Jurnal Kejuruteraan 38(7) 2026: 3555-3580
https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38(7)-31

Kaedah Pengimbasan Frekuensi Radio dalam Menghadapi Persekitaran Buruk dan Keadaan Operasi Mencabar di Malaysia

(Technique of Radio Frequency Scanning in Response to Adverse Environment and Challenging Conditions in Malaysia)

Rosdin Abd Kahar[a], Mohd Nizam Ab Rahman[a*], Nizaroyani Saibani[a], Mohd Fais Mansor[a], Mirza Basyir Rodhuan[b] & Saifudin Kasimun[b]

[a]*Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia,*

[b]*Jabatan Kejuruteraan, SKMG Asia Technology Sdn. Bhd., Damansara Damai, 47830 Petaling Jaya, Selangor, Malaysia*

[*]*Corresponding author: rosdinkahar@gmail.com*

Received 7 March 2026, Received in revised form 12 July 2026
Accepted 12 August 2026, Available online 30 October 2026

ABSTRAK

Persekitaran mencabar dan keperluan bekerja di tempat tinggi boleh menjejaskan keselamatan serta kecekapan pengimbasan frekuensi radio (radio frequency, RF) di menara telekomunikasi. Kajian ini membandingkan kaedah Berasaskan-Manusia (BM) dengan kaedah Berasaskan-Dron (BD) berdasarkan masa operasi, bilangan bacaan RF dan Aras Penerimaan Isyarat (Received Signal Level, RSL). Perbandingan lapangan dilaksanakan di 10 tapak menara telekomunikasi pada jalur 13 GHz dan 18 GHz menggunakan instrumen serta parameter pengukuran yang diseragamkan. Masa operasi dan bilangan bacaan RF dianalisis secara deskriptif, manakala kesan kaedah pengimbasan dan jalur frekuensi terhadap RSL dinilai menggunakan Analisis Varians (ANOVA) dua faktor dan ujian Perbezaan Signifikan Terkecil Fisher (FLSD) pada aras keertian 0.05. Kaedah BD merekodkan purata masa operasi 16.4 minit berbanding 132.1 minit bagi BM, bersamaan dengan pengurangan 87.6% atau nisbah kira-kira 1:8.1. Kaedah BD merekodkan 79 bacaan RF secara keseluruhan, berbanding 61 bacaan bagi BM. ANOVA menunjukkan bahawa kaedah pengimbasan memberikan kesan yang signifikan terhadap RSL (Nilai-p = 0.042), manakala jalur frekuensi tidak memberikan kesan yang signifikan (Nilai-p = 0.337). FLSD menunjukkan min RSL bagi BD ialah −97.139 dBm, berbanding −100.996 dBm bagi BM, dengan perbezaan 3.857 dB. Dapatan ini menunjukkan bahawa BD mempercepat pengimbasan, mengurangkan kebergantungan kepada pendakian menara dan meningkatkan kebolehcapaian titik cerapan. Dapatan turut menyokong SDG 8, SDG 9, SDG 11 dan SDG 13 melalui pengurangan pendedahan kepada kerja di tempat tinggi, inovasi pemantauan infrastruktur, sokongan terhadap daya tahan rangkaian dan potensi kecekapan penggunaan sumber dalam operasi telekomunikasi di Malaysia.

Kata kunci: 5G; ANOVA; dron; aras penerimaan isyarat; kerja di tempat tinggi

ABSTRACT

Adverse conditions and work at height affect the safety and efficiency of radio frequency (RF) scanning at telecommunication towers. This study compared the Human-Based (BM) and Drone-Based (BD) methods based on operation time, number of RF readings, and Received Signal Level (RSL). Comparisons were conducted at 10 telecommunication tower sites across the 13 GHz and 18 GHz bands using standardised instruments and parameters. Operation time and the number of RF readings were analysed descriptively, while the effects of scanning method and frequency band on RSL were evaluated using two-factor analysis of variance (ANOVA) and Fisher's Least Significant Difference (FLSD) test at α = 0.05. The BD method recorded an operation time of 16.4 minutes, compared with 132.1 minutes for BM, corresponding to an 87.6% reduction and a ratio of 1:8.1. BD recorded 79 RF readings overall, compared with 61 readings for BM. ANOVA showed that the scanning method significantly affected RSL (P = 0.042), whereas the frequency band had no significant effect (P = 0.337). FLSD showed an RSL of −97.139 dBm for BD and −100.996 dBm for BM, a difference of 3.857 dB. These findings demonstrate that BD accelerates RF scanning, reduces dependence on tower climbing, and improves access to observation points. The findings support SDGs 8, 9, 11, and 13

through reduced exposure to work at height, infrastructure-monitoring innovation, communication-network resilience, and the potential for more resource-efficient operations in Malaysia.

Keywords: 5G; ANOVA; drone; received signal level; working at height

PENGENALAN

Pelaksanaan rangkaian generasi ke-5 (5G) di Malaysia bermula pada Disember 2021 sebagai sebahagian daripada usaha memperkukuh infrastruktur digital negara. Sasaran pelaksanaan 5G negara merangkumi pembangunan sebanyak 10,167 tapak 5G di seluruh Malaysia menjelang 2029 bagi menyokong perkhidmatan komunikasi yang lebih pantas, berlatensi rendah dan berkeupayaan tinggi (MCMC 2021a, 2023a). erkembangan ini dijangka memacu transformasi dalam sektor pengangkutan, penjagaan kesihatan, pembuatan dan perkhidmatan digital lain yang bergantung kepada kestabilan rangkaian tanpa wayar (Jit Singh et al. 2023; Kang et al. 2023). Seiring dengan peluasan infrastruktur ini, keperluan pengumpulan data frekuensi radio (*radio frequency*, RF) secara berkala di menara telekomunikasi menjadi semakin penting bagi menyokong pemantauan liputan, kestabilan rangkaian dan kualiti perkhidmatan komunikasi.

Sistem telekomunikasi pada asasnya terdiri daripada peralatan pemancar, saluran komunikasi dan peralatan penerima. Peralatan pemancar dan penerima lazimnya disokong oleh antena serta komponen rangkaian yang dipasang pada menara telekomunikasi atau struktur pemancaran lain (Febrian et al. 2023). Antena ini beroperasi dalam spektrum RF bagi membentuk saluran komunikasi antara peranti pengguna dengan rangkaian operator, sekali gus membolehkan penghantaran dan penerimaan maklumat secara tanpa wayar (Elhakim et al. 2023; Febrian et al. 2023; Islam et al. 2021; Levitt & Lai 2010). Dalam kajian ini, pengimbasan RF merujuk kepada proses pengukuran isyarat pada jalur frekuensi yang ditetapkan, dengan tumpuan kepada masa operasi, bilangan bacaan RF yang berjaya direkodkan dan Aras Penerimaan Isyarat (*Received Signal Level*, RSL) sebagai indikator prestasi pengimbasan.

Menara telekomunikasi merupakan struktur yang melibatkan kerja di tempat tinggi (*Working at Height*, WaH), khususnya bagi aktiviti pemeriksaan, pemantauan, penyelenggaraan dan pengumpulan data RF. Kaedah Berasaskan-Manusia (BM) masih digunakan dalam operasi lapangan kerana pekerja perlu mengakses struktur menara secara fizikal sambil membawa atau menempatkan peralatan pengukuran pada kedudukan cerapan yang sesuai. Walau bagaimanapun, kaedah ini memerlukan persediaan keselamatan yang ketat, tempoh kerja yang lebih panjang dan kebergantungan kepada kebolehcapaian fizikal tapak. Menara telekomunikasi juga terdedah kepada faktor degradasi seperti penuaan bahan (Dai et al. 2012), panahan petir (Takaya et al. 2019), gangguan pokok berhampiran (Xie et al. 2017), kerosakan struktur (Merz & Kendoul 2011), penebat terjejas (Simic et al. 2015), dan kecondongan menara akibat pendedahan berpanjangan kepada persekitaran lapangan (Papiliopoulou et al. 2019). Keadaan ini menjadikan pemilihan kaedah pengimbasan RF yang cekap, selamat dan boleh dilaksanakan secara konsisten sebagai isu penting dalam operasi menara telekomunikasi.

Pengimbasan RF memainkan peranan penting dalam tinjauan tapak tanpa wayar kerana data yang diperoleh menyokong reka bentuk, susun atur dan pengoptimuman rangkaian. Proses ini membantu menilai liputan, mengenal pasti gangguan, menyokong perancangan kapasiti dan memastikan tahap kualiti perkhidmatan yang boleh diterima (Cao et al. 2018; Cisco Systems 2017; Kahar et al. 2023; Sainuddin et al. 2021). Namun begitu, apabila pengimbasan RF dilaksanakan pada menara telekomunikasi, keperluan teknikal pengukuran perlu diseimbangkan dengan aspek keselamatan pekerja, masa operasi, kos perkhidmatan, kesesuaian persekitaran dan prestasi data yang direkodkan. Oleh itu, kaedah pengumpulan data RF yang dapat mengurangkan kebergantungan kepada pendakian fizikal berpotensi meningkatkan kecekapan operasi tanpa mengabaikan keperluan teknikal pengukuran.

Kemajuan teknologi dron telah membuka ruang kepada penggunaan kaedah Berasaskan-Dron (BD) sebagai platform pembawa peralatan pengukuran RF. Dalam konteks pemeriksaan struktur tinggi dan menara telekomunikasi, dron berupaya meningkatkan kebolehcapaian, mengurangkan pendedahan pekerja kepada kerja di tempat tinggi dan mempercepat pemerolehan data di tapak yang sukar diakses (Isa et al. 2019; Pomarnacki et al. 2025; Romeli et al. 2023). Perkembangan infrastruktur 5G juga memerlukan strategi pengumpulan data RF yang lebih selamat dan fleksibel, khususnya di kawasan luar bandar, pinggir bandar dan tapak yang mempunyai kekangan operasi (Azizan & Tarmidi 2025; Kopyt & Rodo 2026; MCMC 2024c, 2024a). Walaupun penggunaan sistem pesawat tanpa pemandu (*Unmanned Aerial System*, UAS) semakin berkembang dalam pemeriksaan dan pemantauan infrastruktur tinggi, kebanyakan kajian terdahulu lebih tertumpu kepada pemeriksaan visual, pemantauan struktur, kebolehcapaian tapak dan perancangan laluan operasi. Dalam konteks menara telekomunikasi di Malaysia, perbandingan empirikal yang menilai prestasi pengimbasan RF antara kaedah BM dan BD berdasarkan masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL masih terhad.

Setakat pengetahuan penulis, artikel ini merupakan antara kajian awal yang membandingkan prestasi pengimbasan RF antara kaedah BM dan BD merentas beberapa tapak menara telekomunikasi di Malaysia menggunakan Analisis Varians (*Analysis of Variance*, ANOVA) dua faktor dan ujian Perbezaan Signifikan Terkecil Fisher (*Fisher's Least Significant Difference*, FLSD). Sehubungan itu, kajian ini bertujuan untuk: (i) membandingkan masa operasi pengimbasan RF antara kaedah BM dan BD di 10 tapak menara telekomunikasi; (ii) menilai perbezaan bilangan bacaan RF yang berjaya direkodkan oleh kedua-dua kaedah; dan (iii) menganalisis kesan kaedah pengimbasan terhadap RSL pada jalur frekuensi 13 GHz dan 18 GHz menggunakan ANOVA dua faktor dan FLSD. Melalui objektif ini, kajian ini menyediakan bukti lapangan bagi menilai kesesuaian kaedah BD sebagai pendekatan pengimbasan RF yang lebih cekap, selamat dan berasaskan prestasi untuk operasi menara telekomunikasi.

SOROTAN KEPUSTAKAAN

KESELAMATAN PEKERJA DARI ASPEK KERJA DI TEMPAT TINGGI

Keselamatan merupakan keutamaan dalam pelaksanaan kerja di tempat tinggi di menara telekomunikasi. Pekerja terdedah kepada risiko utama seperti jatuh (Zermane et al. 2022), bahaya elektrik (Karunasena et al. 2019) dan permukaan kerja yang tidak stabil (Wariishi & Tanaka 2019). Pengurangan risiko tersebut memerlukan protokol keselamatan yang jelas serta penggunaan Kelengkapan Pelindungan Diri (KPD) yang bersesuaian (Aprilia & Ramadhan 2021; Harun et al. 2020; Zermane et al. 2022). Abdul Hamid (Abdul Hamid 2022) menegaskan bahawa jurang komunikasi antara pekerja dengan kontraktor boleh menimbulkan salah faham dan melemahkan pelaksanaan kerangka keselamatan, sekali gus meningkatkan kemungkinan berlakunya kemalangan. Selain risiko kemalangan, pekerja pemanjat menara turut terdedah kepada cahaya matahari, zarah halus, angin dan keadaan kerja luar untuk tempoh yang panjang, yang boleh menjejaskan kesihatan serta keselamatan mereka (Krajaechun et al. 2025). Penilaian bahaya, latihan keselamatan dan pengurusan risiko yang berterusan turut dikenal pasti sebagai faktor penting bagi meningkatkan keselamatan dan keberkesanan kerja penyelenggaraan menara telekomunikasi (Sing et al. 2025).

Bagi tempoh 2013 hingga 2017, kes kemalangan maut berkaitan kerja di tempat tinggi yang dilaporkan dan disiasat menunjukkan trend peningkatan (Zermane et al. 2022). Trend ini menegaskan keperluan untuk memperkukuh langkah keselamatan dan meningkatkan pematuhan terhadap prosedur kerja selamat. Jadual 1 mempersembahkan data Jabatan Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan Malaysia (*Department of Occupational Safety and Health Malaysia*, DOSH) mengenai bilangan kemalangan pekerjaan di tapak pembinaan bagi tempoh 2015 hingga 2023 (DOSH 2025). Berdasarkan rekod tersebut, sektor pembinaan mencatatkan bilangan kemalangan maut tertinggi, diikuti oleh sektor pembuatan dan pertanian. Secara khusus, sebanyak 143 kes kemalangan maut akibat jatuh dari tempat tinggi telah dilaporkan kepada DOSH sepanjang tempoh tersebut.

