilai L_{max} pula mencapai setinggi 75.7 dB(A), menandakan kemuncak bunyi apabila keretapi berada paling hampir dengan titik pengukuran. Sebaliknya, L_{min} kekal antara 45.2 hingga 58.5 dB(A), iaitu tahap bunyi terendah sepanjang pergerakan keretapi, yang masih menunjukkan kebisingan ketara walaupun pada ketika intensiti terendah.

Jadual 3.3 Jadual Bacaan Bunyi Hingar Kereta Api

HINGAR KERETAPI														
NODATA	MASA	L_{eq}	L_{max}	L_{min}	16 Hz	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
227	7.15am	63.3	71.9	45.2	51	55.9	58.5	60.8	54.8	55.9	53.7	48.5	44.7	37.9
231	7.44am	60.7	69.7	46	51.1	59.3	60.8	60.1	54.6	52.9	50.9	45.6	41.8	32.8
232	8.30am	63.3	69.9	46.2	51.1	58.4	61.1	64.3	57.1	55.6	53.8	48.3	43.5	39.1
233	8.44am	63.4	72.3	46.8	54.2	60.4	59.4	61.1	55.2	54.2	51.9	48.8	47.7	51.5
234	5.35pm	64.3	73.5	49.5	64.1	67.9	68.8	65.6	60.5	56	53.1	49.2	47.3	46.4
235	5.49pm	64.8	72.8	53.9	71	68.9	66.1	62.3	57.8	56.7	53.2	50.1	48.6	43.6
237	6.30pm	66.9	75.7	58.5	62.4	61.5	60.3	61.2	60.5	58.7	55.1	52.1	51.6	54.2
239	6.49pm	66.8	72.8	48.3	53.2	59.1	63.1	63	59.4	59.2	56.2	53	51.4	48

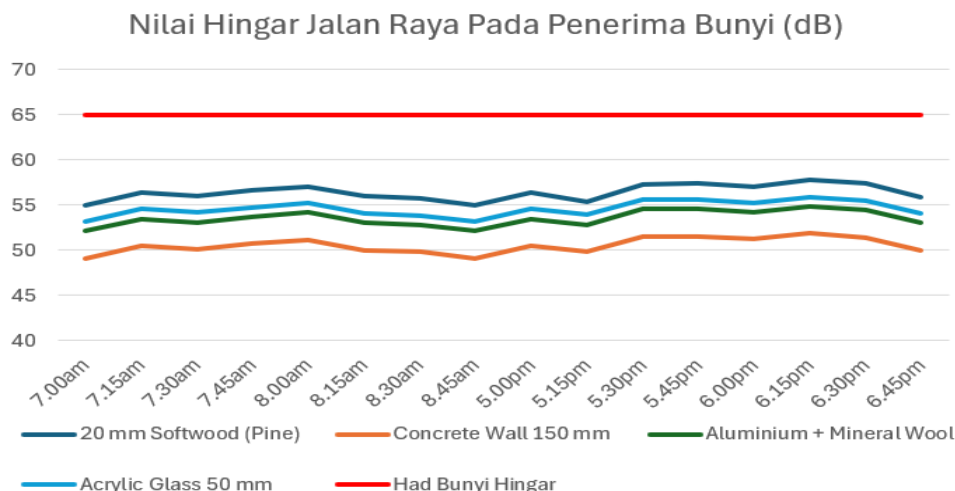
Spektrum frekuensi menunjukkan bahawa bunyi keretapi meliputi julat frekuensi yang sangat luas, dari 16 Hz hingga 8000 Hz, dengan keamatan paling tinggi dikesan dalam julat frekuensi rendah hingga pertengahan (63 Hz hingga 500 Hz). Frekuensi 16 Hz mencatat nilai setinggi 71 dB pada waktu petang, menandakan kehadiran getaran frekuensi rendah yang biasanya dikaitkan dengan impak mekanikal dan struktur. Nilai pada frekuensi lebih tinggi (1000 Hz ke atas) cenderung lebih rendah, namun tetap memberi kesan terhadap ketajaman dan kejelasan bunyi semasa lintasan. Secara keseluruhan, hasil pengukuran ini jelas menunjukkan bahawa walaupun tempoh lintasan singkat, impak akustiknya cukup besar dan signifikan, sekali gus menekankan keperluan kepada penyelesaian mitigasi seperti pemasangan penghadang bunyi atau reka bentuk trek yang lebih senyap untuk mengurangkan pendedahan penduduk sekitar terhadap hingar keretapi.



Rajah 3.9 Graf Bar Bacaan Bunyi Hingar Kereta Api

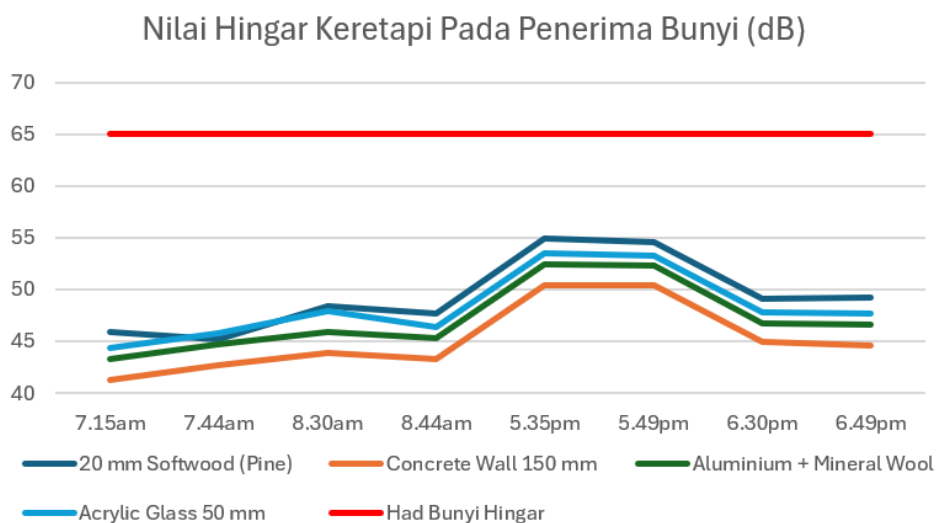
4.4 ANALISIS PEMILIHAN BAHAN

Hasil simulasi iNoise terhadap pelbagai bahan penghadang bunyi menunjukkan keberkesanan yang berbeza-beza dalam mengurangkan tahap kebisingan pada penerima bagi kedua-dua sumber jalan raya dan kereta api. Berdasarkan graf Nilai Hingar Jalan Raya Pada Penerima Bunyi, didapati bahawa semua bahan membantu mengurangkan nilai LAeq berbanding tahap asal, namun prestasi paling ketara ditunjukkan oleh bahan Dinding Konkrit 150 mm, diikuti oleh Aluminium + Mineral Wool, Acrylic Glass 50 mm, dan akhirnya Softwood (Pine). Sepanjang tempoh pengambilan data dari jam 7.00 pagi hingga 6.45 petang, nilai hingar dengan penggunaan Dinding Konkrit 150 mm kekal di bawah 60 dB dan secara konsisten berada lebih rendah berbanding bahan lain. Walaupun semua bahan membantu mengurangkan hingar daripada melebihi had bunyi hingar 65 dB (garis merah), perbezaan antara bahan tetap ketara dalam aspek kecekapan.



Rajah 3.10 Graf Nilai Hingar Jalan Raya Pada Penerima

Begitu juga bagi Nilai Hingar Kereta Api Pada Penerima Bunyi, trend yang sama dapat dilihat, di mana Dinding Konkrit 150 mm sekali lagi menunjukkan tahap hingar paling rendah antara jam 7.15 pagi hingga 6.49 petang, terutamanya semasa waktu puncak (sekitar 5.35–5.49 petang) apabila tren beroperasi lebih kerap. Walaupun semua bahan membantu memastikan tahap LAeq kekal di bawah ambang 65 dB, perbezaan antara bahan menunjukkan bahawa bukan semua bahan memberikan pengurangan yang sama. Bahan seperti softwood dan acrylic glass, meskipun lebih ringan atau estetik, kurang berkesan dalam menurunkan bunyi secara signifikan dan cenderung menghasilkan nilai yang lebih hampir kepada had hingar maksimum.



Rajah 3.11 Graf Nilai Hingar Kereta Api Pada Penerima

Hasil simulasi penggunaan bahan penghadang bunyi dalam perisian iNoise menunjukkan bahawa dinding konkrit 150 mm menghasilkan nilai tahap hingar (LAeq) yang paling rendah pada penerima, baik bagi sumber bunyi jalan raya mahupun kereta api. Namun begitu, pemilihan bahan penghadang untuk aplikasi sebenar tidak hanya bergantung kepada nilai pengurangan hingar semata-mata. Setelah mempertimbangkan faktor akustik, kos, ketahanan, penyelenggaraan dan estetika, maka bahan gabungan aluminium dan mineral wool telah dikenal pasti sebagai pilihan terbaik untuk digunakan dalam reka bentuk akhir penghadang bunyi projek ini.

Dari sudut prestasi akustik, meskipun konkrit menunjukkan tahap LAeq yang rendah hasil daripada ketumpatan dan jisim yang tinggi, ia mempunyai pekali penyerapan bunyi yang sangat rendah sekitar 0.001 – 0.4 sahaja. Ini bermakna sebahagian besar bunyi akan dipantulkan semula ke persekitaran, berpotensi menyebabkan gema dan gangguan sekunder terutama di kawasan berpenduduk atau berhampiran premis sensitif seperti masjid. Sebaliknya, bahan aluminium yang digabungkan dengan mineral wool bukan sahaja mempunyai indeks pengurangan bunyi (R') yang baik (melebihi 50 dB dalam julat frekuensi menengah dan tinggi), malah menunjukkan pekali penyerapan bunyi (α) yang sangat tinggi iaitu mencapai 0.95 pada frekuensi 500 - 2000 Hz. Ini menjadikan bahan ini berkeupayaan menyerap bunyi dengan berkesan dalam frekuensi rendah hingga tinggi, mengurangkan kesan pantulan dan seterusnya meningkatkan kualiti akustik persekitaran secara keseluruhan.