Dapatan kajian terdahulu dan rekod kemalangan ini menunjukkan bahawa keselamatan kerja di tempat tinggi tidak hanya bergantung pada penggunaan KPD, tetapi turut dipengaruhi oleh komunikasi, latihan, penilaian bahaya dan pengurusan risiko semasa operasi. Bagi pengimbasan RF di menara telekomunikasi, keperluan pekerja mengakses struktur tinggi sambil membawa peralatan pengukuran boleh meningkatkan pendedahan terhadap risiko tersebut. Oleh itu, kaedah pengimbasan yang dapat mengurangkan keperluan pendakian fizikal wajar dinilai dari aspek keselamatan dan prestasi operasi.

JADUAL 1. Bilangan tahunan kemalangan pekerjaan di tapak pembinaan yang dilaporkan oleh DOSH Malaysia (2025) bagi tempoh 2015 hingga 2023

Tahun	Hilang Upaya Tidak Kekal	Hilang Upaya Kekal	Kematian	Jumlah
2015	138	11	88	237
2016	126	5	91	222
2017	110	4	63	177
2018	106	8	118	232
2019	227	15	84	326
2020	137	3	66	206
2021	147	5	65	217
2022	87	2	59	148
2023	106	8	45	159
Jumlah	1184	61	679	1924

KESELAMATAN PEKERJA DARI ASPEK KESIHATAN PEKERJAAN

Teknologi frekuensi radio (*radio frequency*, RF) menyediakan saluran penghantaran dan penerimaan isyarat yang penting dalam sistem komunikasi tanpa wayar. Walau bagaimanapun, tenaga RF daripada sumber pancaran boleh diserap oleh tisu manusia dan berpotensi menghasilkan kesan kesihatan tertentu bergantung pada tahap serta keadaan pendedahan (Ishihara et al. 2020). Keamatan medan RF dipengaruhi oleh frekuensi dan jarak daripada antena. Peningkatan bilangan stesen pangkalan di kawasan berpenduduk padat turut meningkatkan perhatian terhadap risiko kesihatan yang berkaitan dengan pendedahan RF (Al-Awadi & Al-Dujaili 2020; Dilli 2021; Olorunsola et al. 2021). Oleh itu, kesan pendedahan daripada stesen pangkalan selular perlu difahami dengan lebih jelas bagi menyokong pengurusan risiko dan mengurangkan kemungkinan kesan kesihatan yang tidak diingini (Arinze et al. 2021; Chiaraviglio et al. 2022).

Selain frekuensi dan jarak, tahap medan RF berhampiran stesen pangkalan turut dipengaruhi oleh kuasa pancaran, gandaan antena, bilangan terminal yang disambungkan dan kerumitan persekitaran di sekitar tapak (Famoriji & Shongwe 2025). Pengukuran medan elektromagnet RF pada era 5G juga menunjukkan bahawa tahap pendedahan boleh berbeza mengikut jalur frekuensi, jenis sumber pancaran serta lokasi pengukuran sama ada di kawasan bandar, pinggir bandar, luar bandar, dalam bangunan atau luar bangunan (Delidimitriou et al. 2026). Dapatan terkini ini menunjukkan bahawa penilaian pendedahan RF perlu mempertimbangkan keadaan sebenar tapak dan ciri sumber pancaran, bukan berdasarkan satu parameter sahaja.

Gelombang elektromagnet RF yang terhasil semasa komunikasi antara telefon mudah alih dengan stesen pangkalan diklasifikasikan sebagai sinaran tidak mengion. Pengelasan ini menunjukkan bahawa tenaga gelombang tersebut tidak mencukupi untuk menyebabkan proses pengionan secara langsung pada tisu manusia (Khuzairi et al. 2019). Kesan pendedahan RF lazimnya dibahagikan kepada kesan terma dan bukan terma. Kesan terma merujuk kepada peningkatan suhu tisu akibat penyerapan tenaga RF. Pendedahan pada aras medan elektromagnet yang tinggi boleh meningkatkan suhu badan dan berpotensi menjejaskan tisu sekiranya lebihan haba tidak dapat disingkirkan dengan berkesan. Kesan bukan terma pula dikaitkan dalam beberapa kajian dengan gejala seperti gangguan memori, masalah tidur dan sakit kepala (Aminu et al. 2021; Quamruzzaman et al. 2021).

Penyerapan tenaga RF oleh tisu bagi setiap unit jisim dinilai menggunakan Kadar Serapan Khusus (*Specific Absorption Rate*, SAR). Had pendedahan turut ditentukan berdasarkan ketumpatan kuasa sebagai salah satu parameter dalam garis panduan keselamatan RF (Al-allaq et al. 2023). Jadual 2 merumuskan kesan biologi yang dilaporkan akibat pendedahan kepada sinaran RF berkeamatan rendah berdasarkan kajian terdahulu (Arinze et al. 2021). Sistem Global untuk Komunikasi Mudah Alih (*Global System for Mobile Communications*, GSM) dan Sistem Telekomunikasi Mudah Alih Sejagat (*Universal Mobile Telecommunications System*, UMTS) merujuk kepada teknologi rangkaian yang digunakan dalam kajian-kajian tersebut.

Pekerja teknikal atau rigger yang menjalankan tugas di menara telekomunikasi berdepan corak pendedahan pekerjaan yang berbeza daripada orang awam kerana mereka boleh berada lebih hampir dengan antena aktif semasa pemeriksaan, penyelenggaraan atau pengukuran dijalankan. Kekuatan medan RF pada menara yang dilengkapi antena selular boleh berubah mengikut tempoh dan keadaan ujian tertentu. Sebaliknya, medan RF berhampiran antena radio modulasi frekuensi (*Frequency Modulation*, FM) atau antena televisyen boleh mencapai aras yang lebih tinggi. Pendaki menara yang berada berhampiran antena aktif semasa pemancaran biasa berkemungkinan terdedah melebihi Had Pendedahan Maksimum yang Dibenarkan (*Maximum Permissible Exposure*, MPE) (Karunasena et al. 2019).

Tugasan yang memerlukan pekerja berada berhampiran antena boleh menyebabkan pendedahan terus kepada medan RF. Walaupun menara yang hanya menempatkan antena selular lazimnya menghasilkan kekuatan medan RF yang lebih rendah, pendedahan berhampiran antena FM dan televisyen boleh menjadi lebih tinggi (Tawiah & Kwarteng 2018). Garis panduan umum menyatakan bahawa ketumpatan kuasa elektromagnet bagi pendedahan manusia di menara telekomunikasi rangkaian mudah alih hendaklah kekal di bawah 0.45 mW/cm² (Elsayed Ali et al. 2020).

Perbincangan ini menunjukkan bahawa risiko RF di menara telekomunikasi bukan sahaja melibatkan pendedahan orang awam, tetapi turut merangkumi pendedahan pekerjaan kepada rigger dan pekerja teknikal yang perlu berada berhampiran antena aktif. Kaedah BM memerlukan pekerja mengakses kedudukan cerapan pada struktur menara, sekali gus memanjangkan tempoh keberadaan pekerja di kawasan kerja tinggi dan berhampiran sumber pancaran. Kaedah BD pula membolehkan peralatan pengukuran dibawa ke kedudukan cerapan tanpa memerlukan pekerja berada secara fizikal di platform menara. Penggunaan kaedah BD dengan itu dapat mengurangkan keperluan pekerja berada berhampiran antena semasa pengimbasan RF dan berpotensi mengurangkan pendedahan pekerjaan, di samping mengurangkan risiko yang berkaitan dengan kerja di tempat tinggi.

JADUAL 2. Kesan biologi yang dilaporkan berpunca daripada pendedahan kepada sinaran RF berkeamatan rendah (2021)

Ketumpatan Kuasa ($\mu W/cm^2$)	Penerangan
0.010 – 0.050	Orang dewasa berusia 18 hingga 91 tahun yang terdedah secara singkat kepada sinaran telefon mudah alih GSM melaporkan masalah neurologi dan sakit kepala.
0.005 – 0.040	Orang dewasa yang terdedah kepada sinaran telefon mudah alih jangka pendek melaporkan sakit kepala dan kesukaran menumpukan perhatian.
0.015 – 0.210	Pendedahan jangka pendek kepada sinaran GSM 900 dilaporkan menyebabkan perubahan keadaan mental dalam kalangan orang dewasa.
0.050 – 0.100	Sinaran RF dikaitkan dengan kesan neurologi yang tidak baik, risiko kanser dan gejala kardiovaskular.
0.050 – 0.100	Sinaran RF dikaitkan dengan sakit kepala, masalah tidur dan masalah perhatian.
0.070 – 0.100	Pendedahan berpanjangan kepada sinaran RF atau gelombang mikro daripada stesen pangkalan dilaporkan menyebabkan ketaknormalan sperma pada tikus dan potensi masalah kesihatan reproduktif kepada penduduk berhampiran.
0.380	Sinaran RF dilaporkan mempengaruhi metabolisme kalsium dalam sel jantung.
0.800 – 10.000	Sinaran RF pada tahap gelombang mikro lemah dilaporkan menyebabkan perubahan tingkah laku emosi.
0.130	Sinaran RF daripada menara 3G dikaitkan dengan penurunan kognisi.
0.160	Kesan terhadap ingatan, fungsi motor dan perhatian (bagi golongan kanak-kanak).
0.168 – 1.053	Selepas lima generasi pendedahan kepada sinaran RF daripada kawasan antena, tikus menunjukkan kemandulan.
0.200 – 0.800	Sinaran RF dikaitkan dengan peningkatan dua kali ganda kes leukemia dalam kalangan kanak-kanak.
0.200 – 0.800	Pendedahan kepada sinaran RF dikaitkan dengan pengurangan kadar kelangsungan hidup kanak-kanak yang menghidap leukemia.
0.210 – 1.280	Orang dewasa dan remaja melaporkan peningkatan sakit kepala selepas 45 minit pendedahan kepada sinaran telefon mudah alih UMTS.

KESELAMATAN PEKERJA TERHADAP RISIKO PERSEKITARAN

Perubahan iklim merupakan isu global yang semakin mendapat perhatian, khususnya berkaitan dengan kesannya terhadap keadaan cuaca serantau. Malaysia terletak di Asia Tenggara dan merangkumi Semenanjung Malaysia serta Malaysia Timur di Borneo, dengan keluasan daratan keseluruhan sebanyak 330,803 km² (Tang 2019). Negara ini mengalami iklim khatulistiwa yang panas dan lembap sepanjang tahun (Abubakar et al. 2022; Nasidi et al. 2021). Corak iklim tahunan Malaysia dipengaruhi oleh Monsun Barat Daya yang berlaku dari April hingga September dan Monsun Timur Laut dari Oktober hingga Mac. Monsun Timur Laut lazimnya membawa hujan lebat, khususnya ke negeri-negeri di pantai timur Semenanjung Malaysia (Ismail & Wan Zain 2022; Muhammad et al. 2018). Perubahan iklim yang berlaku secara beransur-ansur turut dikaitkan dengan peningkatan suhu dan taburan hujan yang semakin tidak menentu sepanjang dua dekad kebelakangan ini (Tauhid Ahmad et al. 2021; Tukimat et al. 2018).

Perubahan tersebut dicirikan oleh kejadian cuaca ekstrem seperti gelombang haba, hujan lebat, kemarau berpanjangan, ribut petir dan angin kencang (Ismail & Wan Zain 2022; Tang 2019). Rekod meteorologi turut menunjukkan peningkatan kekerapan kejadian cuaca ekstrem, terutama semasa musim monsun (Berita Harian 2022; MCMC 2021g, 2022c, 2024b). Perubahan taburan hujan turut mempunyai implikasi teknikal terhadap rangkaian komunikasi tanpa wayar. Analisis kadar hujan di Semenanjung Malaysia, Sabah dan Sarawak bagi tempoh 2011 hingga 2020 menunjukkan peningkatan kecil dalam taburan kadar hujan, yang boleh meningkatkan pelemahan isyarat bagi pautan 5G dan gelombang mikro berfrekuensi tinggi (Basarudin et al. 2023). Banjir besar yang berlaku dalam tempoh ini telah memberikan kesan yang ketara kepada beberapa kawasan di Semenanjung Malaysia (Ismail & Wan Zain 2022; Tukimat et al. 2018). Bilangan hari yang merekodkan hujan ekstrem juga dilaporkan meningkat sejak tahun 1980-an. Pada masa yang sama, kejadian angin kencang dan bilangan hari ribut petir tahunan turut menunjukkan peningkatan dalam rekod iklim negara (Abubakar et al. 2022; Nasidi et al. 2021; Tang 2019; Tukimat et al. 2018).

Malaysia turut terdedah kepada keadaan cuaca buruk yang boleh menghasilkan daya semula jadi yang kuat dan sukar diramal (Elhakim et al. 2022; Ferrier et al. 2021; Purvis 2022). Keadaan meteorologi sedemikian boleh menghalang atau menangguhkan aktiviti pengimbasan RF, penyelenggaraan, pemantauan dan pemeriksaan di menara

telekomunikasi (Karunakaran et al. 2018; Rahman et al. 2020; Yürüşen et al. 2020). Gangguan tersebut boleh menjejaskan kecekapan operasi infrastruktur telekomunikasi dan seterusnya menyebabkan gangguan perkhidmatan rangkaian. Secara umum, banjir dan bencana alam lain boleh merosakkan infrastruktur komunikasi serta menjejaskan perkhidmatan amaran dan penyelarasan operasi kecemasan (Raza et al. 2020). Kerosakan pada menara, kemudahan telekomunikasi dan bekalan tenaga juga boleh menyebabkan gangguan rangkaian yang meluas semasa bencana (Marshall et al. 2023). Jadual 3 menyenaraikan beberapa kejadian sebenar kerosakan menara telekomunikasi di Malaysia berdasarkan laporan pihak berkuasa dan sumber berita.

JADUAL 3. Kerosakan menara telekomunikasi akibat faktor persekitaran

Tempat	Punca
Kuala Kangsar, Perak (MCMC 2025)	Kebakaran
Kelantan (Bernama 2025)	Banjir
Tuaran, Sabah (MCMC 2024b)	Banjir
Padawan, Sarawak (Seng 2023)	Kebakaran
Serting, Negeri Sembilan (MCMC 2022a)	Kebakaran
Telupid, Sabah (MCMC 2022b)	Kebakaran
Seberang Tayor, Terengganu (MCMC 2021b)	Kebakaran
Gelong Badak, Kelantan (MCMC 2021c)	Runtuh
Ladang Sibol B, Johor (MCMC 2021d)	Kebakaran
Hutan Melintang, Perak (Abd-Hamid 2021; MCMC 2021f)	Kebakaran
Perak Tengah, Perak (MCMC 2021e)	Runtuh disebabkan hujan lebat dan angin kencang

Banjir yang kerap berlaku semasa musim monsun boleh mengganggu infrastruktur dan perkhidmatan asas di Malaysia (Rosmadi et al. 2023). Bagi Pahang, kejadian banjir monsun turut memberi kesan ketara kepada daerah seperti Temerloh, Pekan dan Kuantan (Alias et al. 2021). Jadual 4 memperincikan jumlah menara telekomunikasi yang terjejas akibat banjir di Malaysia bagi tempoh 2023 hingga 2025 berdasarkan laporan Agensi Pengurusan Bencana Negara (*National Disaster Management Agency*, NADMA) (NADMA 2024a, 2024b, 2025b, 2025c, 2025d, 2025a). Berdasarkan data tersebut, jumlah menara yang terjejas meningkat daripada 157 pada tahun 2023 kepada 484 pada tahun 2024 dan 947 pada tahun 2025. Peningkatan ini menunjukkan bahawa gangguan banjir terhadap infrastruktur telekomunikasi memerlukan perhatian yang berterusan, terutama bagi tapak yang terletak di kawasan berisiko banjir.

JADUAL 4. Bilangan menara telekomunikasi yang rosak akibat banjir mengikut negeri di Malaysia bagi tempoh 2023 hingga 2025

Tahun	Jumlah
2023	157
2024	484
2025	947

Bagi meningkatkan daya tahan infrastruktur terhadap kejadian banjir yang berulang, pembinaan menara telekomunikasi pada aras atau kedudukan yang lebih tinggi telah dicadangkan. Pendekatan ini bertujuan mengurangkan risiko peralatan ditenggelami air dan membantu mengekalkan kesinambungan operasi rangkaian di kawasan terjejas (Berita Harian 2022; Bernama 2025; The Star 2022). Walau bagaimanapun, penempatan menara dan peralatan pada kedudukan yang lebih tinggi turut meningkatkan keperluan terhadap kaedah pemeriksaan dan pengumpulan data RF yang selamat serta mudah dilaksanakan.

Selain bencana alam, vandalisme turut menjadi ancaman kepada kesinambungan perkhidmatan menara telekomunikasi. Insiden vandalisme telah dilaporkan di Kampung Rambai Sebunga, Pekan, Pahang (MCMC 2023c) dan Kampung Gasak, Chini, Pekan, Pahang (Bernama 2023; MCMC 2023b). Tapak telekomunikasi yang terjejas mengalami kerosakan, khususnya pada komponen elektronik. Peralatan yang tidak dapat dibaiki perlu diganti mengikut ketersediaan stok. Kejadian tersebut telah mengganggu perkhidmatan setempat yang dikendalikan oleh Celcom, Digi dan Maxis serta menyebabkan penurunan liputan 4G di kawasan berkenaan (Bernama 2023). Keadaan ini menunjukkan bahawa kerosakan fizikal di tapak boleh menjejaskan penyampaian perkhidmatan dan memerlukan penilaian teknikal yang segera.

Risiko persekitaran turut memberi kesan secara langsung kepada pekerja yang menjalankan tugas di menara telekomunikasi. Pada 26 Julai 2023, seorang pekerja disengat sekumpulan tebuan ketika berada di menara telekomunikasi setinggi 30 meter di Kulim, Kedah, dan dilaporkan meninggal dunia pada hari berikutnya (Xiang 2023). Pada 14 April 2025, seorang pekerja dilaporkan meninggal dunia semasa menjalankan tugas di menara telekomunikasi selepas mengalami keletihan dan kebas pada tangan serta tidak berupaya untuk turun. Jabatan Forensik Hospital Tampin mengesahkan kejadian tersebut sebagai kematian mengejut (Hasbi 2025). Kejadian yang hampir serupa dilaporkan pada 15 Julai 2025 di Lampang, Thailand, apabila seorang pekerja meninggal dunia akibat

strok haba ketika berada di menara telekomunikasi setinggi 30 meter (Albert 2025). Walaupun kejadian tersebut melibatkan keadaan dan punca yang berbeza, kesemuanya menunjukkan bahawa pekerja di menara terdedah kepada perubahan cuaca, haba, hidupan liar dan keletihan semasa berada pada struktur tinggi. Kejadian tersebut digunakan sebagai contoh keadaan sebenar di lapangan yang menunjukkan kepelbagaian bahaya persekitaran semasa pekerja berada di menara telekomunikasi. Walau bagaimanapun, penilaian risiko keseluruhan kajian ini tidak hanya bergantung pada laporan insiden tersebut, tetapi turut disokong oleh kajian berkaitan keselamatan kerja, cuaca ekstrem dan pengurusan risiko pekerjaan.

Keseluruhannya, risiko persekitaran boleh menjejaskan struktur menara, peralatan telekomunikasi, kebolehcapaian tapak, keselamatan pekerja dan kesinambungan perkhidmatan rangkaian. Kaedah BM memerlukan pekerja memasuki tapak dan mengakses kedudukan tinggi secara fizikal, menyebabkan pelaksanaannya lebih dipengaruhi oleh keadaan struktur, cuaca dan keselamatan kawasan kerja. Kaedah BD pula dapat mengurangkan keperluan pendakian fizikal dan membolehkan peralatan pengukuran dibawa ke kedudukan cerapan dari lokasi kawalan yang lebih selamat. Walau bagaimanapun, penerbangan dron tetap tertakluk kepada keadaan angin, hujan, jarak penglihatan dan keperluan keselamatan penerbangan. Oleh itu, pemilihan kaedah pengimbasan RF perlu mempertimbangkan keadaan tapak dan risiko persekitaran supaya pengumpulan data dapat dilaksanakan dengan selamat dan berkesan.

TINDAK BALAS KECEMASAN RANGKAIAN KOMUNIKASI TERHADAP IMPAK PERSEKITARAN DAN KEADAAN YANG MENCABAR

Rangkaian komunikasi merupakan komponen penting dalam pengurusan kecemasan kerana membolehkan maklumat disampaikan dengan segera antara agensi, petugas lapangan dan komuniti yang terjejas semasa bencana (Carreras-Coch et al. 2022). Di Malaysia, kemudahan komunikasi seperti Rangkaian Radio Bersepadu Kerajaan (*Government Integrated Radio Network*, GIRN) dan rangkaian radio Polis Diraja Malaysia telah digunakan untuk menyokong komunikasi antara agensi semasa operasi kecemasan (Azmi & How 2025). Walau bagaimanapun, petugas bencana masih berdepan cabaran berkaitan penggunaan teknologi, penyelarasan komunikasi dan perkongsian maklumat antara agensi (Azmi & How 2025). Kajian berkaitan tindak balas bencana bandar di Kuala Lumpur turut mengenal pasti bahawa perkongsian maklumat antara agensi merupakan cabaran penting dalam penyelarasan bantuan kemanusiaan dan logistik kecemasan (Mohammed Zain et al. 2023).

Bencana alam dan kejadian buatan manusia boleh merosakkan kemudahan telekomunikasi darat, termasuk menara, stesen pangkalan, talian penghubung dan sistem bekalan kuasa. Kerosakan tersebut boleh mengurangkan liputan rangkaian atau menyebabkan perkhidmatan komunikasi terputus ketika maklumat amat diperlukan oleh pasukan penyelamat dan masyarakat. Pemulihan komunikasi pascabencana dengan itu memerlukan penilaian segera terhadap keadaan infrastruktur sedia ada serta penggunaan penyelesaian rangkaian alternatif sekiranya rangkaian darat tidak dapat beroperasi seperti biasa (Matracia et al. 2022).

Rangkaian komunikasi kecemasan boleh melibatkan gabungan kemudahan darat, satelit, sistem mudah alih dan platform udara bagi menyediakan liputan sementara di kawasan yang terjejas. Pemilihan teknologi bergantung pada keluasan kawasan bencana, tahap kerosakan infrastruktur, keperluan kapasiti, bekalan tenaga dan tempoh pemulihan yang diperlukan (Wang et al. 2023). Bagi operasi berskala setempat, rangkaian ad hoc mudah alih juga boleh digunakan untuk menyediakan saluran komunikasi sementara tanpa bergantung sepenuhnya pada infrastruktur telekomunikasi sedia ada. Yen et al. (2022), sebagai contoh, membangunkan rangkaian ad hoc jangka pendek berasaskan teknologi Jarak Jauh (*Long Range*, LoRa) bagi menyokong penghantaran maklumat semasa operasi bantuan bencana.

Selain menyediakan rangkaian sementara, penilaian terhadap perkhidmatan RF sedia ada penting untuk mengenal pasti jalur frekuensi yang masih beroperasi serta menilai perubahan tahap isyarat dan kemungkinan gangguan. Pemantauan spektrum membolehkan gangguan RF dinilai berdasarkan perubahan frekuensi, masa dan kedudukan pengukuran (Pahlavan 2022). Pengukuran RF berasaskan dron pula boleh merekodkan kekuatan isyarat sebagai fungsi frekuensi dan masa serta membantu mengenal pasti sumber gangguan atau kemerosotan isyarat (Kandregula et al. 2024). Oleh itu, pengimbasan RF pada kedudukan cerapan tertentu dapat menyediakan data frekuensi dan RSL untuk menyokong penilaian teknikal terhadap keadaan rangkaian selepas berlakunya gangguan atau kerosakan di tapak. Pahlavan (2022) secara khusus membincangkan kepentingan pemantauan gangguan RF, manakala Kandregula et al. (2024) menerangkan pengukuran kekuatan isyarat serta pengenalpastian gangguan menggunakan platform dron.

Kaedah BM memerlukan pekerja mengakses struktur menara secara fizikal bagi menempatkan dan mengendalikan peralatan pengukuran pada kedudukan cerapan. Pelaksanaannya memerlukan penggunaan KPD yang bersesuaian (Aprilia & Ramadhan 2021) serta penilaian

bahaya dan pematuhan terhadap prosedur kerja selamat sebelum pendakian dilakukan (Zermane et al. 2022). Keperluan akses fizikal dan pendakian boleh memanjangkan tempoh pemerolehan data apabila kebolehcapaian tapak terjejas, keadaan struktur belum disahkan selamat atau kawasan kerja masih berbahaya selepas kejadian persekitaran.

Kaedah BD pula membolehkan peralatan pengukuran dibawa ke kedudukan cerapan tanpa memerlukan pekerja memanjat menara. Dron yang dilengkapi peralatan RF boleh menjalankan pengukuran kekuatan isyarat mengikut frekuensi, masa dan trajektori penerbangan yang ditetapkan (Kandregula et al. 2024). Secara lebih khusus, Pomarnacki et al. (2025) menggunakan dron yang dilengkapi penganalisis spektrum untuk menjalankan pengukuran sinaran elektromagnet berhampiran stesen pangkalan telekomunikasi. Dapatan tersebut menunjukkan kesesuaian dron sebagai platform pembawa instrumen bagi pengukuran teknikal berhampiran struktur telekomunikasi. Walau bagaimanapun, kaedah BD dalam kajian ini tidak berfungsi sebagai stesen pangkalan kecemasan atau menggantikan rangkaian komunikasi yang rosak. Sebaliknya, kaedah BD digunakan untuk membawa peralatan pengimbasan RF ke kedudukan cerapan yang ditetapkan bagi menyokong penilaian teknikal dengan lebih cekap. Kandregula et al. (2024) menunjukkan bahawa dron boleh digunakan untuk pengukuran antena dan perambatan, manakala Pomarnacki et al. (2025) melaksanakan pengukuran elektromagnet secara langsung pada infrastruktur telekomunikasi.

Keseluruhannya, keberkesanan tindak balas kecemasan tidak hanya bergantung pada keupayaan menyediakan semula perkhidmatan komunikasi, tetapi turut memerlukan penilaian teknikal yang cepat terhadap keadaan isyarat dan infrastruktur di tapak. Kaedah pengimbasan yang memerlukan pendakian fizikal boleh dipengaruhi oleh keadaan struktur, kebolehcapaian dan risiko persekitaran. Oleh itu, perbandingan empirikal antara kaedah BM dengan BD diperlukan bagi menentukan keupayaan kedua-dua kaedah dari aspek masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL dalam keadaan lapangan sebenar.

DRON

Kemajuan dalam teknologi maklumat, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*, AI), Internet Pelbagai Benda (*Internet of Things*, IoT) dan sistem kawalan penerbangan telah menyokong pembangunan dron yang lebih ekonomik, boleh dipercayai dan cekap untuk pelbagai kerja teknikal (Isa et al. 2019; Moud et al. 2018). Dron semakin digunakan dalam pemeriksaan dan pemantauan infrastruktur kerana mampu meningkatkan kebolehcapaian (Anwar et al. 2018), mengurangkan keperluan pekerja memasuki kawasan berisiko, mempercepat pemerolehan data dan menyokong pemantauan masa nyata (Peksa & Mamchur 2024; Sajid et al. 2025). Penggunaan dron juga telah dilaporkan dalam bidang pembinaan, kawasan struktur dan kerja kejuruteraan yang melibatkan lokasi sukar dicapai, termasuk melalui aplikasi pemantauan tapak, pengukuran visual, pemerolehan data spatial dan sokongan kepada kerja pemeriksaan teknikal (Ham et al. 2016; Isa et al. 2019; Romeli et al. 2023).