Dari aspek kos dan kecekapan pembinaan, konkrit secara asasnya mungkin dilihat lebih murah dari segi bahan mentah. Namun, kos sebenar pembinaan penghadang konkrit adalah tinggi kerana memerlukan kerja formwork (acuan), penulangan (reinforcement), serta proses curing yang mengambil masa dan tenaga kerja tambahan. Pembinaan juga memerlukan jentera berat dan ruang kerja yang besar, terutama di lokasi seperti laluan kereta api atau jalan raya aktif, yang boleh menyulitkan pelaksanaan. Sebaliknya, bahan aluminium + mineral wool walaupun mempunyai kos bahan yang lebih tinggi, membolehkan proses pemasangan yang lebih cepat dan mudah. Ia boleh dipasang secara modular, tanpa memerlukan jentera berat, dan sesuai untuk kerja-kerja tepi jalan

atau rel yang memerlukan gangguan minimum. Dari sudut pengurusan projek, ini bermakna penjimatan kos jangka panjang dan masa pelaksanaan yang lebih efisien.

Dalam konteks ketahanan dan penyelenggaraan, dinding konkrit terdedah kepada masalah keretakan akibat perubahan suhu, hujan berasid, dan getaran dari lalu lintas berat atau tren. Ini memerlukan pemeriksaan berkala dan penyelenggaraan lebih kerap, terutamanya di kawasan beriklim tropika lembap seperti Malaysia. Aluminium pula mempunyai kelebihan sebagai bahan tahan kakisan yang tidak mudah rosak atau reput, serta memerlukan penyelenggaraan yang sangat rendah. Ini menjadikannya lebih ideal untuk struktur jangka panjang yang diletakkan di kawasan terbuka, dan mampu menjimatkan kos penyelenggaraan sepanjang hayat projek.

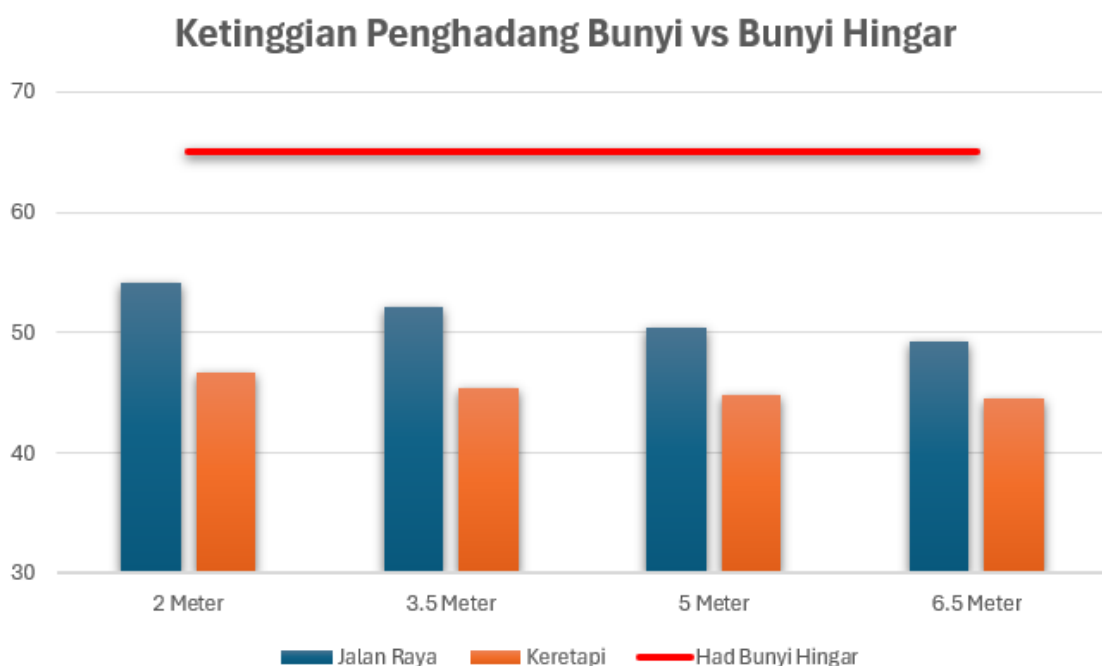
Akhir sekali, dari segi estetika dan keupayaan reka bentuk, aluminium menawarkan lebih banyak fleksibiliti. Ia boleh dibentuk dalam pelbagai profil dan diberikan kemasan berwarna atau bertekstur untuk disesuaikan dengan landskap persekitaran, termasuk reka bentuk moden atau elemen seni bina Islamik di kawasan berhampiran masjid. Kaca akrilik, walaupun cantik, kurang efektif dari segi akustik, manakala konkrit pula lebih sukar untuk direka bentuk menarik tanpa kos tambahan seperti ukiran cetak atau lapisan cat tahan cuaca. Maka, pemilihan bahan penghadang bukan hanya perlu praktikal, tetapi juga memberi nilai tambah visual kepada kawasan sekeliling.

Secara keseluruhannya, walaupun konkrit memberi keputusan paling rendah dari segi LAeq dalam simulasi, analisis menyeluruh merangkumi prestasi akustik menyeluruh, kecekapan pemasangan, kos jangka panjang, ketahanan serta elemen reka bentuk menunjukkan bahawa bahan aluminium + mineral wool lebih unggul untuk digunakan dalam reka bentuk penghadang bunyi di lokasi kajian ini. Keputusan ini bukan sahaja memenuhi keperluan teknikal pengurangan hingar, malah menyokong matlamat pembangunan mampan dan reka bentuk yang menyatu dengan persekitaran tempatan.

4.5 ANALISIS KETINGGIAN PENGHADANG BUNYI

Berdasarkan simulasi akustik yang dijalankan, empat ketinggian penghadang bunyi telah diuji iaitu 2.0 meter, 3.5 meter, 5.0 meter dan 6.5 meter bagi dua jenis sumber hingar iaitu jalan raya dan kereta api. Hasil analisis menunjukkan tren yang konsisten,

iaitu semakin tinggi penghadang bunyi yang digunakan, semakin rendah nilai tahap hingar (LAeq) yang diterima di kawasan penerima. Ini menunjukkan bahawa ketinggian memainkan peranan penting dalam keberkesanan pengurangan hingar. Pengurangan ini berlaku kerana penghadang yang lebih tinggi mampu menyekat laluan terus gelombang bunyi daripada sampai kepada penerima. Apabila laluan terus ini disekat, gelombang bunyi akan membelok di atas penghadang dan berlaku fenomena pembelauan, yang menyebabkan sebahagian tenaga bunyi hilang semasa melalui laluan ini. Hasilnya, tahap bunyi yang sampai kepada penerima menjadi lebih rendah.



Rajah 3.12 Graf Bar Kesan Ketinggian Penghadang Bunyi

Namun begitu, apabila ketinggian penghadang meningkat kepada 6.5 meter, dapatan menunjukkan bahawa penurunan tahap hingar tidak lagi signifikan jika dibandingkan dengan penghadang setinggi 5.0 meter. Keadaan ini menggambarkan fenomena "diminishing acoustic returns", di mana peningkatan keberkesanan pengurangan hingar menjadi semakin kecil walaupun ketinggian ditambah. Dalam konteks kejuruteraan dan kos pembinaan, perbezaan yang kecil ini tidak lagi berbaloi jika dibandingkan dengan peningkatan kos struktur, keperluan bahan, dan kesan terhadap visual landskap sekeliling. Tambahan pula, penghadang setinggi 6.5 meter boleh mengganggu

pandangan pengguna jalan raya dan penduduk sekitar serta menimbulkan ketidaksesuaian dari aspek reka bentuk persekitaran.

Selain daripada faktor akustik, beberapa aspek lain turut dipertimbangkan dalam pemilihan ketinggian optimum penghadang bunyi, antaranya ialah kos pembinaan, kemudahan pemasangan, penyelenggaraan jangka panjang, kesan terhadap estetika kawasan serta kelulusan pihak berkuasa tempatan. Penghadang setinggi 5.0 meter memberikan keseimbangan antara keberkesanan akustik dan kos yang berpatutan. Ia juga masih berada dalam julat ketinggian yang sesuai untuk pembinaan menggunakan bahan terpilih seperti struktur aluminium berlapis bahan penyerap, tanpa memerlukan sokongan struktur tambahan yang rumit seperti pada ketinggian lebih ekstrem. Penggunaan 5.0 meter juga sesuai untuk tapak kajian yang mungkin terhad dari segi ruang dan ketinggian dibenarkan oleh garis panduan pembangunan bandar atau pihak berkuasa tempatan.

Oleh itu, sebagai kesimpulan, ketinggian 5.0 meter dipilih sebagai reka bentuk akhir bagi penghadang bunyi dalam kajian ini. Ia bukan sahaja mampu memberikan pengurangan hingar yang signifikan dan efektif, malah menepati pertimbangan ekonomi dan teknikal. Dalam konteks pembangunan mampan dan perlindungan alam sekitar, pemilihan ketinggian ini juga dilihat sebagai penyelesaian yang praktikal dan sesuai bagi kegunaan jangka panjang, sama ada untuk kawasan berhampiran jalan raya berkapasiti tinggi mahupun laluan kereta api aktif. Oleh kerana reka bentuk penghadang bunyi perlu mengambil kira pelbagai aspek seperti akustik, struktur, kos dan persekitaran, maka 5.0 meter menjadi pilihan optimum dan realistik bagi projek pengurangan pencemaran bunyi yang berkesan.

4.6 RUMUSAN

Berdasarkan semua analisis yang telah dijalankan dalam bab ini, dapat dirumuskan bahawa reka bentuk penghadang bunyi memainkan peranan yang signifikan dalam mengurangkan tahap hingar yang diterima oleh kawasan sensitif, terutamanya bagi sumber hingar jalan raya dan keretapi. Pemilihan bahan penghadang yang sesuai, berdasarkan nilai pekali penyerapan bunyi dan indeks pengurangan bunyi memberi kesan langsung terhadap kecekapan akustik penghadang tersebut. Hasil simulasi

menunjukkan bahawa bahan seperti aluminium yang dipadankan dengan penebat dalaman seperti mineral wool memberi prestasi yang lebih seimbang dalam menyerap dan memantulkan bunyi berfrekuensi rendah hingga tinggi, berbanding bahan lain seperti konkrit atau kayu lembut. Selain itu, variasi ketinggian penghadang turut mempengaruhi pengurangan tahap bunyi, di mana peningkatan ketinggian secara umum menunjukkan penurunan nilai LAeq yang ketara pada penerima. Justeru, gabungan faktor geometri dan material yang tepat mampu meningkatkan keberkesanan penghadang bunyi secara keseluruhan, sekaligus menyumbang kepada persekitaran yang lebih senyap dan selesa kepada penduduk sekitar.