Bagi menara telekomunikasi, kaedah BD semakin relevan kerana struktur menara lazimnya memerlukan akses fizikal ke tempat tinggi untuk pemeriksaan, penyelenggaraan, pelarasan antena dan pengumpulan data RF. Kajian terkini oleh Pomarnacki et al. (2025) menunjukkan bahawa UAV boleh digunakan untuk pemantauan menara telekomunikasi dari perspektif kejuruteraan, termasuk pengukuran berhampiran infrastruktur telekomunikasi. Perkembangan ini menunjukkan bahawa penggunaan dron tidak lagi terhad kepada pemeriksaan visual semata-mata, malah turut berpotensi menyokong pengukuran teknikal yang memerlukan kedudukan cerapan berhampiran struktur tinggi. Bagi pengimbasan RF, potensi ini penting kerana peralatan pengukuran boleh dibawa ke kedudukan cerapan tanpa memerlukan pekerja memanjat atau berada terlalu lama di platform menara.

Walau bagaimanapun, pelaksanaan dron dalam operasi teknikal masih dipengaruhi oleh beberapa kekangan. Kajian terkini menunjukkan bahawa penggunaan dron dalam kerja kejuruteraan dan pembinaan masih berdepan cabaran dari aspek teknikal, keselamatan, kawal selia, kos, kemahiran operator, kestabilan penerbangan, had bateri, had muatan dan kesesuaian tapak (Daoud et al. 2025; Donnis & Rahmat 2025; Singh et al. 2025; Sivaraman et al. 2025). Di Malaysia, penggunaan dron juga masih berkembang secara berperingkat dalam beberapa sektor (Abd Halin & Abd Manan 2025; Abd Halin & Mohd Shahrudin Abd Manan 2024; Chamata 2016) seperti pertanian (Mutalib et al. 2016; Rahim et al. 2018; Shamshiri et al. 2018), pemetaan (Yazid et al. 2019), pembahagian kawasan (Norzailawati et al. 2016), penghantaran makanan (Sulaiman et al. 2024), sokongan perubatan (Zailani et al. 2021), pembinaan (Donnis & Rahmat 2025), dan rantaian bekalan (Wahab et al. 2024). Oleh itu, walaupun kaedah BD mempunyai potensi yang kuat untuk pengimbasan RF di menara telekomunikasi, keberkesanannya masih perlu dinilai melalui data lapangan yang membandingkan masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL secara empirik.

Secara keseluruhannya, literatur terkini menunjukkan bahawa dron dapat mengurangkan kebergantungan kepada pendakian fizikal, meningkatkan kebolehcapaian tapak dan mempercepat pemerolehan data di kawasan struktur tinggi.

Namun, jurang utama bagi pengimbasan RF ialah kekurangan perbandingan prestasi sebenar antara kaedah BM dan BD di tapak menara telekomunikasi, khususnya dari aspek masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL. Oleh itu, kajian empirikal diperlukan bagi menilai sama ada kaedah BD memberikan kelebihan operasi berbanding kaedah BM dalam keadaan lapangan sebenar.

SINTESIS SOROTAN KEPUSTAKAAN DAN HIPOTESIS KAJIAN

Kajian literasi menunjukkan bahawa pengimbasan RF di menara telekomunikasi melibatkan isu teknikal dan operasi yang saling berkaitan. Pelaksanaan kaedah BM memerlukan pekerja mengakses struktur tinggi secara fizikal, sekali gus mendedahkan mereka kepada risiko jatuh, bahaya persekitaran dan keperluan pengurusan keselamatan yang ketat (Sing et al. 2025; Zermane et al. 2022). Pekerja teknikal juga boleh berada berhampiran antena aktif semasa pemeriksaan dan pengukuran dijalankan, menyebabkan penilaian terhadap pendedahan pekerjaan RF perlu mengambil kira jarak, frekuensi, kuasa pancaran dan keadaan tapak (Al-allaq et al. 2023; Famoriji & Shongwe 2025).

Kaedah BD pula berpotensi membawa peralatan pengukuran ke kedudukan cerapan tanpa memerlukan pekerja memanjat menara. Kajian terdahulu menunjukkan bahawa dron boleh digunakan sebagai platform pembawa instrumen untuk pengukuran isyarat dan pemantauan elektromagnet berhampiran infrastruktur telekomunikasi (Kandregula et al. 2024; Pomarnacki et al. 2025). Walau bagaimanapun, keberkesanan kaedah BD masih dipengaruhi oleh kestabilan penerbangan, had muatan, tempoh bateri, keadaan cuaca dan kesesuaian tapak (Daoud et al. 2025; Singh et al. 2025).

Berdasarkan sintesis tersebut, kajian ini menilai prestasi kaedah BM dan BD menggunakan tiga indikator utama, iaitu masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL. Bagi analisis statistik RSL, hipotesis kajian dirumuskan seperti berikut: H_0: Tiada perbezaan yang signifikan bagi min RSL antara kaedah BM dan BD. H_1: Terdapat perbezaan yang signifikan bagi min RSL antara kaedah BM dan BD.

Hipotesis ini diuji melalui ANOVA dan disokong oleh ujian Perbezaan Signifikan Terkecil Fisher (*Fisher's Least Significant Difference*, FLSD) bagi menentukan perbezaan prestasi RSL antara kedua-dua kaedah tersebut.

KAEDAH KAJIAN

REKA BENTUK KAJIAN DAN PEMILIHAN TAPAK

Kajian ini menggunakan reka bentuk perbandingan lapangan bagi menilai prestasi kaedah BM dan BD dalam pelaksanaan pengimbasan RF di menara telekomunikasi. Kedua-dua kaedah dilaksanakan di tapak yang sama supaya perbandingan masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL dibuat berdasarkan keadaan infrastruktur serta persekitaran tapak yang setara. Jalur frekuensi turut dikekalkan sebagai faktor kajian bagi membolehkan kesan kaedah pengimbasan dan jalur frekuensi terhadap RSL dinilai menggunakan ANOVA.

Sebanyak 10 tapak menara telekomunikasi dipilih berdasarkan kriteria operasi kajian. Pemilihan tapak bukan bertujuan mewakili keseluruhan populasi menara telekomunikasi di Malaysia secara statistik, tetapi untuk menyediakan replikasi lapangan pada tapak sebenar yang membolehkan kedua-dua kaedah dilaksanakan secara berpasangan. Tapak yang dipilih perlu mempunyai pautan aktif pada jalur 13 GHz dan 18 GHz, memperoleh kebenaran akses dan operasi, menyediakan kedudukan cerapan yang boleh dicapai menggunakan kaedah BM dan BD serta memenuhi keperluan keselamatan bagi pendakian dan penerbangan dron.

Pemilihan 10 tapak menara telekomunikasi membolehkan pemerhatian lapangan diperoleh daripada beberapa tapak sebenar serta menyediakan replikasi lapangan bagi perbandingan berpasangan antara kaedah BM dengan BD. Bilangan tapak tersebut ditentukan dengan mengambil kira kebolehcapaian tapak, kebenaran menjalankan operasi, keupayaan mengekalkan keseragaman prosedur pengukuran, tempoh pelaksanaan dan sumber kajian yang tersedia. Pelaksanaan kedua-dua kaedah pada tapak yang sama turut membantu mengurangkan pengaruh variasi antara tapak terhadap perbandingan prestasi. Pendekatan ini selaras dengan prinsip reka bentuk eksperimen yang menekankan perancangan pengumpulan data secara sistematik, kawalan faktor yang berkaitan dan penggunaan replikasi bagi membolehkan perbezaan antara kaedah dianalisis secara statistik (Montgomery 2020). Oleh itu, 10 tapak dianggap memadai bagi mencapai objektif kajian kes ini, iaitu membandingkan prestasi kaedah BM dengan BD melalui replikasi lapangan pada tapak yang sama, dan bukan untuk membuat anggaran statistik terhadap keseluruhan populasi menara telekomunikasi di Malaysia.

PEMILIHAN JALUR FREKUENSI

Jalur 13 GHz dan 18 GHz dipilih kerana kedua-duanya merupakan jalur pautan gelombang mikro yang aktif dan dapat dikenal pasti secara konsisten di tapak kajian. Penggunaan jalur yang sama pada semua tapak membolehkan perbandingan kaedah BM dengan BD dibuat tanpa mencampurkan jalur yang berbeza antara menara. Pemilihan dua jalur ini juga membolehkan pengaruh jalur frekuensi terhadap RSL dimasukkan sebagai faktor dalam ANOVA.

Dalam kajian ini, pengimbasan RF ditumpukan pada jalur 13 GHz dan 18 GHz. Jalur 13 GHz merangkumi julat frekuensi 12.75 hingga 13.25 GHz dan digunakan bagi sistem tanpa wayar tetap, seperti yang dihuraikan dalam Syor Sektor Radiokomunikasi Kesatuan Telekomunikasi Antarabangsa (*International Telecommunication Union-Radiocommunication*, ITU-R) F.497-7 (ITU-R 2007). Jalur 18 GHz pula merangkumi julat frekuensi 17.7 hingga 19.7 GHz dan digunakan bagi sistem tanpa wayar tetap berkapasiti rendah, sederhana, dan tinggi, termasuk aplikasi yang menyokong infrastruktur mudah alih (ITU-R 2022). Oleh itu, kedua-dua jalur tersebut berkaitan dengan pautan gelombang mikro titik ke titik yang digunakan dalam rangkaian telekomunikasi.

Pemilihan jalur 13 GHz dan 18 GHz juga membolehkan prestasi pengimbasan dinilai pada frekuensi yang dipengaruhi oleh keadaan perambatan pautan garis pandangan langsung. Bagi sistem daratan sedemikian, prestasi pautan boleh dipengaruhi oleh hujan, jarak laluan, halangan fizikal, kedudukan antena, dan keadaan persekitaran. Pelemahan khusus akibat hujan bergantung pada frekuensi, kadar hujan, dan polarisasi isyarat, sebagaimana dihuraikan dalam Syor ITU-R P.530-19 dan ITU-R P.838-3 (ITU-R 2025). Oleh itu, kedua-dua jalur mempunyai kepentingan operasi bagi pautan komunikasi gelombang mikro dan sesuai digunakan untuk membandingkan prestasi pengimbasan pada menara yang dikaji.

KAEDAH PENGIMBASAN RADIO FREKUENSI

Penganalisis spektrum SAF Tehnika ditetapkan pada aras rujukan –30 dBm sepanjang pelaksanaan pengimbasan RF. Tetapan yang sama digunakan bagi kaedah BM dan BD bagi memastikan paparan spektrum, pengesanan puncak isyarat dan perekodan bacaan RF dilaksanakan menggunakan konfigurasi instrumen yang setara. Penggunaan aras rujukan yang seragam juga mengurangkan kemungkinan perbezaan bacaan berpunca daripada perubahan tetapan penganalisis spektrum. Hubungan antara aras rujukan instrumen dengan nilai RSL yang direkodkan dihuraikan dalam bahagian keputusan dan perbincangan.

Titik cerapan ditentukan terlebih dahulu oleh jurutera RF berdasarkan kedudukan antena, ketinggian pengukuran, keperluan garis pandangan terus dan keperluan teknikal pengukuran. Titik cerapan yang telah ditetapkan digunakan secara konsisten bagi kaedah BM dan BD supaya bacaan kedua-dua kaedah mewakili keadaan isyarat pada kedudukan pengukuran yang sama atau setara. Penetapan tersebut turut memastikan perbandingan RSL tidak dipengaruhi secara ketara oleh perbezaan kedudukan cerapan.

Bagi BD, laluan penerbangan dirancang sebelum pengumpulan data dilaksanakan. Laluan yang sama digunakan bagi setiap pengulangan pada tapak yang sama. Walau bagaimanapun, laluan penerbangan boleh berbeza antara tapak bergantung pada bentuk struktur menara, kedudukan antena, halangan fizikal dan keluasan ruang operasi. Penyeragaman laluan pada setiap tapak bertujuan mengurangkan variasi antara pengulangan kaedah BD yang boleh berpunca daripada perubahan trajektori penerbangan. Pendekatan ini selaras dengan prinsip reka bentuk eksperimen (*Design of Experiment*, DoE) yang menekankan pengawalan faktor luar dan pelaksanaan replikasi bagi menganggarkan variasi rawak (Montgomery 2020).

Ketinggian penerbangan kaedah BD dinilai melalui ujian rintis sebelum pengumpulan data sebenar dilaksanakan. Ujian tersebut bertujuan mengesahkan bahawa dron dapat mencapai titik cerapan yang ditetapkan, mengekalkan kedudukan melayang yang stabil, memenuhi keperluan garis pandangan terus dan beroperasi pada jarak yang selamat daripada struktur menara. Ketinggian cerapan yang telah disahkan kemudiannya digunakan secara konsisten bagi setiap pengulangan di tapak berkenaan.

Bagi BM, pekerja membawa dan mengendalikan penganalisis spektrum SAF Tehnika pada titik cerapan yang telah ditetapkan di struktur menara. Bagi BD, penganalisis spektrum yang sama dipasang pada dron dan dibawa ke titik serta ketinggian cerapan yang sepadan. Kedua-dua kaedah menggunakan jalur frekuensi, aras rujukan dan konfigurasi pengimbasan yang sama. Masa operasi direkodkan berdasarkan takrif titik mula dan titik tamat yang telah ditetapkan, manakala bilangan bacaan RF dan RSL diperoleh daripada data spektrum yang direkodkan oleh instrumen.

Pengukuran pada setiap titik cerapan diulang sebanyak tiga kali bagi setiap kaedah. Pengulangan tersebut digunakan untuk menilai kestabilan bacaan dan mengurangkan pengaruh variasi rawak terhadap hasil pengukuran. Semua pengukuran dilaksanakan mengikut prosedur yang telah ditetapkan dengan penyelarasan teknikal oleh jurutera RF. Pelaksanaan pengukuran sebanyak tiga kali ini selaras dengan prinsip replikasi dalam reka bentuk eksperimen yang membolehkan variasi rawak antara pengulangan dinilai (Montgomery 2020).

Penyeragaman jalur frekuensi, instrumen, aras rujukan, konfigurasi pengimbasan, titik cerapan dan bilangan pengulangan membolehkan perbandingan antara kaedah BM dengan BD dilaksanakan secara lebih terkawal. Pelaksanaan kedua-dua kaedah pada tapak dan titik cerapan yang sama atau setara turut membantu mengurangkan pengaruh variasi antara tapak. Oleh itu, perbezaan masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL dapat ditafsir dengan memberikan tumpuan kepada perbezaan kaedah pengimbasan yang digunakan.

ANALISIS DATA

Data kajian kes dianalisis secara kuantitatif berdasarkan tiga pemboleh ubah respons, iaitu masa operasi, bilangan bacaan RF dan RSL. Sebelum analisis dijalankan, data diperiksa bagi mengenal pasti kesilapan perekodan, nilai tidak lengkap dan ketidakseragaman unit. Data kemudiannya disusun mengikut tapak menara telekomunikasi, kaedah pengimbasan, jalur frekuensi, titik cerapan dan pengulangan pengukuran.

Statistik deskriptif digunakan untuk merumuskan bilangan pemerhatian, nilai min dan ukuran serakan yang berkaitan. Masa operasi dan bilangan bacaan RF dibandingkan secara deskriptif antara kaedah BM dengan BD. Data RSL pula dianalisis berdasarkan kaedah pengimbasan dan jalur frekuensi 13 GHz serta 18 GHz.

ANOVA dua faktor digunakan untuk menilai kesan kaedah pengimbasan dan jalur frekuensi terhadap RSL. Aras keertian ditetapkan pada $\alpha = 0.05$. Hipotesis nol ditolak apabila Nilai-p kurang daripada 0.05, manakala Nilai-p yang sama dengan atau melebihi 0.05 menunjukkan bahawa bukti statistik tidak mencukupi untuk menolak H_0.

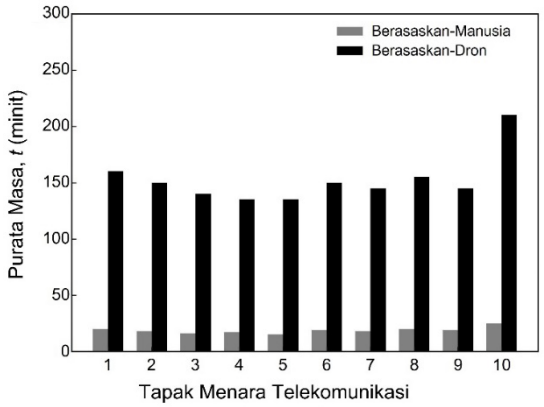
Kesesuaian model ANOVA dinilai melalui plot kebarangkalian normal sisa, histogram sisa, plot sisa berbanding nilai terpadan dan plot sisa mengikut turutan pemerhatian. Pemeriksaan ini digunakan untuk menilai normaliti sisa, keseragaman varians dan kebebasan pemerhatian (Montgomery 2020). Sekiranya ANOVA menunjukkan kesan yang signifikan, FLSD digunakan untuk membandingkan min kumpulan secara berpasangan dan mengenal pasti kumpulan yang menyumbang kepada perbezaan tersebut (Montgomery 2020).

Semua analisis dilaksanakan menggunakan perisian Minitab Statistical Software versi 22.5.1. Perisian tersebut digunakan untuk menghasilkan statistik deskriptif, jadual ANOVA, Nilai-F, Nilai-p, plot diagnostik sisa dan keputusan FLSD. Penggunaan prosedur analisis yang sama bagi keseluruhan data memastikan perbandingan antara kaedah BM dengan BD dilaksanakan secara tersusun dan konsisten.

PERBINCANGAN DAN ANALISA

PERBANDINGAN MASA OPERASI PENGIMBASAN FREKUENSI RADIO DI MENARA TELEKOMUNIKASI

Rajah 1 menunjukkan purata masa pengimbasan RF yang direkodkan di 10 tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BM dan BD. Kaedah BD merekodkan purata masa operasi selama 16.4 minit bagi setiap tapak, manakala kaedah BM memerlukan purata 132.1 minit. Perbezaan purata sebanyak 115.7 minit ini bersamaan dengan pengurangan masa operasi kira-kira 87.6%, dengan nisbah masa kaedah BD kepada kaedah BM sebanyak kira-kira 1:8.1. Oleh itu, kaedah BD hanya menggunakan kira-kira 12.4% daripada masa yang diperlukan oleh kaedah BM untuk menyelesaikan pengimbasan RF di satu tapak menara telekomunikasi.



RAJAH 1. Perbandingan purata masa operasi pengimbasan RF di 10 tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BM dan BD

Jurang masa tersebut berpunca terutama daripada perbezaan proses kerja kedua-dua kaedah. Kaedah BM memerlukan pekerja mengakses struktur menara, membawa dan menyusun peralatan pada kedudukan cerapan, mematuhi prosedur keselamatan kerja di tempat tinggi serta melakukan pergerakan naik dan turun menara. Sebaliknya, kaedah BD membawa peralatan pengukuran terus ke titik cerapan melalui laluan penerbangan yang telah dirancang, sekali gus memendekkan tempoh capaian dan persediaan pengimbasan.

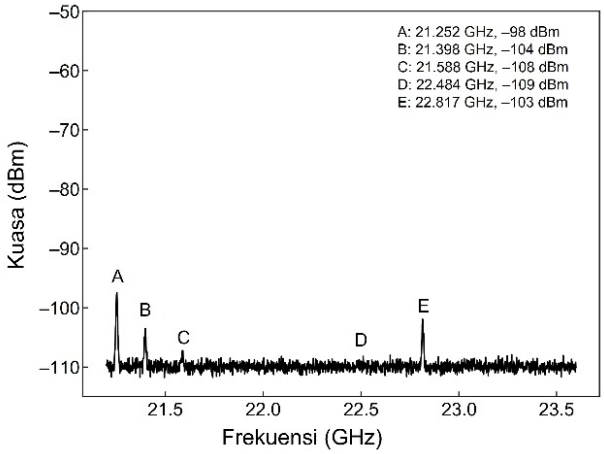
Selain perbezaan proses kerja, nilai masa operasi mutlak di setiap tapak turut dipengaruhi oleh kebolehcapaian tapak, jarak pergerakan dari kawasan persediaan ke menara, bentuk struktur menara, kedudukan antena, halangan fizikal dan keadaan cuaca semasa operasi. Faktor-faktor tersebut boleh menerangkan sebahagian variasi masa antara tapak.

Walau bagaimanapun, pelaksanaan kaedah BM dan BD pada tapak yang sama menggunakan prosedur pengukuran yang diseragamkan membantu mengurangkan pengaruh variasi tapak terhadap perbandingan kedua-dua kaedah. Corak masa yang lebih rendah bagi kaedah BD merentasi tapak kajian menunjukkan bahawa kelebihan masa tersebut berkait secara konsisten dengan kaedah pelaksanaan pengimbasan.

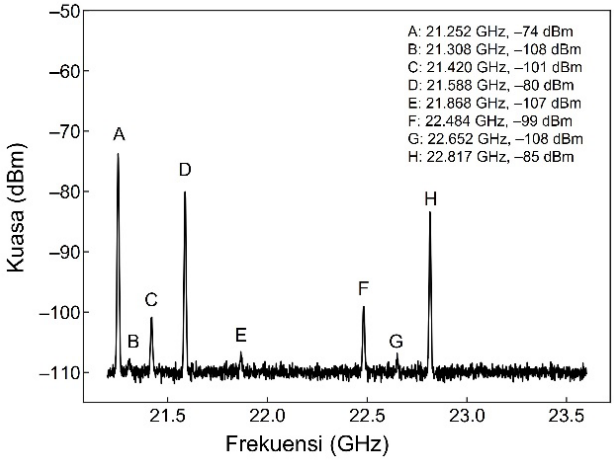
Dapatan ini selaras dengan Isa et al. (2019), yang menerangkan kelebihan dron dari aspek kebolehcapaian dan kecekapan operasi bagi kerja pemeriksaan di lokasi yang sukar dicapai. Pomarnacki et al. (2025) pula membuktikan kebolehlaksanaan penggunaan dron yang dilengkapi penganalisis spektrum dan laluan penerbangan terancang untuk menjalankan pengukuran elektromagnet berhampiran stesen pangkalan telekomunikasi tanpa pendakian menara. Walaupun kedua-dua kajian tersebut tidak melaporkan ukuran masa operasi yang sama untuk membolehkan perbandingan angka secara langsung, dapatan kajian ini memperluas kajian terdahulu dengan menunjukkan pengurangan masa operasi sebanyak 87.6% melalui pengukuran lapangan di 10 tapak.

PERBANDINGAN BILANGAN BACAAN RF

Rajah 2 dan Rajah 3 menunjukkan bacaan RF dan kuasa isyarat yang dikumpulkan di sebuah tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BM dan BD, masing-masing. Kaedah BD merekodkan bilangan bacaan RF yang lebih tinggi di lapan daripada 10 tapak. Bilangan bacaan yang sama diperoleh di Tapak 3 dan Tapak 10, manakala tiada tapak merekodkan bilangan bacaan kaedah BM yang lebih tinggi daripada kaedah BD. Sebagai contoh, bilangan bacaan meningkat daripada lima kepada lapan di Tapak 1, daripada dua kepada empat di Tapak 2 dan daripada satu kepada tiga di Tapak 4 apabila kaedah BD digunakan. Frekuensi yang diukur berada dalam julat 21 GHz hingga 23 GHz, dengan aras kuasa yang sepadan antara −98 dBm hingga −103 dBm.



RAJAH 2. Paparan spektrum RF dan RSL di 10 tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BM



RAJAH 3. Paparan spektrum RF dan RSL di 10 tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BD

Bilangan bacaan yang lebih tinggi bagi kaedah BD berkait dengan keupayaan dron membawa penganalisis spektrum melalui kedudukan, ketinggian dan sudut cerapan yang lebih luas di sekitar struktur menara. Pergerakan tersebut membolehkan instrumen melalui kawasan liputan lobus antena dan keadaan garis pandangan terus yang berbeza. Pomarnacki et al. (2025) turut menunjukkan bahawa dron yang dilengkapi alat pengukuran boleh mengikuti laluan penerbangan terancang di sekitar stesen pangkalan bagi mengumpulkan data pada kedudukan dan ketinggian yang berbeza. Mohd Shaid dan Che Seman (2025) pula melaporkan bahawa pengukuran berasaskan dron dapat mengatasi keterbatasan pengukuran pada aras darat yang mempunyai capaian ketinggian dan lokasi yang terhad.

Data berangka dalam Jadual 5 digunakan bagi membandingkan bilangan bacaan RF dan RSL untuk kedua-dua kaedah BM dan BD. Hasil menunjukkan bahawa bilangan bacaan RF dan nilai RSL berbeza mengikut tapak serta kaedah BM dan BD yang digunakan. Walaupun kaedah BD merekodkan lebih banyak bacaan RF, bilangan bacaan yang tinggi tidak secara langsung menunjukkan ketepatan yang lebih tinggi. Di Tapak 3 dan Tapak 10, kedua-dua kaedah menghasilkan bilangan bacaan yang sama tetapi merekodkan set frekuensi atau corak RSL yang berbeza. Oleh itu, bilangan bacaan menerangkan keupayaan pengesanan isyarat, manakala prestasi pengukuran perlu ditafsir bersama-sama dengan nilai RSL dan keputusan analisis statistik.

Perbezaan antara tapak menunjukkan bahawa hasil pengimbasan bukan sahaja dipengaruhi oleh kaedah pengukuran, tetapi juga berkemungkinan dipengaruhi oleh kedudukan alat pengukuran, ketinggian, orientasi antena, halangan fizikal, geometri tapak, dan ciri perambatan isyarat. Oleh itu, bilangan bacaan dan RSL perlu dianalisis secara berasingan sebelum kesan keseluruhan kaedah BD dapat ditentukan. Bagi kaedah BM, pengukuran RF dilaksanakan dengan menempatkan peralatan pengukuran pada kedudukan cerapan yang sesuai di platform menara. Keadaan ini membolehkan bacaan RF diperoleh pada kedudukan yang telah ditetapkan, namun pada masa yang sama melibatkan keperluan membawa dan menyusun peralatan di kawasan kerja tempat tinggi.

PERBANDINGAN DAN KEERTIAN PRAKTIKAL RSL

Jadual 6 dan Jadual 7 menunjukkan keputusan perbandingan ANOVA bagi kaedah BM dan BD mengikut jalur frekuensi masing-masing. ANOVA menunjukkan bahawa faktor kaedah memberikan kesan yang signifikan terhadap RSL dengan Nilai-F sebanyak 4.22 dan Nilai-p sebanyak 0.042. FLSD seterusnya menunjukkan bahawa min RSL bagi kaedah BD ialah –97.139 dBm, manakala min RSL bagi kaedah BM ialah –100.996 dBm. Oleh sebab nilai kaedah BD kurang negatif, kaedah BD merekodkan aras kuasa isyarat diterima yang lebih tinggi. Perbezaan antara kedua-dua min tersebut ialah 3.857 dB..

JADUAL 5. Bilangan bacaan RF (n), nilai frekuensi yang dikesan (f), dan RSL di 10 tapak menara telekomunikasi menggunakan kaedah BM dan BD

Tapak	BM			BD		
	n	f (GHz)	RSL (dBm)	n	f (GHz)	RSL (dBm)
1	5	21.252	–98	8	21.252	–74
		21.588	–104		21.308	–108
		21.868	–108		21.420	–101
		22.484	–109		21.588	–80
		22.817	–103		21.868	–107
					22.484	–99
					22.652	–108
					22.817	–85
2	2	21.252	–95	4	21.252	–79
		22.484	–107		21.588	–106
					22.484	–74
					22.820	–102
3	6	21.252	–105	6	21.252	–83
		21.420	–106		21.420	–78
		21.588	–106		21.588	–97
		21.868	–91		21.868	–103
		22.652	–102		22.484	–107
		22.820	–104		22.652	–95
4	1	22.649	–108	3	21.366	–110
					22.594	–109
					22.661	–108

bersambung...