BAB X

RUMUSAN DAN CADANGAN

5.1 PENGENALAN

Kajian ini telah dijalankan bagi mencapai matlamat utama iaitu mereka bentuk sebuah penghadang bunyi yang efektif dan praktikal dalam mengawal pencemaran bunyi daripada dua sumber pengangkutan utama, iaitu jalan raya dan kereta api. Kajian ini mengambil pendekatan yang sistematik merangkumi tiga fasa utama yang sejajar dengan objektif yang telah ditetapkan: pencirian hingar, reka bentuk penghadang, dan penentusahan melalui simulasi. Dalam usaha memahami dan mengatasi cabaran pencemaran bunyi di persekitaran yang semakin membangun, kajian ini menggabungkan kerja lapangan, pengumpulan data akustik, teori kejuruteraan bunyi, serta pemodelan simulasi sebagai satu rangka kerja saintifik. Secara keseluruhannya, semua objektif kajian telah berjaya dicapai dengan hasil yang menunjukkan potensi pelaksanaan reka bentuk penghadang bunyi yang cekap di kawasan sensitif seperti perumahan dan kawasan institusi yang berhampiran dengan laluan trafik dan rel kereta api.

5.1.1 Pencapaian Objektif 1

Objektif pertama kajian ini memberi tumpuan kepada pencirian hingar daripada sumber jalan raya dan kereta api, iaitu dengan mengenal pasti tahap kebisingan serta tingkah laku spektrum frekuensi bunyi yang dihasilkan oleh kedua-dua sumber ini. Data telah diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan menggunakan alat pengukur tahap bunyi dan dianalisis dalam bentuk LAeq serta nilai puncak seperti Lmax dan Lmin. Kajian menunjukkan bahawa tahap hingar tertinggi lazimnya berlaku ketika kenderaan

berat atau kereta api melintasi kawasan kajian, manakala spektrum frekuensi yang dominan berada dalam lingkungan 125 Hz hingga 2000 Hz. Beberapa faktor utama yang dikenalpasti mempengaruhi tahap hingar ini termasuk kelajuan kenderaan, kepadatan lalu lintas, jenis permukaan jalan, struktur rel, dan juga jarak antara sumber dengan penerima bunyi. Pencirian ini amat penting kerana ia menjadi asas bagi mereka bentuk penghadang bunyi yang berkesan, iaitu dengan mengambil kira frekuensi-frekuensi dominan yang perlu diserap atau disekat oleh bahan dan reka bentuk penghadang yang dipilih.

5.1.2 Pencapaian Objektif 2

Objektif kedua adalah untuk mereka bentuk geometri penghadang bunyi yang mampu memaksimumkan prestasi pengurangan hingar. Reka bentuk dilakukan dengan mempertimbangkan prinsip akustik seperti fenomena pantulan, pembiasan, dan penyebaran bunyi, serta bagaimana bentuk dan bahan penghadang mempengaruhi gelombang bunyi dalam pelbagai arah. Kajian ini membandingkan pelbagai bahan termasuk konkrit (sebagai bahan reflektif), aluminium yang dilapisi bahan penyerap bunyi (kombinasi reflektif dan penyerap), akrilik, serta bahan semula jadi seperti kayu lembut. Ujian reka bentuk dijalankan dengan variasi ketinggian penghadang iaitu pada 2.0 m, 3.5 m, 5.0 m, dan 6.5 m, bagi mengenal pasti kesan ketinggian terhadap tahap pengurangan bunyi di lokasi penerima. Analisis menunjukkan bahawa reka bentuk yang menggabungkan geometri optimum dan bahan penyerap yang sesuai dapat mengurangkan tahap hingar secara signifikan, terutamanya pada frekuensi pertengahan dan tinggi. Hasil ini memberikan asas praktikal dalam penghasilan penghadang yang bukan sahaja berfungsi secara akustik tetapi juga mengambil kira aspek ekonomi dan kemudahan pemasangan.

5.1.3 Pencapaian Objektif 3

Objektif terakhir dalam kajian ini melibatkan penentusahan reka bentuk penghadang bunyi yang telah dicadangkan menggunakan perisian simulasi akustik iaitu iNoise. Melalui simulasi ini, reka bentuk geometri serta sifat bahan penghadang dimodelkan berdasarkan data sebenar dari pengukuran lapangan. Hasil simulasi membolehkan penilaian ke atas keberkesanan penghadang dari segi pengurangan tahap LAeq di lokasi

penerima dalam konteks laluan trafik sebenar dan keadaan kereta api yang sedang melintasi. Simulasi menunjukkan bahawa peningkatan ketinggian penghadang memberikan penurunan tahap hingar yang ketara, manakala pemilihan bahan yang mempunyai nilai pekali serapan dan indeks pengurangan bunyi yang tinggi menghasilkan kesan pengurangan bunyi yang lebih menyeluruh, khususnya dalam lingkungan frekuensi 250 Hz hingga 2000 Hz yang dominan. Keputusan simulasi juga selaras dengan jangkaan teori dan pengukuran awal, sekaligus mengesahkan keberkesanan pendekatan reka bentuk yang digunakan. Penentusahan ini membuktikan bahawa penggunaan perisian simulasi bukan sahaja mempercepat proses reka bentuk tetapi juga meningkatkan ketepatan keputusan dalam perancangan pengurangan bunyi yang mesra pengguna dan berimpak tinggi.

5.2 CADANGAN PENAMBAHBAIKAN

Berdasarkan keseluruhan dapatan kajian yang telah dijalankan, reka bentuk penghadang bunyi sememangnya memainkan peranan penting dalam mengawal pencemaran bunyi daripada sumber jalan raya dan kereta api. Walaupun objektif kajian telah berjaya dicapai melalui gabungan analisis lapangan, reka bentuk akustik serta simulasi menggunakan perisian, terdapat ruang penambahbaikan yang boleh dipertimbangkan bagi memperkukuh hasil kajian serta aplikasinya dalam situasi sebenar. Cadangan ini bertujuan untuk mempertingkatkan keberkesanan penghadang dari sudut prestasi akustik, kebolehgunaan jangka panjang serta kesejahteraan masyarakat sekitar.

Pertama, kajian ini boleh dipertingkatkan dengan menambah variasi bahan yang digunakan dalam simulasi dan reka bentuk. Selain bahan seperti konkrit, aluminium dan kaca akrilik yang telah diuji, bahan inovatif seperti panel komposit berliang, bahan kitar semula (contohnya getah tayar terpakai), dan bahan mesra alam seperti gentian sabut kelapa boleh diteroka. Bahan-bahan ini bukan sahaja berpotensi menyerap bunyi dengan lebih baik dalam julat frekuensi tertentu, tetapi juga menyokong aspek kelestarian alam sekitar. Selain itu, struktur penghadang boleh direka bentuk secara tidak konvensional seperti bentuk melengkung, condong atau berlapis untuk memaksimumkan pengurangan bunyi dan mengurangkan pantulan terus ke kawasan sensitif.

Kedua, keberkesanan penghadang bunyi dalam keadaan sebenar perlu dinilai melalui ujian lapangan secara berterusan dan dalam pelbagai keadaan persekitaran. Kajian ini telah menggunakan simulasi melalui perisian iNoise, namun ia masih berdasarkan andaian dan input yang terhad. Oleh itu, adalah dicadangkan agar kajian susulan melibatkan pengukuran bunyi jangka panjang di lokasi sebenar dilakukan sebelum dan selepas pemasangan penghadang bagi mengesahkan keberkesanan reka bentuk. Penglibatan data cuaca, tahap trafik harian dan variasi masa juga akan memberikan gambaran lebih menyeluruh terhadap keberkesanan penghadang dalam situasi harian sebenar.

Ketiga, kajian masa hadapan boleh memberi tumpuan kepada impak pengurangan hingar terhadap kumpulan penduduk sensitif di sekitar kawasan kajian. Ini termasuk pelajar institusi pendidikan, warga emas, pesakit dan masyarakat yang tinggal berhampiran laluan trafik atau landasan kereta api. Dengan menjalankan soal selidik atau temu bual, maklumat berkenaan gangguan tidur, tumpuan belajar atau tekanan perasaan boleh dikumpul dan dianalisis. Penilaian keberkesanan berdasarkan kesejahteraan sosial ini akan memberikan nilai tambah kepada reka bentuk penghadang bunyi, menjadikannya bukan sahaja berkesan dari aspek teknikal, tetapi juga menyumbang kepada kualiti hidup masyarakat secara menyeluruh.

RUJUKAN

- Abas, A., Awang, A., & Md Saad, J. 2017. Impak bilangan kenderaan terhadap pencemaran bunyi di Banda Hilir, Melaka. *Malaysian Journal of Society and Space* 13(4): 47–55. <https://doi.org/10.17576/geo-2017-1304-05>
- Arenas, J. 2008. Potential problems with environmental sound barriers when used in mitigating surface transportation noise. *Sci. Total Environ* 405: (1–3) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.049>.
- Arun Arjunan, Baroutaji, A., Robinson, J., Vance, A., & Arafat, A. 2024. Acoustic metamaterials for sound absorption and insulation in buildings. *Building and Environment* :111250–111250. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111250>
- Arun Arjunan, Baroutaji A., Ayyappan Susila Praveen, Abdul Ghani Olabi, & Wang C. 2019. Acoustic Performance of Metallic Foams. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11561-9>
- Arbaan A., Ghing T. Y., Othman M. H., & Yeung D. B. K. 2022. Evaluation of Noise Generated by Train Movement at Rail Near to Residential Areas, Case Study at Kluang, Johor. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*: 13(4). <https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.04.003>
- Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N., Ising, H. 2005. Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology* 16: 33–40. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000147104.84424.24>.
- Berglund B., Lindral T., and Schwela D.H. 1995. “Guidelines for Community Noise,” Published by World Health Organization.
- Bridgewater G., Coleman N., Charpentier P., Graham I., Lowenger M., Lowrey T., Michau D., Prévost M., Thompson A., Bosch J. W., and Wiles B. 2011. “Railway Noise Measurement and Reporting Methodology,” Published by Canadian Transportation Agency, ISBN 978-1-100-19249-9.
- Brown, A.L., van Kamp, I. 2017. WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review of transport. Noise interventions and their impacts on health. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 14: 873. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080873>
- Burgé, P., Sytsma, J., & Zurburg, T. 2010. Meteorological influence on highway noise barrier performance: A case study. *The Journal of the Acoustical Society of America* 127(3_Supplement): 1797–1797. <https://doi.org/10.1121/1.3384036>
- Chang, L. 2024. Simulation Analysis of Influence Laws of Sound Barrier Acoustic Performance When Using Ceramic as Sound-absorbing Materials. *Journal of Physics Conference Serie* 2843(1): 012007–012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2843/1/012007>