...sambungan

Tapak	BM			BD		
	n	*f* (GHz)	RSL (dBm)	*n*	*f* (GHz)	RSL (dBm)
5	2	21.588	–97	3	21.252	–108
		22.820	–108		21.588	–75
					22.820	–83
6	4	18.195	–86	5	18.195	–90
		18.635	–100		18.635	–97
		19.260	–108		18.820	–107
		19.654	–105		19.205	–83
					19.645	–78
7	3	18.085	–85	4	18.085	–88
		19.095	–99		18.305	–76
		19.315	–107		19.095	–75
					19.315	–100
8	11	17.810	–100	14	18.058	–102
		18.058	–104		18.140	–95
		18.113	–98		18.223	–95
		18.223	–103		18.333	–103
		18.333	–99		18.415	–94
		18.498	–97		18.498	–102
		18.580	–94		18.580	–100
		19.068	–104		19.068	–95
		19.150	–93		19.150	–110
		19.425	–107		19.515	–108
		19.590	–95		19.315	–108
					19.425	–102
					19.480	–111
					19.563	–108
9	6	17.783	–94	11	17.783	–103
		17.865	–113		17.893	–100
		18.113	–105		18.058	–105
		18.250	–103		18.113	–113
		18.793	–100		18.250	–90
		19.260	–106		18.360	–110
					18.470	–113
					18.635	–109
					18.793	–109
					19.260	–103
					19.645	–96
10	21	17.726	–106	21	17.728	–107
		17.838	–97		17.838	–95
		17.920	–96		17.865	–103
		17.975	–102		17.920	–108
		18.058	–92		18.058	–95
		18.085	–99		18.085	–92
		18.113	–94		18.113	–96
		18.195	–101		18.195	–105
		18.250	–98		18.250	–106
		18.333	–105		18.333	–98
		18.553	–102		18.553	–93
		18.765	–110		18.765	–109
		18.875	–79		18.875	–87
		18.930	–90		18.930	–94
		19.068	–81		19.068	–99
		19.125	–99		19.123	–85
		19.205	–105		19.205	–106
		19.260	–106		19.263	–110
		19.343	–107		19.343	–107
		19.425	–103		19.425	–106
		19.563	–102		19.563	–100

JADUAL 6. Keputusan ANOVA bagi kesan kaedah pengimbasan dan jalur frekuensi terhadap RSL termasuk darjah kebebasan (DF), jumlah kuasa dua terlaras (Adj SS), min kuasa dua terlaras (Adj MS), nilai-F bagi ujian hipotesis, serta nilai-P bagi penilaian keertian statistik

Sumber	DF	Adj SS	Adj MS	Nilai-F	Nilai-P
Kaedah	1	386.0	386.02	4.22	0.042
Jalur Frekuensi	1	84.9	84.89	0.93	0.337
Ralat	115	10517.2	91.45		
Ketidakpadanan	1	277.5	277.52	3.09	0.081
Ralat Tulen	114	10239.7	89.82		
Jumlah	177	10961.8			

JADUAL 7. Anggaran pekali bagi model ANOVA RSL yang merumuskan kesan terma peramal terhadap pemboleh ubah respons. Jadual ini merangkumi anggaran pekali, ralat piawai pekali, nilai-T, nilai-P bagi ujian keertian, serta Faktor Inflasi Varians (*Variance Inflation Factor*, VIF) untuk menilai multikolineariti

Terma	Pekali	Ralat Pekali	Nilai-T	Nilai-p	VIF
Malar	0.980	–99.068	–101.05	0.000	
Kaedah	0.939	–1.929	–2.05	0.042	1.01
Jalur	0.939	0.905	0.97	0.337	1.01

Dalam skala kuasa linear, perbezaan 3.857 dB bersamaan dengan kira-kira 2.43 kali kuasa isyarat diterima. Oleh itu, perbezaan tersebut bukan sahaja signifikan secara statistik, tetapi mempunyai kepentingan praktikal dalam pengimbasan RF. Magnitud ini boleh mempengaruhi pengenalpastian isyarat lemah, penentuan puncak spektrum dan pengesanan perubahan isyarat, khususnya apabila sesuatu bacaan berada hampir dengan ambang penerimaan atau ambang pengesanan anomali yang digunakan oleh pengendali rangkaian.

Walau bagaimanapun, perbezaan RSL sebanyak 3.857 dB tidak dengan sendirinya menentukan keputusan perancangan rangkaian. Penilaian teknikal lazimnya turut mengambil kira frekuensi, hingar, gangguan, kualiti isyarat, kestabilan pautan dan nilai ambang operasi yang ditetapkan. Dalam kajian ini, nilai RSL yang lebih tinggi bagi kaedah BD menunjukkan bahawa kedudukan cerapan yang dicapai oleh dron menghasilkan keadaan penerimaan isyarat yang lebih baik secara purata dan berpotensi meningkatkan kepekaan pengimbasan terhadap puncak isyarat atau perubahan keadaan spektrum.

Dapatan tersebut selaras dengan Mohd Shaid dan Che Seman (2025), yang menunjukkan bahawa pengukuran pada ketinggian 10 m dan 20 m secara umum menghasilkan RSRP yang kurang negatif berbanding pengukuran pada aras darat. Braunfelds et al. (2024) turut melaporkan bahawa RSRP, RSRQ dan SINR berubah mengikut ketinggian operasi dron. Walaupun RSL dan RSRP tidak merujuk kepada parameter yang sama sepenuhnya, kedua-duanya menerangkan aras kuasa isyarat yang diterima dan menyokong tafsiran bahawa kedudukan serta ketinggian instrumen mempengaruhi hasil pengukuran.

Pomarnacki et al. (2025) membuktikan kebolehlaksanaan pengukuran elektromagnet menggunakan dron yang membawa penganalisis spektrum berhampiran infrastruktur telekomunikasi. Kajian tersebut tidak melaporkan perbandingan min RSL antara kaedah manusia dengan dron, maka perbandingan angka yang menunjukkan sama ada dapatan kajian ini lebih tinggi atau lebih rendah tidak dapat dibuat secara langsung. Walau bagaimanapun, dapatan semasa melanjutkan hasil kajian tersebut dengan menyediakan bukti statistik bahawa kaedah pengimbasan mempengaruhi min RSL serta menunjukkan arah dan magnitud perbezaannya.

KESAN JALUR FREKUENSI

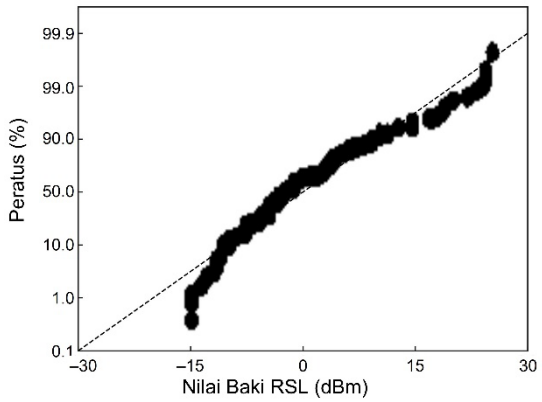
Faktor jalur menghasilkan Nilai-F sebanyak 0.93 dan Nilai-p sebanyak 0.337. Oleh sebab Nilai-p melebihi aras keertian 0.05, perbezaan min RSL antara jalur 13 GHz dengan 18 GHz tidak signifikan bagi set data yang dianalisis. Keputusan ini menunjukkan bahawa faktor kaedah memberikan kesan yang lebih jelas terhadap RSL berbanding faktor jalur dalam keadaan pengukuran kajian ini.

Model ANOVA menilai kesan utama kaedah dan jalur tetapi tidak memasukkan terma interaksi Kaedah × Jalur. Oleh itu, keputusan tersebut menerangkan perbezaan keseluruhan antara kaedah BM dengan kaedah BD serta antara dua jalur yang digunakan, tanpa menilai sama ada magnitud perbezaan BM–BD berubah secara khusus mengikut jalur frekuensi.

TAFSIRAN PLOT SISA

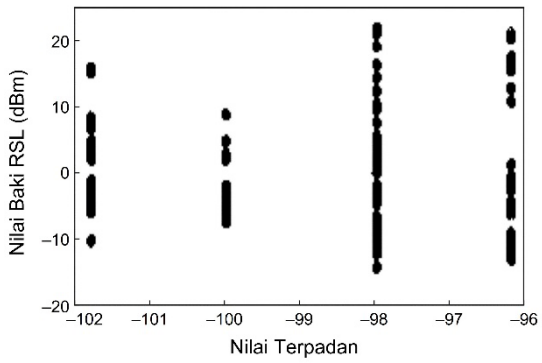
Rajah 4 hingga Rajah 7 menunjukkan empat plot sisa yang digunakan untuk menilai andaian normaliti, keseragaman varians, dan kebebasan sisa bagi model ANOVA.

Rajah 4 menunjukkan bahawa sebahagian besar titik pada bahagian tengah taburan sisa menghampiri garis rujukan. Walau bagaimanapun, penyimpangan dapat diperhatikan pada kedua-dua hujung taburan, terutamanya bagi sisa bernilai negatif dan positif yang lebih besar. Keadaan ini menunjukkan bahawa andaian normaliti dipenuhi secara sederhana, tetapi taburan sisa tidak mengikuti garis lurus dengan sempurna pada bahagian ekor.



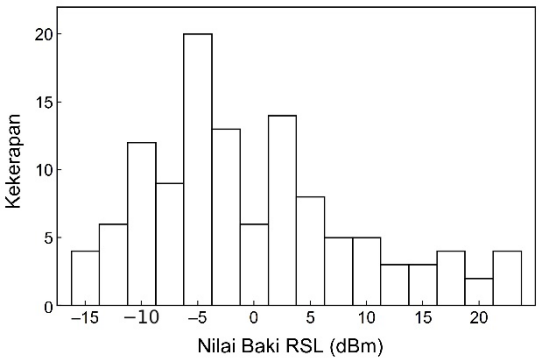
RAJAH 4. Plot kebarangkalian normal bagi sisa RSL terhadap peratus kumulatif untuk menilai sejauh mana taburan sisa menghampiri taburan normal

Rajah 5 menunjukkan bahawa sisa bertabur pada kedua-dua sisi sifar bagi setiap nilai terpadan. Beberapa kelompok menegak terbentuk kerana model menghasilkan bilangan nilai terpadan yang terhad berdasarkan gabungan aras faktor Kaedah dan Jalur. Julat sisa antara kelompok tersebut tidak seragam sepenuhnya, dengan sesetengah kelompok menunjukkan serakan yang lebih besar. Oleh itu, keseragaman varians tidak dapat disahkan secara muktamad melalui pemerhatian visual sahaja.



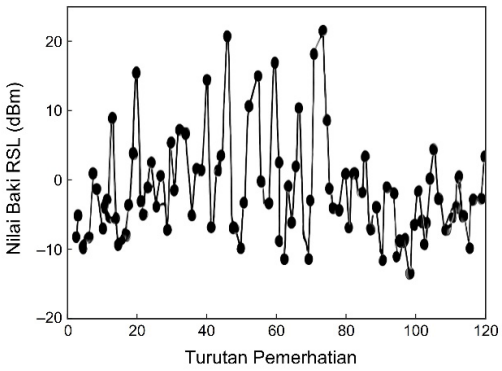
RAJAH 5. Plot sisa RSL berbanding nilai terpadan untuk menilai keseragaman varians dan mengesan pola sistematik pada model ANOVA

Rajah 6 menunjukkan bahawa kekerapan tertinggi sisa RSL tertumpu sekitar –5 dBm. Walau bagaimanapun, taburan tersebut tidak simetri sepenuhnya dan mempunyai ekor yang memanjang ke arah nilai positif. Corak ini selaras dengan penyimpangan pada bahagian ekor yang diperhatikan dalam plot kebarangkalian normal. Histogram ini tidak menunjukkan perubahan frekuensi RF, sebaliknya menunjukkan taburan kekerapan nilai sisa yang terhasil daripada model ANOVA.



RAJAH 6. Histogram sisa RSL yang menunjukkan bentuk taburan, kepekatan data, tahap kesimetrian, dan kemungkinan kewujudan nilai ekstrem

Rajah 7 menunjukkan bahawa sisa secara umumnya berubah pada kedua-dua sisi sifar tanpa trend menaik atau menurun yang berterusan. Walau bagaimanapun, beberapa kelompok sisa positif dan negatif dapat diperhatikan pada bahagian tertentu dalam turutan pemerhatian. Jika data disusun mengikut tapak, kaedah, atau jalur frekuensi, kelompok tersebut mungkin mencerminkan kesan pengelompokan yang tidak dimasukkan secara langsung dalam model.



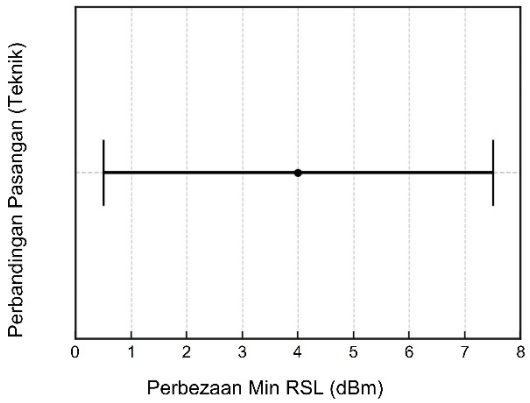
RAJAH 7. Plot sisa RSL berbanding turutan pemerhatian untuk menilai kebebasan, kestabilan, dan kemungkinan pola bersiri sepanjang urutan pengumpulan data

Secara keseluruhannya, plot sisa menunjukkan bahawa andaian ANOVA dipenuhi secara sederhana, tetapi terdapat penyimpangan pada bahagian ekor taburan dan perbezaan serakan antara beberapa kelompok nilai terpadan. Oleh sebab penilaian ini hanya berdasarkan pemerhatian visual, kesimpulan tentang normaliti, keseragaman varians, dan kebebasan sisa perlu ditafsirkan secara berhati-hati. Keputusan ANOVA masih boleh digunakan sebagai bukti inferensi, tetapi batasan andaian model perlu diambil kira ketika menilai kekuatan kesimpulan kajian.