- Clausen, U., Doll, C., Franklin, F. J., Franklin, G. V., Heinrichmeyer, H., Kochsiek, J., Rothengather, W., & Sieber, N. 2012. Reducing railway noise pollution. In Policy Department B: Structural and Cohesion Policies (Issue 1).
- Croy, I., Smith, M. G., & Waye, K. P. 2013. Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: An experimental study. *BMJ Open*, 3(5): pp. 1–10.
- Davies E. 2002. Noise and vibration. *Elsevier EBooks*: 27–16. <https://doi.org/10.1016/b978-075064452-5/50082-1>
- D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sambuco, S., & Rufini, A. 2018. Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials. *Construction and Building Materials* 158: 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.028>
- Di, G., Xu, Y. 2017. Influences of combined traffic noise on anxiety in mice. *Sci. Total Environ* 579: 1439–1445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.144>
- Dimov, D., Penev, T., & Marinov, I. 2023. Importance of Noise Hygiene in Dairy Cattle Farming—A Review. *Acoustics* 5(4): 1036–1045. <https://doi.org/10.3390/acoustics5040059>
- Drury, J. C. 2004. Ultrasonics: Part 2. Properties of sound waves. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 46(12): 762–764. <https://doi.org/10.1784/insi.46.12.762.54502>
- Eggers, S., Popp, C., Legarth, S.V., Pedersen, T.H., Volk, C.P., Bendtsen, H., Gjestland, T. 2022. Call 2018 noise and nuisance: FAMOS final report.
- Elmenhorst E.M., Penning S., Rolny V., Quehl J., Mueller, U., Maab H., and Basner M. 2012. “Examining Nocturnal Railway Noise and Aircraft Noise In The Field: Sleep, Psychomotor Performance and Annoyance,” *Journal by Science Of The Total Environment Vol. 424*: pp. 48-56.
- Eren, B., Likos, S., & Çelebi, A. 2024. Effectiveness of noise barriers in sensitive urban areas: a comprehensive study on noise reduction strategies and public health implications. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35229-y>
- European Communities. 2003. “Position Paper on the European Strategies and Priorities for Railway Noise Abatement,” *Published by European Commission*, ISBN 92-894-6055.5
- Fang, Y., Zhang, X., & Zhou, J. (2018). Experiments on reflection and transmission of acoustic porous metasurface with composite structure. *Composite Structures* 185: 508–514. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.054>
- Fink D. 2019. A new definition of noise: noise is unwanted and/or harmful sound. Noise is the new “secondhand smoke”. *178th Meeting of the Acoustical Society of America* 39(1). <https://doi.org/10.1121/2.0001186>

- Gasparoni, S., Ralbovsky, M., Haider, M., Wehr, R., & Conter, M. 2012. BEM and FEM simulations of the vibroacoustical response of finite noise barriers. *WIT Transactions on Modelling and Simulation* 1: 323–330. <https://doi.org/10.2495/be120281>
- Golmohammadi R., J. (2009). *Environ. Health, Sci. Eng.* 6 3: 181-186.
- Grubliauskas, R., Strukcinskiene, B., Raistenskis, J., Strukcinskaite, V., Buckus, R., Janusevicius, T., & Pereira, P. A. da S. 2014. Effects of urban rail noise level in a residential area. *Journal of Vibroengineering* 16(2): pp. 987–996.
- Guidelines for Environmental Noise Limits and Control, Third Edition, Department of Environment Ministry of Energy, Science, Technology, Environment & Climate Change (MESTECC), (2020)
- Halim, H., Yusob, M.F.M., Abdullah, R., Nor, M.J.M., Rahman, N.A., Sukor, N.S.A., Haron, Z. 2018. Noise barrier as an option to reduce road traffic noise from highways in Klang valley, Malaysia. *AIP Conference Proceedings*, 2030, art. no. 020276.
- Halonen, J.I., Vahtera, J., Stansfeld, S., Yli-Tuomi, T., Salo, P. 2012. Associations between nighttime traffic noise and sleep: the Finnish Public Sector Study. *Environ. Health Perspect* 120: 1391–1396. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205026>.
- Hanninen, O., Knol, A.B., Jantunen, M., Lim, T.A., Conrad, A. (2014). Environmental burden of disease in Europe: assessing nine risk factors in six countries. *Environ. Health Perspect* 122 (5): 439–446. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206154>
- Hur, B.-Y., Park, B.-K., Ha, D.-I., Um, Y.-S. 2005. Sound absorption properties of fiber and porous materials. *Materials Science Forum* 475-479 (IV): pp. 2687-2690.
- Ising, H., & Kruppa, B. 2004. Health effects caused by noise: Evidence in the literature from the past 25 years. *Noise and Health* 6(22): 5–13.
- Ishizuka, T., & Fujiwara, K. 2004. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. *Applied Acoustics* 65(2): 125–141. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2003.08.006>
- Jaka Sodnik, & Sašo Tomažič. 2015. Spatial Sound. *Springer Briefs in Computer Science*: 5–32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22111-3_2
- Jiang, Y., Huang, Y., Tang, W., & Wang, J. 2023. A Study on Innovative Design and Application of Noise Barrier from the Perspective of Urban Culture. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. <https://doi.org/10.3233/faia220751>
- Joynt, J., Kang, J. 2010. The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers. *Sci. Total Environ.* 408 (20) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.020>.

- Kim, H., Yoon, J. 2017. Frequency response function of motors for switching noise energy with a new experimental approach. *J. Mech. Sci. Technol.* 31: 2671–2677. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0510-9>
- Kim, K. 2015. Sources, Effects, and Control of Noise in Indoor/Outdoor Living Environments. *Journal of the Ergonomics Society of Korea* 34(3): 265–278. Retrieved January 22, 2022, from <https://doi.org/10.5143/jesk.2015.34.3.265>
- Kim, T.-M., Han, J.-H., & Kim, J.-T. 2011. Environmental Noise Prediction using Scale Model: A Measurement Methodology. *International Journal of Railway. Korean Society for Railway.* <https://doi.org/10.7782/ijr.2011.4.2.042>
- Kok, M., Berkhout, B. W., Carlson, N. V., Evans, N. P., Khan, N., Potvin, D. A., Radford, A. N., Sebire, M., Saeed Shafiei Sabet, Shannon, G., & Claudia. 2023. How chronic anthropogenic noise can affect wildlife communities. *Frontiers in Ecology and Evolution*: 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1130075>
- Kulkina, V., & Komkin, A. 2020. Study of acoustic characteristics of noise barriers. *MATEC Web of Conferences* 320: 00030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032000030>
- Lekner, J. 2016. Acoustic Waves. *Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics*: 419–451. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23627-8_17
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2021. *2020 China Ecological Environment Status Bulletin*. Beijing.
- Mikołajczyk, Z., Szalek, B., & Piekłak, K. 2020. Optimization of Dynamic Mechanical Properties of Knitted Barrier Meshes. *Autex Research Journal* 20(4): 461–475. <https://doi.org/10.2478/aut-2020-0042>
- Moradi, G., Monazzam, M.R., Habibi, P. 2019. The effect of the angle upper edge in shaped noise barriers with a T-shaped upper edge. *Iranian Journal of Health and Environment* 12 (1): pp. 31-46.
- Murphy E. and King E.A. 2013. “An Assessment of Residential Exposure to Environment Noise At A Shipping Port,” *Journal Of Environment International* Vol.63: pp. 207-215.
- Na'im, I. M. 2015. Noise LA, Max Statistical Linear Prediction Model for Ampang Line Light Rail Transit (LRT) at Residential Area Along Cempaka Station (Doctoral dissertation, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia).
- Ni, Q.-Q., Lu, E., Kurahashi, N., Kurashiki, K., & Kimura, T. 2008. Development of Insulation Sheet Materials and Their Sound Characterization. *Advanced Composite Materials*, 17(1): 25–40. <https://doi.org/10.1163/156855108x292657>
- Olaosun, A.O., Ogundiran, O., Tobih, J.E. 2009. Health hazards of noise: A review article. *Research Journal of Medical Sciences* 3 (3): pp. 115-122.