PERBANDINGAN BERPASANGAN MENGGUNAKAN UJIAN PERBEZAAN SIGNIFIKAN TERKECIL FISHER

Ujian Perbezaan Signifikan Terkecil Fisher (*Fisher's Least Significant Difference*, FLSD) digunakan untuk membandingkan min RSL antara kaedah alternatif Berasaskan-Manusia (BM) dengan Berasaskan-Dron (BD). Analisis dijalankan menggunakan Minitab Statistical Software versi 22.5.1.

Rajah 8 menunjukkan bahawa selang keyakinan 95% bagi perbezaan min RSL tidak merangkumi sifar. Selang keyakinan bagi perbezaan min yang tidak merangkumi sifar menunjukkan bahawa perbezaan antara kedua-dua min adalah signifikan secara statistik pada aras keertian 0.05. Kedudukan anggaran perbezaan pada bahagian positif paksi menunjukkan bahawa min RSL bagi kaedah alternatif Berasaskan-Dron (BD) adalah lebih tinggi daripada Berasaskan-Manusia (BM).



RAJAH 8. Plot selang keyakinan 95% FLSD bagi perbezaan min RSL antara kaedah BD dengan BM, yang menunjukkan anggaran perbezaan min dan julat selang keyakinannya berbanding nilai sifar

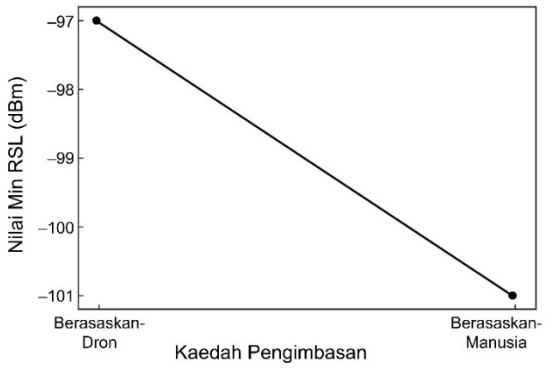
Jadual 8 menunjukkan min RSL serta pengelompokan FLSD bagi kedua-dua kaedah alternatif. Analisis ini menggunakan 79 pemerhatian bagi kaedah BD dan 39 pemerhatian bagi BM. Kriteria yang menyebabkan hanya 39 pemerhatian kaedah BM dimasukkan dalam analisis perlu dinyatakan dengan jelas kerana Jadual 5 mengandungi jumlah bacaan kaedah BM yang lebih besar.

JADUAL 8. Pengelompokan min (μ) RSL menggunakan FLSD pada aras keyakinan 95% berdasarkan bilangan pemerhatian (n) bagi kaedah alternatif Berasaskan-Dron (BD) dan Berasaskan-Manusia (BM)

Kaedah	n	μ	Kelompok
BD	79	–97.139	A
BM	61	–100.996	B

Berdasarkan Jadual 8, min RSL bagi kaedah BD ialah –97.139 dBm, manakala min RSL bagi kaedah BM ialah –100.996 dBm. Perbezaan min antara kedua-dua kaedah ialah 3.857 dBm. Oleh sebab nilai RSL bagi kaedah BD kurang negatif, kaedah tersebut merekodkan purata aras isyarat diterima yang lebih tinggi dalam set data yang dianalisis.

Kaedah BD ditempatkan dalam kelompok A, manakala kaedah BM ditempatkan dalam kelompok B. Kedua-dua kaedah tidak berkongsi huruf kelompok yang sama, sekali gus mengesahkan bahawa min RSL bagi kedua-dua kaedah berbeza secara signifikan. Walau bagaimanapun, kerana hanya terdapat dua kaedah dalam perbandingan ini, keputusan FLSD pada asasnya mengesahkan semula keputusan faktor kaedah dalam ANOVA, di samping memberikan arah dan magnitud perbezaan min.



RAJAH 9. Plot kesan utama bagi min RSL mengikut kaedah pengimbasan yang menunjukkan arah dan magnitud perubahan min RSL daripada kaedah BM kepada BD

Rajah 5.7 menunjukkan bahawa min RSL meningkat daripada –100.996 dBm bagi kaedah BM kepada –97.139 dBm bagi BD. Peningkatan sebanyak 3.857 dBm menunjukkan bahawa kaedah BD menghasilkan purata aras isyarat diterima yang lebih tinggi. Walau bagaimanapun, keertian statistik tidak semestinya menunjukkan keertian praktikal yang besar. Kepentingan praktikal perbezaan tersebut masih perlu dinilai berdasarkan keperluan operasi, variasi antara tapak, sensitiviti alat, dan kesan perbezaan RSL terhadap keputusan pengimbasan RF.

Secara keseluruhannya, keputusan ANOVA dan FLSD menunjukkan bahawa kaedah pengimbasan memberikan kesan yang signifikan terhadap min RSL. Kaedah BD merekodkan min RSL yang lebih tinggi berbanding BM, manakala kesan utama jalur frekuensi terhadap RSL tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan. Keselarasan keputusan ANOVA, pengelompokan FLSD, dan plot kesan utama mengesahkan bahawa perbezaan min RSL antara kedua-dua kaedah alternatif disokong oleh bukti statistik dalam set data yang dianalisis.

KEPUTUSAN HIPOTESIS KAJIAN

Berdasarkan keputusan ANOVA, faktor kaedah pengimbasan menghasilkan Nilai-p sebanyak 0.042, iaitu lebih kecil daripada aras keertian 0.05. Oleh itu, H_{01} yang menyatakan bahawa tiada perbezaan yang signifikan bagi min RSL antara kaedah BM dengan BD ditolak. Sebaliknya, H_{11} disokong, menunjukkan bahawa terdapat perbezaan yang signifikan bagi min RSL antara kedua-dua kaedah pengimbasan.

Keputusan FLSD seterusnya menunjukkan bahawa min RSL bagi kaedah BD ialah –97.139 dBm, manakala min RSL bagi kaedah BM ialah –100.996 dBm. Perbezaan min sebanyak 3.857 dB menunjukkan bahawa kaedah BD merekodkan purata aras isyarat diterima yang lebih tinggi berbanding BM.

Bagi faktor jalur frekuensi, Nilai-p sebanyak 0.337 adalah lebih besar daripada aras keertian 0.05. Oleh itu, H_{02} gagal ditolak, manakala H_{12} tidak disokong. Keputusan ini menunjukkan bahawa tiada bukti statistik yang mencukupi untuk menyimpulkan bahawa min RSL berbeza secara signifikan antara jalur 13 GHz dengan jalur 18 GHz bagi set data yang dianalisis.

PEMUDAHAN OPERASI BERDASARKAN RANGKA KERJA PENGIMBASAN RF

Perbandingan rangka kerja pelaksanaan menunjukkan bahawa kaedah BM dan BD berkongsi beberapa peringkat awal yang sama, termasuk penerimaan arahan kerja, penentuan skop pengimbasan, pengenalpastian jenis tapak, pelantikan personel projek, penyediaan peralatan, permohonan akses dan kelulusan pemilik tapak. Kedua-dua kaedah juga memerlukan penutupan kerja, pengemasan tapak, pemulangan kunci serta pemprosesan dan pelaporan data selepas pengimbasan selesai. Oleh itu, penggunaan kaedah BD tidak menghapuskan keseluruhan proses pentadbiran dan pengurusan tapak, tetapi mengubah langkah teknikal yang diperlukan untuk mencapai titik cerapan.

Selepas kelulusan akses diperoleh, kaedah BM memerlukan penyediaan KPD, pemeriksaan keselamatan, pengangkatan peralatan ke platform, pendakian pekerja, penempatan penganalisis spektrum pada titik cerapan, pengumpulan data serta proses turun dari menara. Langkah-langkah tersebut melibatkan pergerakan fizikal pekerja dan peralatan pada struktur tinggi serta memerlukan pematuhan yang ketat terhadap prosedur kerja selamat.

Kaedah BD menggantikan langkah pendakian dan pengangkatan peralatan ke platform dengan perancangan misi penerbangan, pemeriksaan pra-penerbangan, penilaian kesiapsiagaan operasi, pelancaran dron, pergerakan ke titik cerapan, pengumpulan data dan pendaratan. Penganalisis spektrum dibawa ke titik cerapan mengikut laluan penerbangan yang dirancang di bawah kawalan pengendali. Perbezaan utama antara kedua-dua rangka kerja ialah kaedah BD membolehkan peralatan pengukuran mencapai kedudukan cerapan tanpa memerlukan pekerja naik dan turun menara.

Pemudahan langkah teknikal tersebut selaras dengan dapatan masa operasi. Kaedah BD merekodkan purata masa operasi selama 16.4 minit bagi setiap tapak, berbanding 132.1 minit bagi BM. Perbezaan sebanyak 115.7 minit bersamaan dengan pengurangan masa operasi kira-kira 87.6%, manakala nisbah masa kaedah BD kepada kaedah BM ialah kira-kira 1:8.1. Dapatan ini menunjukkan bahawa pengurangan masa bukan sekadar manfaat konseptual penggunaan dron, tetapi turut disokong oleh hasil perbandingan lapangan di 10 tapak menara telekomunikasi.

Dari aspek keperluan tenaga kerja, kaedah BD mengurangkan kebergantungan kepada pekerja yang mempunyai kelayakan khusus untuk pendakian dan pelaksanaan kerja di tempat tinggi. Walau bagaimanapun, kaedah BD masih memerlukan pengendali dron yang kompeten, perancangan penerbangan, kebenaran operasi yang berkaitan, penilaian risiko serta pematuhan terhadap prosedur keselamatan tapak. Oleh itu, kaedah BD tidak menghapuskan keperluan pematuhan dan kompetensi pekerja, tetapi mengalihkan keperluan tersebut daripada kerja pendakian menara kepada pengurusan operasi penerbangan dan instrumen RF.

Dari perspektif pengurusan projek, pengurangan masa operasi dan langkah kerja di tempat tinggi memudahkan penjadualan tenaga kerja, penyelarasan akses tapak dan penggunaan peralatan. Tempoh pelaksanaan yang lebih pendek juga membolehkan lebih banyak tapak diperiksa dalam tempoh operasi yang sama serta meningkatkan fleksibiliti penugasan sumber. Walaupun kajian ini tidak menjalankan analisis kos secara langsung, pengurangan tempoh kerja, pendakian dan keperluan logistik menunjukkan potensi pengurangan kos tidak langsung yang berkaitan dengan tenaga kerja, persediaan keselamatan dan kelewatan operasi.

Walau bagaimanapun, kecekapan kaedah BD masih dipengaruhi oleh keadaan cuaca, kestabilan penerbangan, kapasiti bateri, had muatan, ketepatan kedudukan, ruang operasi dan kelulusan penerbangan. Oleh itu, kaedah BD lebih sesuai diterapkan sebagai kaedah pengimbasan RF yang cekap bagi tapak yang memenuhi keperluan keselamatan dan penerbangan, manakala kaedah BM kekal relevan apabila keadaan tapak atau peraturan operasi tidak membenarkan penggunaan dron.

SUMBANGAN KAJIAN KEPADA MATLAMAT PEMBANGUNAN MAMPAN

Dapatan kajian ini mempunyai kaitan dengan Matlamat Pembangunan Mampan, khususnya SDG 8: Pekerjaan Sesuai dan Pembangunan Ekonomi, SDG 9: Industri, Inovasi dan Prasarana, SDG 11: Bandar dan Masyarakat Mampan serta SDG 13: Tindakan Iklim. Perbandingan lapangan menunjukkan bahawa kaedah BD mengurangkan keperluan pemanjatan fizikal, memendekkan masa operasi, merekodkan lebih banyak bacaan RF di kebanyakan tapak dan menghasilkan min RSL yang lebih tinggi berbanding kaedah BM. Dapatan ini menunjukkan bahawa penggunaan dron bagi pengimbasan RF bukan sahaja memberikan manfaat teknikal, tetapi turut menyokong pelaksanaan kerja yang lebih selamat, cekap dan bersesuaian dengan keperluan penyelenggaraan infrastruktur telekomunikasi moden.

Kajian ini menyokong SDG 8 melalui pengurangan kebergantungan kepada aktiviti pemanjatan dan kerja fizikal di tempat tinggi. Kaedah BD membolehkan penganalisis spektrum dibawa ke titik cerapan tanpa memerlukan pekerja naik dan turun menara dalam setiap operasi pengimbasan. Pendekatan tersebut dapat mengurangkan pendedahan pekerja kepada risiko jatuh, pergerakan peralatan pada struktur tinggi dan tempoh keberadaan di platform menara. Dari aspek produktiviti, kaedah BD merekodkan purata masa operasi selama 16.4 minit bagi setiap tapak, berbanding 132.1 minit bagi kaedah BM, bersamaan dengan pengurangan kira-kira 87.6%. Pengurangan masa ini dapat membantu pengurus projek dan kontraktor menyusun tenaga kerja, peralatan serta jadual pengimbasan dengan lebih cekap apabila operasi melibatkan banyak tapak. Kecekapan penyelenggaraan dan kebolehpercayaan rangkaian telekomunikasi turut penting kepada aktiviti ekonomi moden yang bergantung pada perkhidmatan komunikasi mudah alih yang stabil (Pintor et al. 2025; Sridharan & Govindarajan 2023).