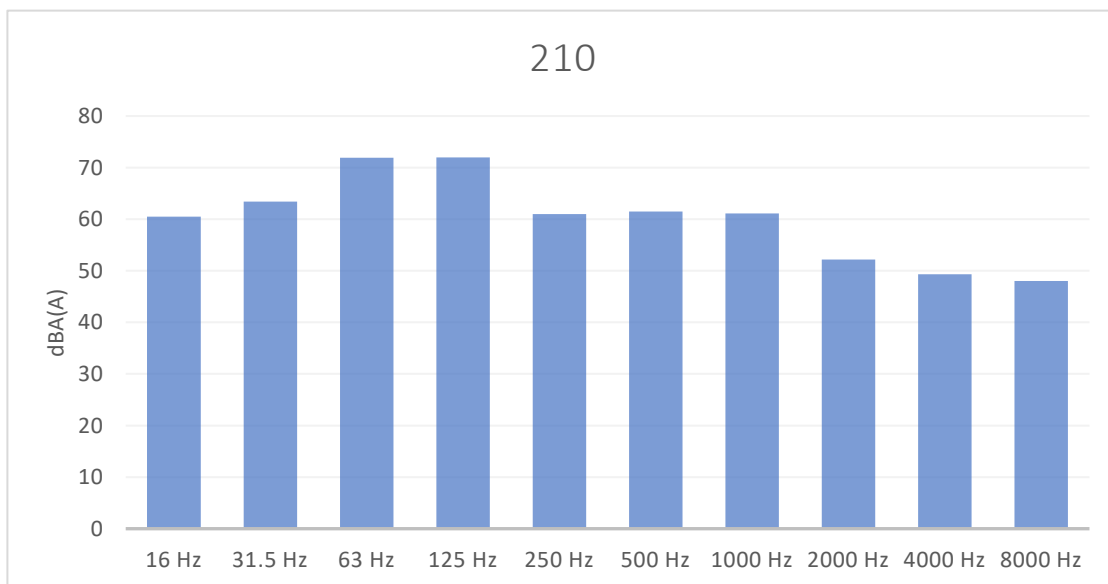
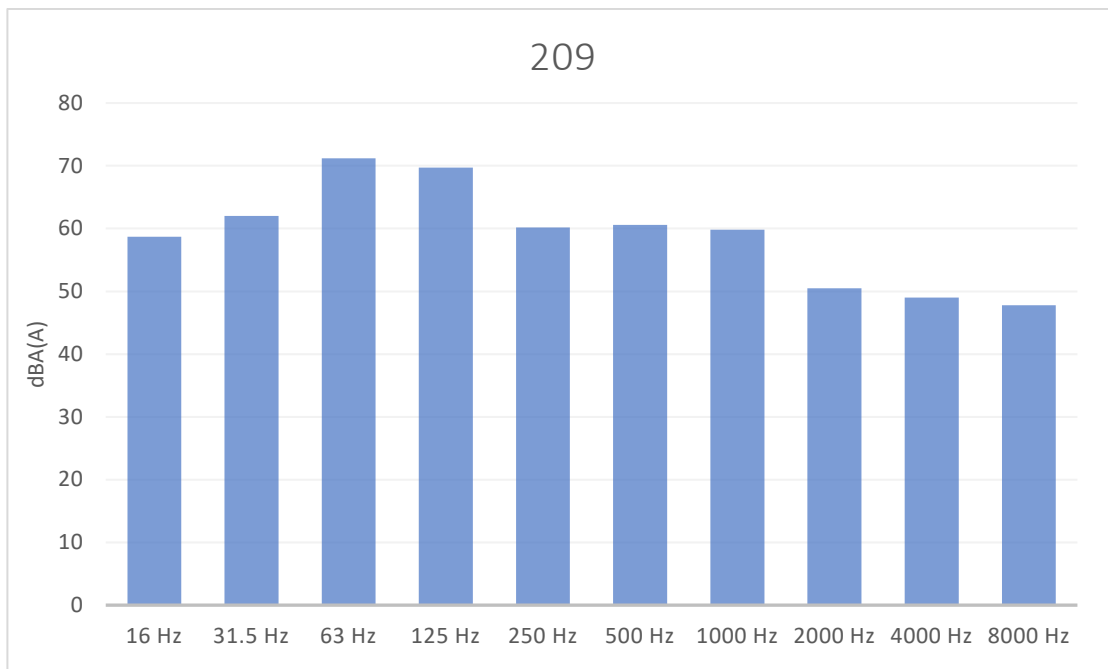
- Orban, E., McDonald, K., Sutcliffe, R., Hoffmann, B., Fuks, K.B. 2016. Residential road traffic noise and high depressive symptoms after five years of follow-up: results from the Heinz Nixdorf recall study. *Environ. Health Perspect* 124: 5. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409400>.
- Park, C.-J., & Haan, C.-H. 2015. Analyses of the Railway Noise Transmission Characteristics of the Rooms in High-speed Train Stations Depending on Building Types. *The Journal of the Acoustical Society of Korea* 34(5): 385–393. <https://doi.org/10.7776/ask.2015.34.5.385>
- Putman, B.J., Amirkhanian, S.N. 2005. Rubberized asphalt mixtures: A novel approach to pavement noise reduction. *WIT Transactions on the Built Environment* 77: pp. 541-549.
- Rasmussen, R.O., Donovan, P.R., Rymer, B.C., Whirledge, R.P. 2009. Modeling source and wayside sound levels as affected by pavement and bridge joint impulse noise. *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2009, INTER-NOISE 2009* 1: pp. 453-461.
- Ravikant Pareek. 2022. Method of Noise Control for Building. *Smart Innovation, Systems and Technologies*: 299–305. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92905-3_39
- Redondo, J., Peiro-Torres, M.P., Llinares, C., Bravo, J.M., Pereira, A., Amado-Mendes, P. 2021. Correlation between objective and subjective assessment of noise barriers. *Appl. Acoustic*: 172 <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107640>.
- Ridd, P., Gilbert, G. 2005. Acoustics and aesthetics of GRC noise barriers. *Concrete Engineering International* 9 (1): pp. 32-34.
- Rindel, J.H., Richard, A. A. 2022. Revised theory for the absorption of a rectangular absorber in an infinite rigid baffle. *Proceedings of the International Congress on Acoustics*.
- Rood, G. M., & James, S. H. 2016. Noise. *CRC Press EBooks*: 770–791. <https://doi.org/10.1201/b13197-61>
- Rusmailani, Ab. A., & Fatimah, Y. 2013. PERKEMBANGAN KOGNITIF AWAL KANAK-KANAK : PERBANDINGAN ANTARA TASKA
- Savioja, L., & Svensson, U. P. 2015. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138(2): 708–730. <https://doi.org/10.1121/1.4926438>
- Scarneciu I., Muntean I., Scarneciu C., Scarneciu V. 2010. Diagnosis and renal lithiasis treatment using ultrasounds. *Metalurgia International* 15 (11): pp. 112-115.
- Shahidan, S., Maarof, M. Z. M., Raihan Ramzi Hannan, N. I., & Ali, N. 2017. Existing Noise Level at Railway Stations in Malaysia. *MATEC Web of Conferences* 103: 09012. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710309012>

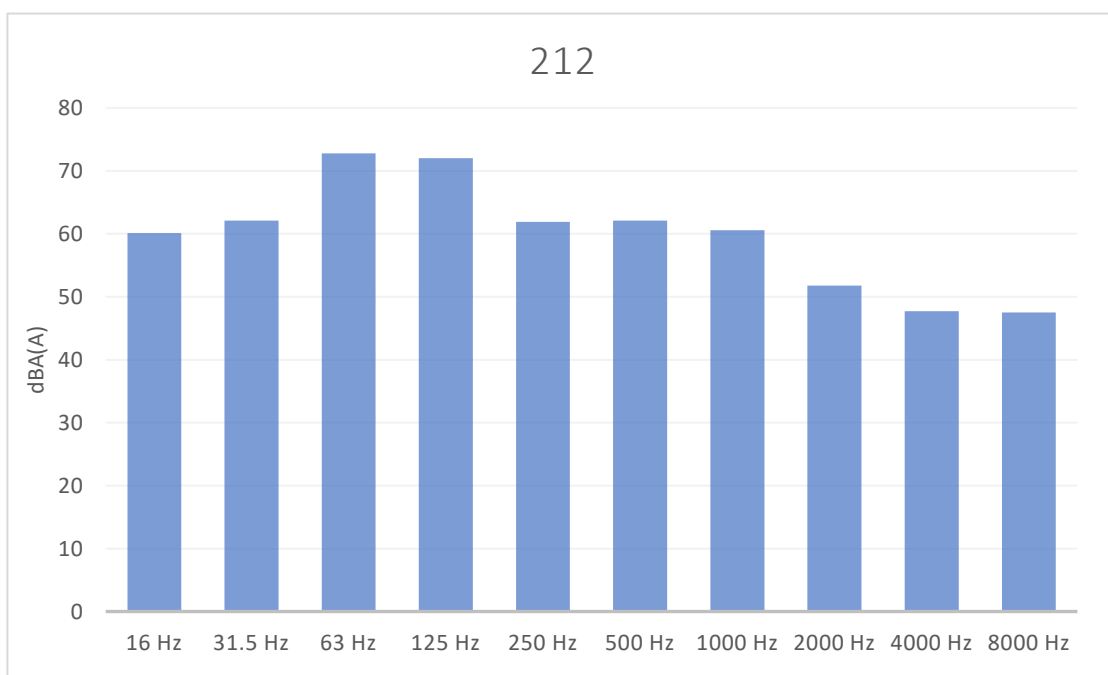
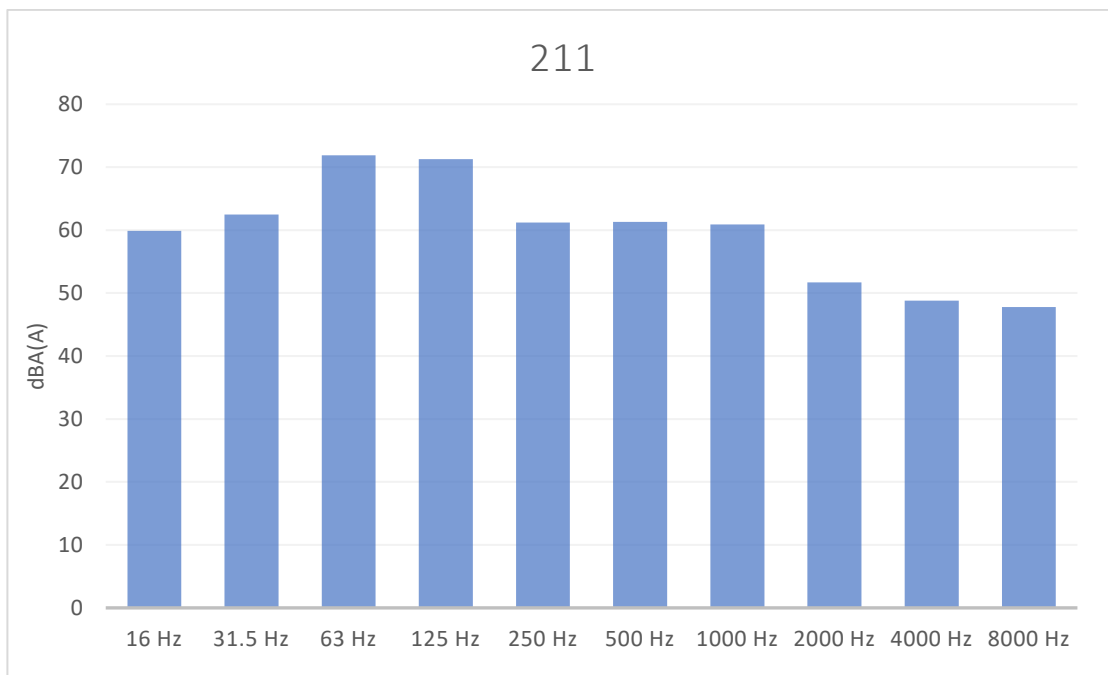
- Shaaban, K., & Abdelrahman Abouzaid. 2023. Measuring Traffic Noise for Different Types of Vehicles. <https://doi.org/10.1109/ietc57902.2023.10152062>
- Shimizu, F., Tanaka, K., Yamamoto, K., & Hiroshi Shigefuji. 2011. Experimental Visualization of Sound Pressure Level and Vibration Around a Soundproof Barrier. *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1115/AJK2011-08012>
- Simion, S., Găman, A., Kovacs, I., Kovacs, M., & Toth, L. 2024. Road Traffic, Source of Urban Noise. *Springer Proceedings in Physics*: 111–119. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48087-4_12
- Sørensen, M., Poulsen, A. H., Kroman, N., Hvidtfeldt, U. A., Thacher, J. D., Roswall, N., Brandt, J., Frohn, L. M., Jensen, S. S., Levin, G., & Raaschou-Nielsen, O. 2021. Road and railway noise and risk for breast cancer: A nationwide study covering Denmark. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110739>
- Stansfeld, S. A., & Matheson, M. P. 2003. Noise pollution: Non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin* 68: pp. 243–257. Retrieved January 18, 2022, from <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033>
- Stansfeld, S., Clark, C. 2015. Health effects of noise exposure in children. *Current Environmental Health Reports* 2: 171–178. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0044-1>.
- Stansfeld, S., Clark, C., Smuk, M., Gallacher, J., Babisch, W. 2021. Road traffic noise, noise sensitivity, noise annoyance, psychological and physical health and mortality. *Environ. Health-Glob* 20. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00720-3>.
- Tassi P., Rohmer O., Schimchowitsch S., Eschenlauer A., Bonnefond A., Marggiocch F. and Muzet A. (2010). “Living Alongside Railway Tracks: Long Term Effect of Nocturnal Noise on Sleep and Cardiovascular Reactivity as A Function of Age,” *Journal By Environment International* Vol.36: pp. 683 – 689
- Thakre, C., Laxmi, V., Vijay, R., Killedar, D.J., Kumar, R. 2020. Traffic noise prediction model of an Indian road: an increased scenario of vehicles and honking. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27: 38311–38320. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09923-6>.
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D. 2012. On the choice between walls and berms for road traffic noise shielding including wind effects. *Landsc. Urban Plann.* 105 (3): 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.017>.
- Venckus, Z., Grubliauskas, R. 2011. The evaluation of the efficiency of the L-Shaped noise barrier while working with the programme CadnaA. *8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011*: pp. 441-445.
- Wardika K., Suparsa G.P. and Priyantha, W.D.M. 2012. “Analisis Kebisingan Lalu Lintas Pada Ruas Jalan Arteri,” *Journal by Electronic Scientific Infrastructure Civil Engineering*

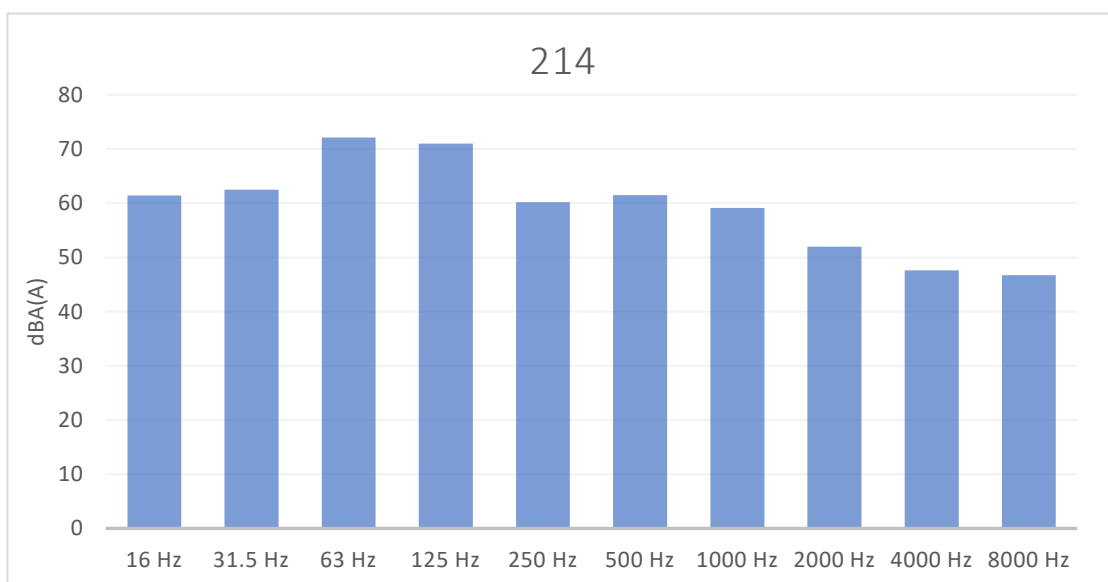
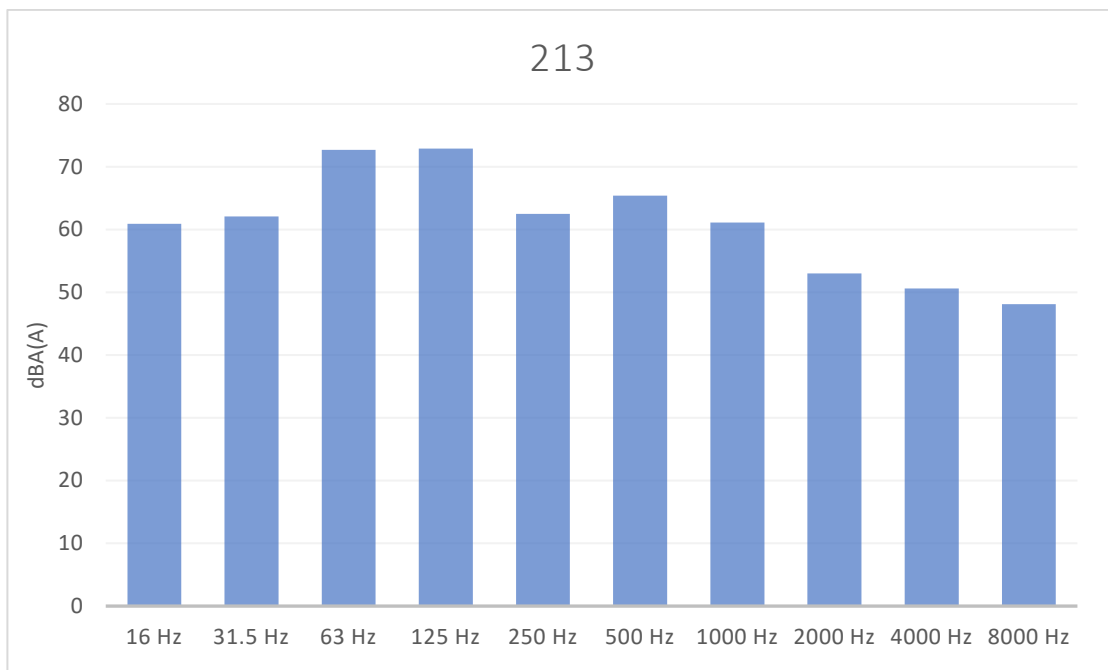
- Wentzel, R.E., Aubert, A. 2008. Using a dynamometer along with road tests to measure vehicle rolling and wind noise. *In: ASME 2008 Noise Control and Acoustics Division Conference*: pp. 201–206. <https://doi.org/10.1115/NCAD2008-73027>
- WHO (World Health Organization). 2018. Environmental Noise Guidelines for The European Region.
- Wrótny, M., & Bohatkiewicz, J. 2021. Traffic Noise and Inhabitant Health—A Comparison of Road and Rail Noise. *Sustainability* 13(13): 7340. <https://doi.org/10.3390/su13137340>
- Xiaowan L., Jin Z., David T., Eduardo L. I., Giacomo S., Zhiwei H., Martin T., Daniel L., J. 2021. *Applied Acoustics*: 175.
- Xiang, N., Rozynova A. 2017. Exact and asymptotic solutions of wedge fields for sound propagation modeling using the physical theory of diffraction (2017) *INTER-NOISE 2017 - 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Taming Noise and Moving Quiet, 2017-January*.
- Yang, L., Gutierrez, D. E., & Guthrie, O. W. 2023. Systemic health effects of noise exposure. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 27(1): 21–54. <https://doi.org/10.1080/10937404.2023.2280837>
- Zhenxu S., Yongfang Y., Guowei Y., Wen L. & Prasert P., J. 2019. *Appl. Sci.* 9.

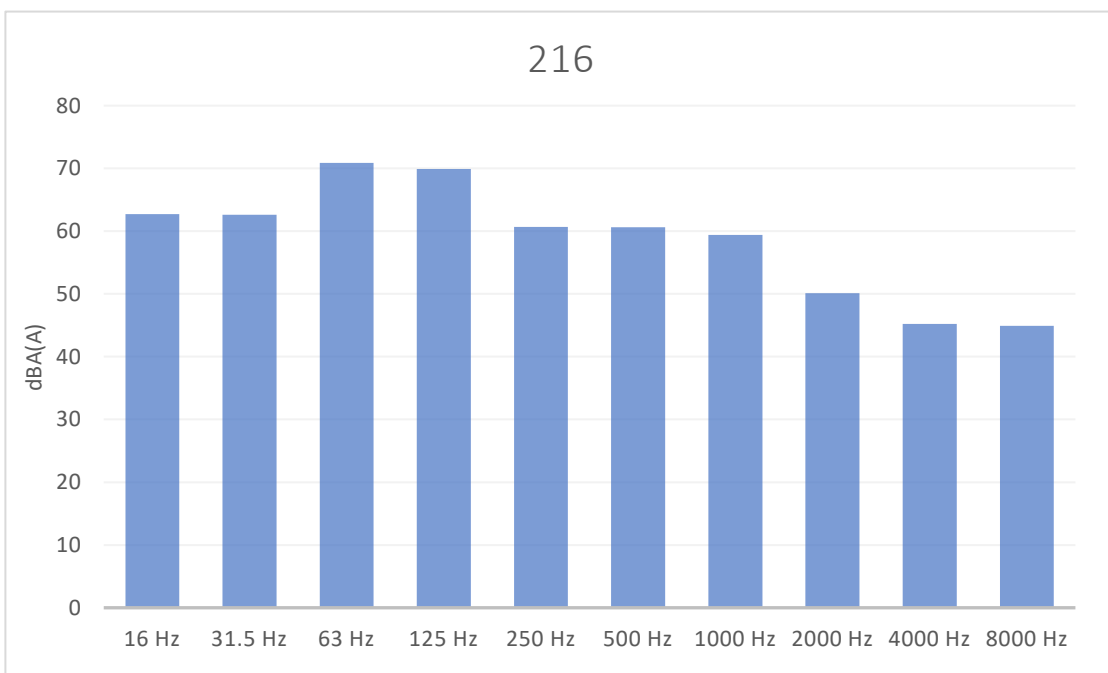
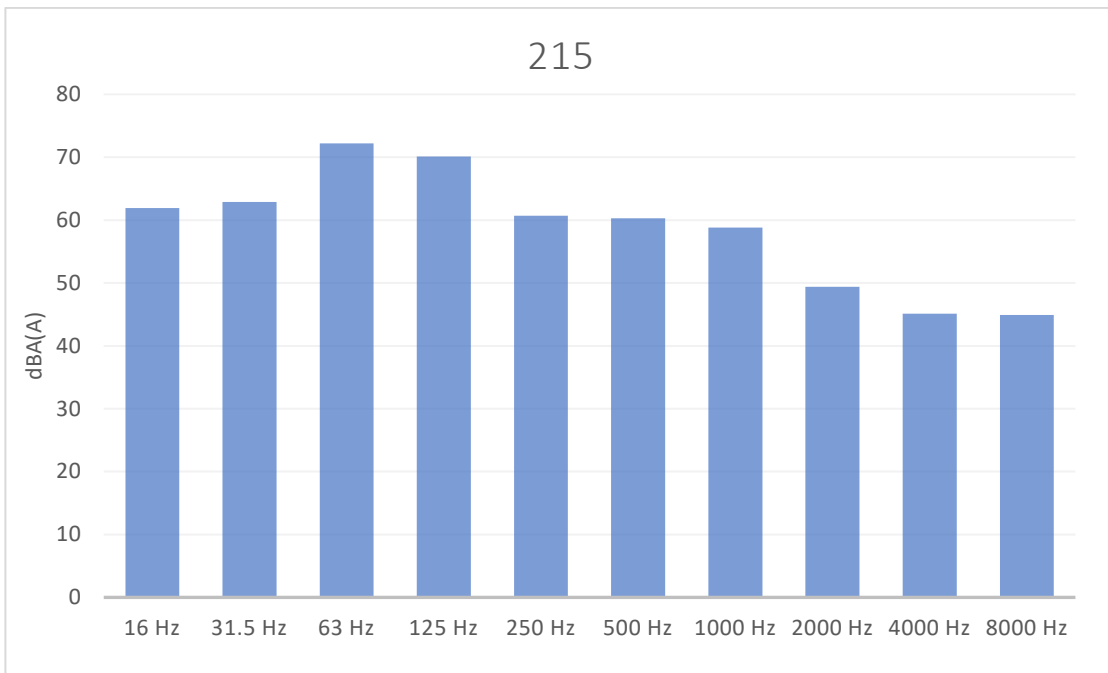
LAMPIRAN A

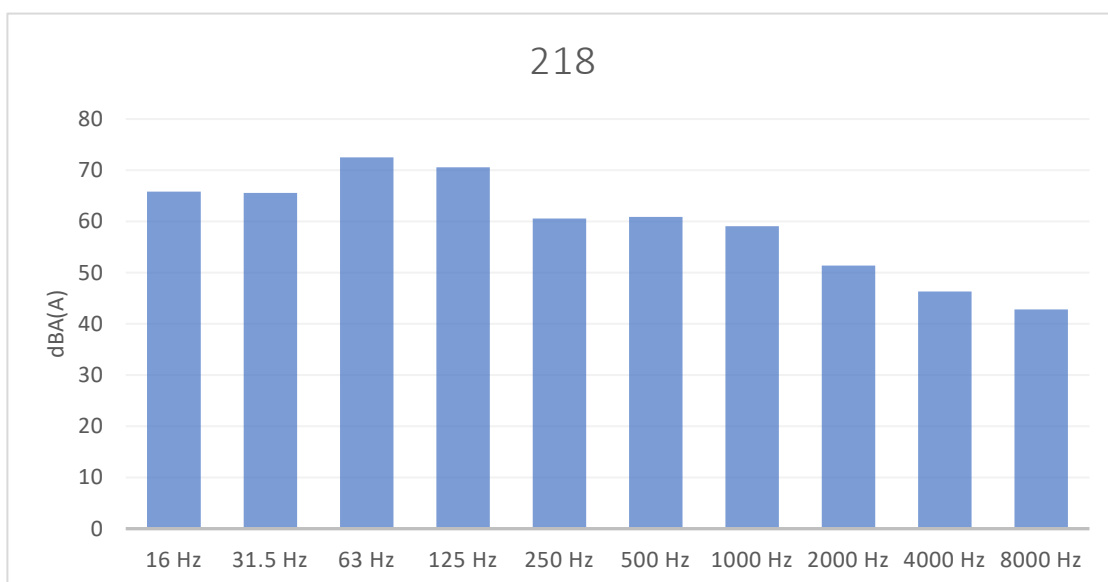
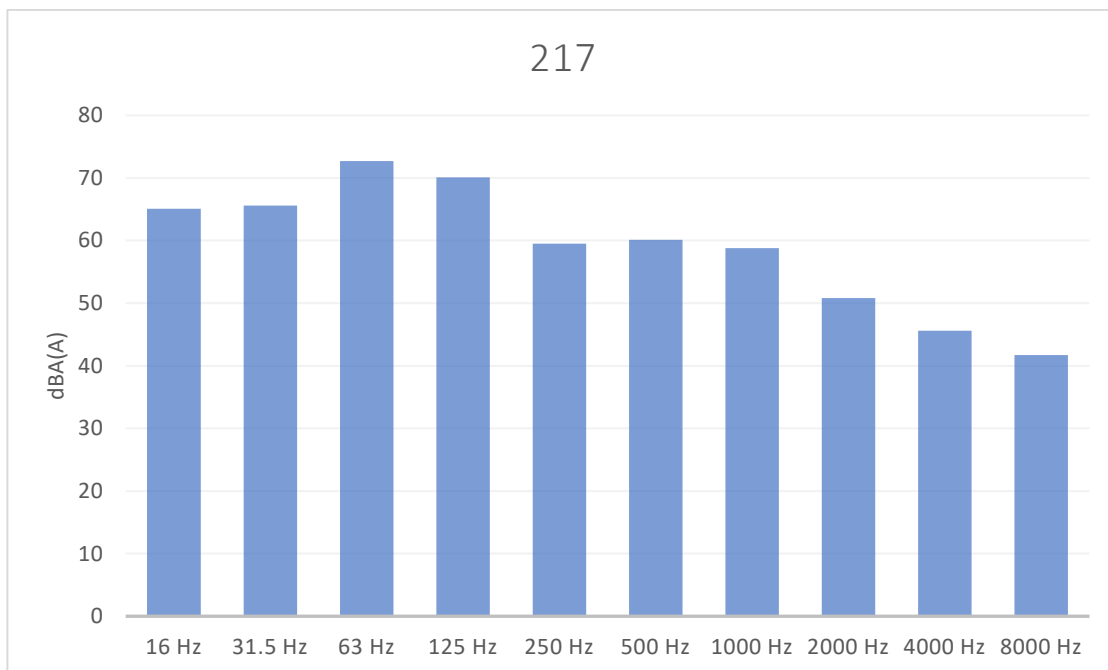
GRAF BAR DATA BUNYI JALAN RAYA DI SETIAP SELA MASA PADA FREKUENSI BERBEZA

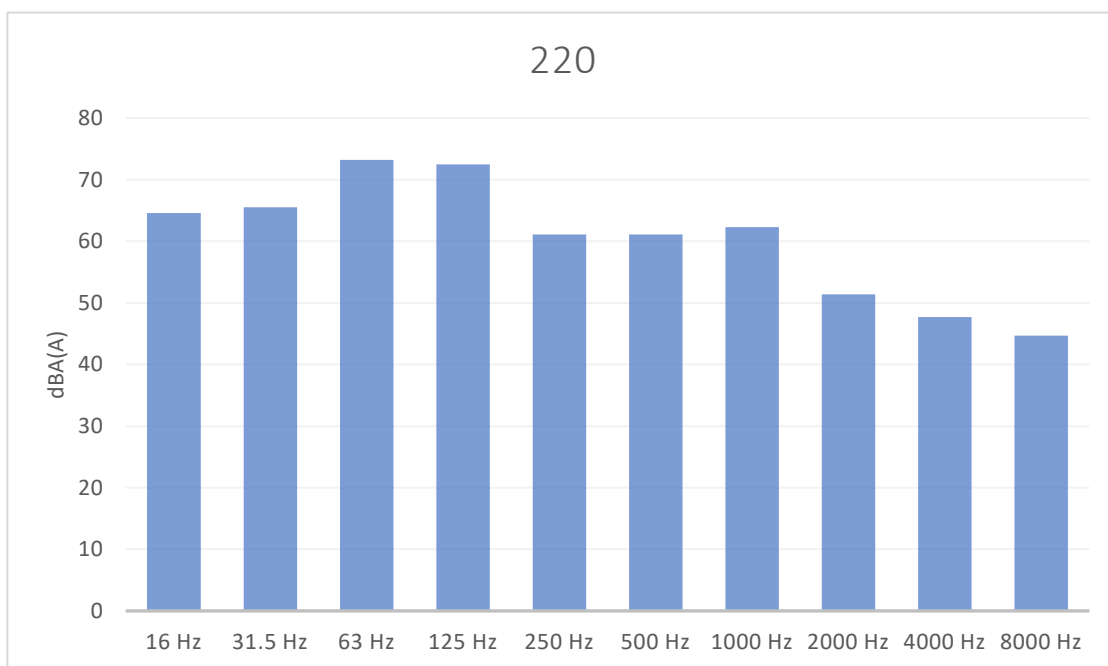
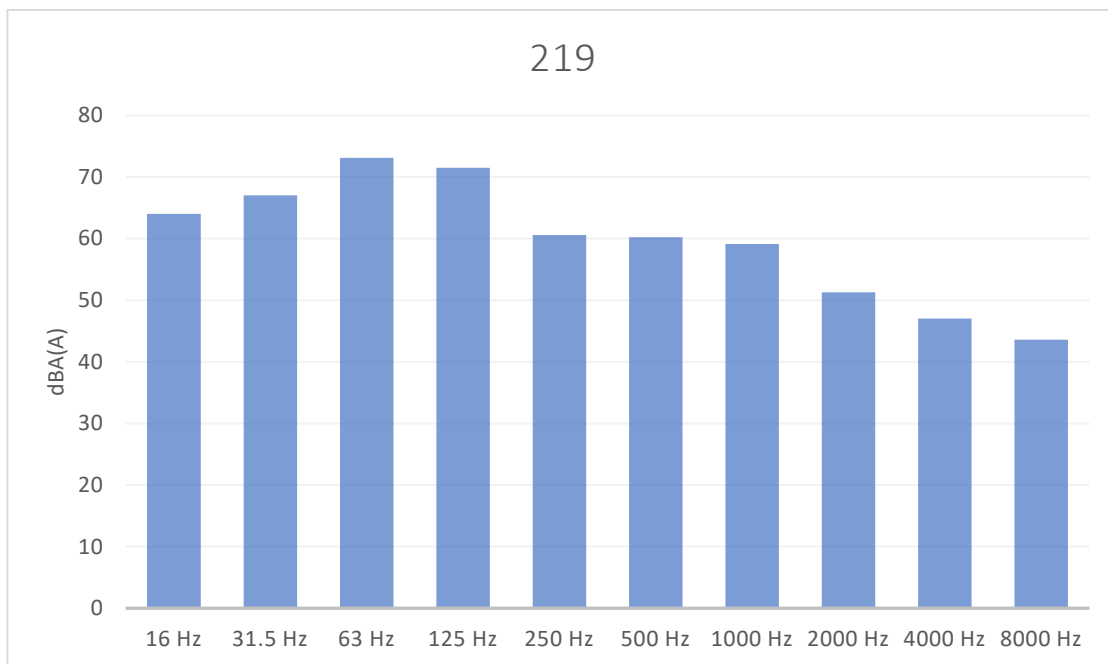


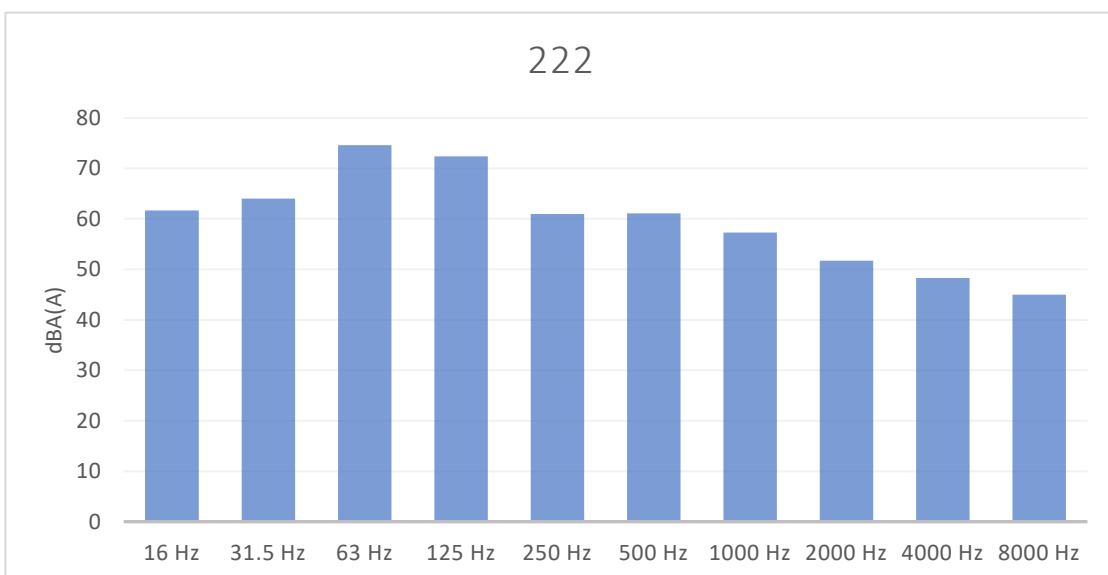
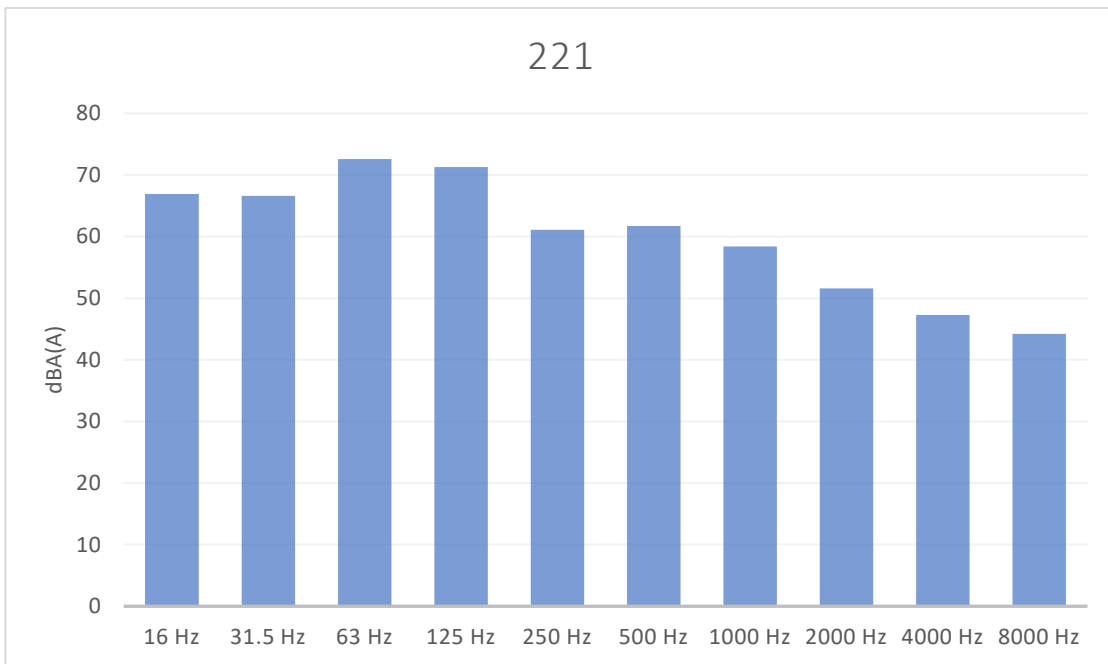


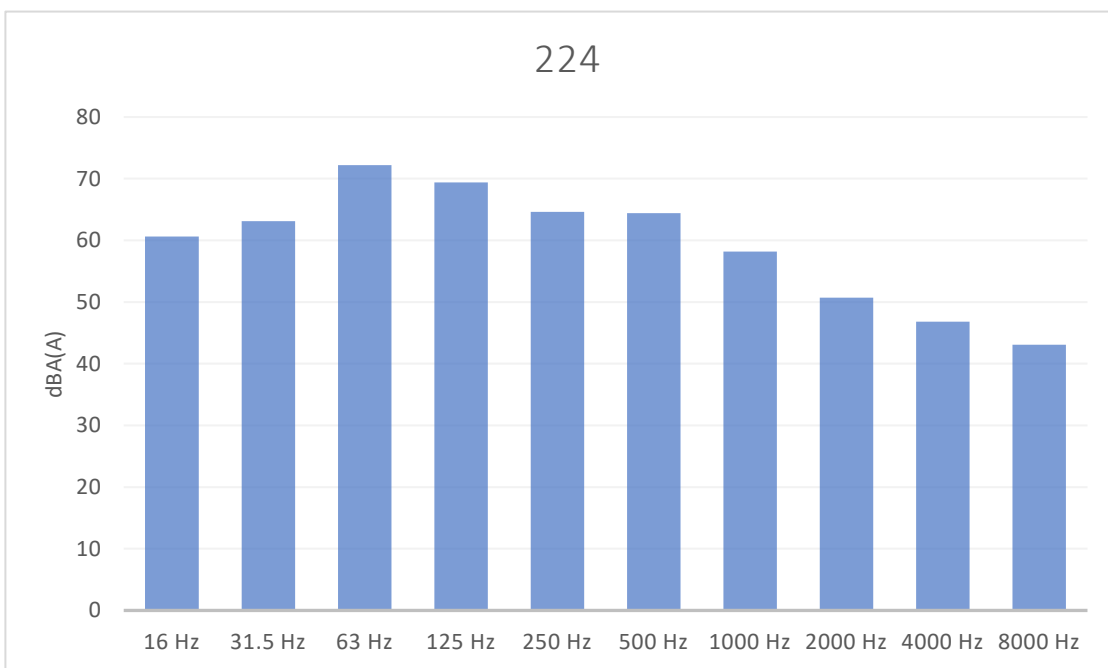
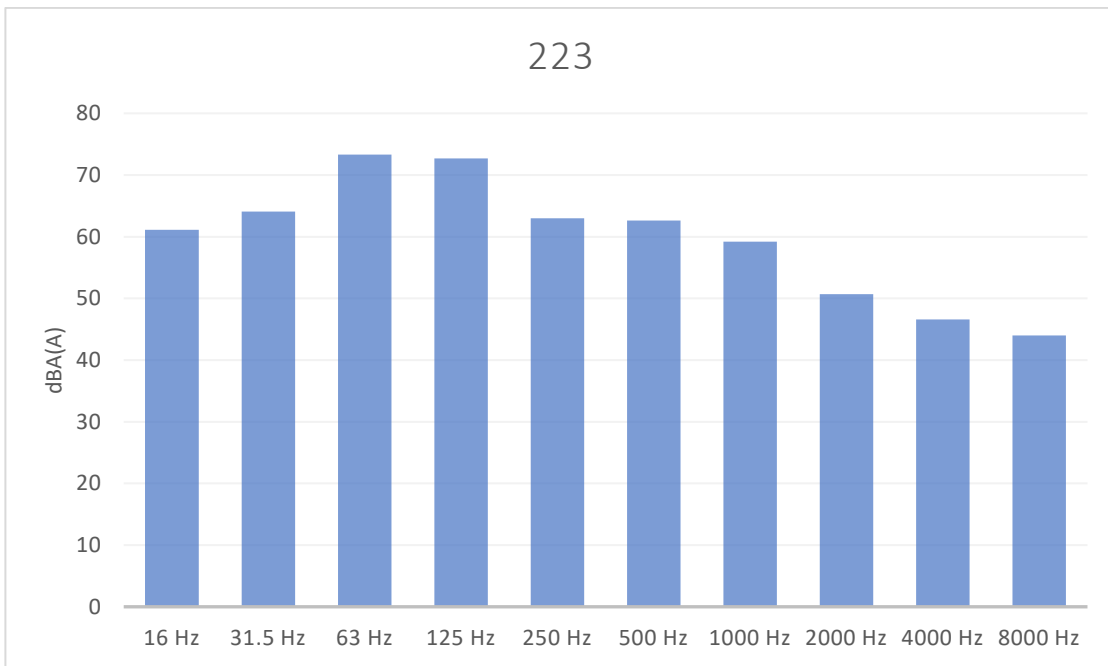












LAMPIRAN B**GRAF BAR DATA BUNYI KERETA API DI SETIAP SELA MASA PADA FREKUENSI BERBEZA**