Menara telekomunikasi ialah sebahagian daripada prasarana kritikal yang menyokong liputan rangkaian, penghantaran data dan kesinambungan perkhidmatan digital. Kajian ini menyumbang kepada SDG 9 melalui penerapan dron sebagai platform pembawa instrumen RF bagi melaksanakan pengukuran pada kedudukan yang sukar dicapai melalui pemanjatan biasa. Kaedah BD merekodkan lebih banyak bacaan RF di lapan daripada 10 tapak serta menghasilkan min RSL sebanyak –97.139 dBm, berbanding –100.996 dBm bagi kaedah BM. Dapatan tersebut menunjukkan bahawa inovasi pada kaedah membawa dan menempatkan instrumen boleh meningkatkan kebolehcapaian titik cerapan serta menyokong pemerolehan data RF yang lebih cekap. Pendekatan pemeriksaan dan penyelenggaraan berasaskan teknologi juga berperanan dalam meningkatkan kebolehpercayaan prasarana serta memperkukuh keupayaan industri mengurus aset teknikal secara lebih sistematik (Pintor et al. 2025). Penggunaan teknologi digital dan kaedah pemantauan yang lebih tersusun seterusnya menyokong pembangunan infrastruktur komunikasi yang berdaya tahan dan responsif terhadap keperluan operasi semasa (Sridharan & Govindarajan 2023).

Perkhidmatan telekomunikasi yang stabil diperlukan untuk menyokong komunikasi harian, aktiviti ekonomi, sistem bandar pintar, penyampaian maklumat dan operasi kecemasan. Oleh itu, keupayaan menilai keadaan isyarat dan mengenal pasti gangguan pada menara telekomunikasi merupakan sebahagian daripada usaha mengekalkan kesinambungan perkhidmatan kepada masyarakat. Kaedah BD menyokong keperluan ini melalui pengumpulan data RF yang lebih pantas dan fleksibel, khususnya apabila titik cerapan terletak pada kedudukan tinggi atau sukar dicapai. Tempoh pengimbasan yang lebih singkat membolehkan penilaian tapak dilaksanakan dengan lebih cekap, manakala bilangan bacaan RF yang lebih tinggi di kebanyakan tapak dapat menyediakan maklumat tambahan untuk menyokong pemeriksaan keadaan isyarat. Sumbangan ini selari dengan kepentingan infrastruktur komunikasi yang stabil dalam menyokong fungsi bandar moden dan aktiviti masyarakat (Sridharan & Govindarajan 2023).

Sumbangan kajian kepada SDG 13 lebih berkait dengan kecekapan penggunaan sumber dan peningkatan keupayaan operasi menyesuaikan diri dengan keadaan persekitaran yang mencabar. Kaedah BD memendekkan masa operasi dan mengurangkan keperluan pemanjatan menara, sekali gus menunjukkan potensi untuk mengurangkan penggunaan sumber bagi kerja lapangan yang berulang. Teknologi pemeriksaan jarak jauh dan penggunaan dron turut berpotensi mengurangkan kebergantungan kepada kaedah pemeriksaan yang memerlukan mobilisasi peralatan lebih besar atau tempoh kerja yang lebih panjang. Walau bagaimanapun, kajian ini tidak mengukur penggunaan bahan api, tenaga atau pelepasan gas rumah kaca secara langsung. Oleh itu, kaitan dengan SDG 13 ditafsirkan berdasarkan potensi kecekapan operasi serta keupayaan kaedah BD menyokong penilaian awal dan perancangan kerja yang lebih adaptif terhadap keadaan cuaca, kebolehcapaian tapak dan risiko persekitaran.

Secara keseluruhannya, sumbangan paling langsung kajian ini adalah terhadap SDG 8 dan SDG 9 melalui peningkatan keselamatan kerja, pengurangan masa operasi dan penggunaan teknologi dron untuk pengimbasan RF. Sumbangan terhadap SDG 11 ditunjukkan melalui sokongan kepada kesinambungan dan daya tahan infrastruktur komunikasi, manakala kaitan dengan SDG 13 melibatkan potensi penggunaan sumber yang lebih

cekap dan perancangan operasi yang lebih adaptif. Pengasingan sumbangan ini dalam bahagian khusus membolehkan hubungan antara dapatan kajian dengan setiap SDG diterangkan berdasarkan hasil yang benar-benar diukur serta implikasi yang disokong oleh kajian terdahulu.

KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahawa kaedah BD memberikan prestasi operasi yang lebih baik berbanding kaedah BM bagi pengimbasan RF di 10 tapak menara telekomunikasi. Kaedah BD merekodkan purata masa operasi selama 16.4 minit bagi setiap tapak, berbanding 132.1 minit bagi kaedah BM. Perbezaan sebanyak 115.7 minit bersamaan dengan pengurangan masa operasi kira-kira 87.6%, dengan nisbah masa operasi sekitar 1:8.1. Kaedah BD turut merekodkan bilangan bacaan RF yang lebih tinggi di lapan daripada 10 tapak, manakala bilangan bacaan yang sama diperoleh di dua tapak yang lain. BM dan BD masing-masing memperoleh 61 dan 79 bacaraan RF.

Keputusan ANOVA menunjukkan bahawa kaedah pengimbasan memberikan kesan yang signifikan terhadap RSL dengan nilai-p sebanyak 0.042. Oleh itu, H_{o1} ditolak dan H_{11} disokong, menunjukkan bahawa terdapat perbezaan yang signifikan bagi min RSL antara kaedah BM dengan kaedah BD. Keputusan FLSD menunjukkan bahawa min RSL bagi kaedah BD ialah −97.139 dBm, berbanding −100.996 dBm bagi kaedah BM, dengan perbezaan min sebanyak 3.857 dB. Sebaliknya, jalur frekuensi tidak memberikan kesan yang signifikan terhadap RSL dengan nilai-p sebanyak 0.337. Oleh itu, H_{o2} gagal ditolak, menunjukkan bahawa bukti statistik tidak mencukupi untuk menyimpulkan bahawa min RSL berbeza antara jalur 13 GHz dengan jalur 18 GHz. Pemeriksaan plot sisa turut menunjukkan bahawa penyimpangan yang dikenal pasti berada pada tahap sederhana dan tidak menjejaskan kesesuaian keseluruhan model ANOVA.

Dari sudut praktikal, pengurangan masa sebanyak 115.7 minit bagi setiap tapak memberikan implikasi operasi yang ketara apabila pengimbasan melibatkan bilangan tapak yang besar. Sekiranya perbezaan purata yang sama dikekalkan bagi 100 tapak dengan keadaan operasi yang setara, penggunaan kaedah BD berpotensi menjimatkan kira-kira 11,570 minit atau 193 jam kerja lapangan, bersamaan dengan kira-kira 24 hari kerja lapan jam. Anggaran ini menggambarkan potensi penjimatan masa sahaja dan tidak merangkumi masa perjalanan, kelewatan kelulusan, keadaan cuaca, keperluan tenaga kerja atau kos operasi sebenar.

Sumbangan praktikal kajian ini ialah penyediaan bukti lapangan dan rangka kerja pelaksanaan yang boleh membantu pengurus projek, kontraktor dan pengamal industri merancang pengimbasan RF dengan lebih cekap. Kaedah BD mengurangkan kebergantungan kepada pemanjatan menara, memendekkan tempoh capaian ke titik cerapan serta memudahkan penyusunan tenaga kerja dan peralatan. Walau bagaimanapun, kaedah BD masih memerlukan pengendali yang kompeten, pemeriksaan pra-penerbangan, pematuhan terhadap peraturan penerbangan, penilaian risiko dan penyelarasan dengan pemilik tapak.

Dari sudut teoretikal, kajian ini memperkukuh pemahaman bahawa kaedah membawa instrumen dan kebolehcapaian titik cerapan merupakan unsur metodologi yang boleh mempengaruhi masa operasi, bilangan isyarat yang dikesan dan RSL yang direkodkan. Oleh itu, perbezaan antara kaedah BM dengan kaedah BD tidak hanya berkaitan dengan logistik akses, tetapi turut melibatkan kedudukan instrumen, laluan pengukuran dan keadaan penerimaan isyarat di sekitar struktur menara. Secara lebih luas, dapatan kajian turut menyokong SDG 8, SDG 9, SDG 11 dan SDG 13 melalui peningkatan keselamatan kerja, penerapan inovasi pengimbasan RF, sokongan terhadap daya tahan infrastruktur komunikasi dan potensi pelaksanaan operasi yang lebih cekap dari segi sumber.

Kajian ini mempunyai beberapa batasan yang perlu dipertimbangkan dalam mentafsir dapatan. Kajian kes lapangan hanya melibatkan 10 tapak menara telekomunikasi yang dipilih berdasarkan kebolehcapaian, kebenaran tapak dan sokongan operasi. Oleh itu, dapatan kajian tertumpu kepada ciri tapak yang telah dinilai dan belum merangkumi variasi struktur menara di kawasan hutan, bukit, pulau, luar pesisir atau lokasi yang mempunyai risiko operasi lebih tinggi. Pengimbasan juga hanya melibatkan jalur 13 GHz dan 18 GHz serta dilaksanakan dalam persekitaran industri telekomunikasi Malaysia ketika keadaan cuaca yang sesuai. Prestasi kedua-dua kaedah semasa hujan lebat, angin kencang, ribut petir, banjir atau keadaan pascabencana tidak dinilai. Kajian ini juga tidak melaksanakan analisis kos terperinci, penggunaan tenaga, pelepasan karbon, prestasi keselamatan jangka panjang atau penilaian semua parameter teknikal RF. Analisis statistik pula menilai kesan utama kaedah dan jalur tanpa memasukkan terma interaksi antara kedua-dua faktor.

Berdasarkan batasan tersebut, kajian lanjutan dicadangkan dengan melibatkan lebih banyak tapak, jenis menara, ketinggian, konfigurasi antena, lokasi geografi dan jalur frekuensi. Penilaian dalam keadaan cuaca mencabar dan senario pascabencana diperlukan untuk menentukan kestabilan penerbangan, keselamatan operasi dan kebolehpercayaan data. Analisis kos-faedah juga boleh dilaksanakan dengan mengambil kira kos peralatan, latihan,

permit, penyelenggaraan, mobilisasi, tenaga kerja dan masa henti. Penambahan parameter seperti kuasa isyarat rujukan yang diterima (*reference signal received power*, RSRP), kualiti isyarat rujukan yang diterima (*reference signal received quality*, RSRQ), dan nisbah isyarat kepada gangguan dan hingar (*signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR), kesan ketinggian, orientasi antena, perambatan berbilang laluan dan kestabilan bacaan mengikut masa dapat memberikan penilaian teknikal yang lebih menyeluruh. Selain itu, integrasi kecerdasan buatan dengan platform dron boleh diterokai untuk melaksanakan pengenalpastian puncak spektrum, pengelasan gangguan, pengesanan anomali isyarat dan tafsiran data RF secara automatik.

Secara keseluruhannya, kaedah BD merupakan pendekatan yang lebih cekap dari aspek masa operasi serta berupaya menyokong pemerolehan data RF pada titik cerapan yang sukar dicapai. Pelaksanaannya secara lebih meluas perlu disesuaikan dengan ciri tapak, keadaan cuaca, keperluan teknikal, keselamatan penerbangan dan peraturan operasi yang berkuat kuasa.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas sokongan menjayakan kajian ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

Abd-Hamid, A. 2021. MCMC confirms telco tower fire in Hutan Melintang. *New Straits Times*, 5 Jun.

Abd Halin, A.F.N. & Abd Manan, M.S. 2025. Droning sustainability: Advancing thermal analysis of GBI-certified buildings in Putrajaya, Malaysia, through drone technology. *Jurnal Kejuruteraan* 37(5): 2281–2292. https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(5)-20

Abd Halin, A.F.N. & Abd Manan, M.S. 2024. Drones and technopreneurship in Malaysia: Unlocking the economic potential of drones in built environment development. *International Journal of Business and Technopreneurship* 14(3): 283–302. https://doi.org/10.58915/ijbt.v14i3.1041

Abdul Hamid, S. 2022. *Development of Occupational Safety and Health (OSH) Performance Management Framework for Industries in Malaysia*. Tesis PhD. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.

Abubakar, A., Ishak, M.Y. & Makmom, A.A. 2022. Nexus between climate change and oil palm production in Malaysia: A review. *Environmental Monitoring and Assessment* 194: 262. https://doi.org/10.1007/s10661-022-09915-8

Al-allaq, Z.J., Dhaam, H.Z., Jawad, M. & Al-Dujaili, M. 2023. Discovering the spatial locations of the radio frequency radiations effects around mobile towers. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 13(2): 1629–1638. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1629-1638

Al-Awadi, A.M. & Al-Dujaili, M.J. 2020. Simulation of LTE-TDD in the HAPS channel. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 10(3): 3152–3157.

Albert, G. 2025. Dramatic rescue as technician collapses from heatstroke on 30-metre telecom tower in Lampang. *ASEANNow*.

Alias, N.A., Mohd Idris, N.D., Chamhuri, S., Alam, M.M. & Yasar, M. 2021. Community preparation and vulnerability indices for floods in Pahang State of Malaysia. *Land* 10(2): 198. https://doi.org/10.3390/land10020198

Aminu, I., Zhimwang, J.T., Adewumi, D., Ibrahim, R.S., Musa, M.Z. & Matthew, D.D. 2021. Measurement and evaluation of radiation power density emitted from mobile cellular base stations in Abuja and its environ, Nigeria. *Asian Journal of Research and Reviews in Physics* 4(1): 7–13.

Anwar, N., Izhar, M.A. & Najam, F.A. 2018. Construction monitoring and reporting using drones and unmanned aerial vehicles (UAVs). Dlm. *10th International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-10)*, disunting oleh S.M. Ahmed, A. Shah, S. Azhar, N.A. Smith, S. Campbell, K. Mahaffy & A. Saul, 2–4.

Aprilia, D. & Ramadhan, A. 2021. Efforts to control potential hazards of working at height at a Gresik fertilizer company, Indonesia. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health* 10(3): 331–342. https://doi.org/10.20473/ijosh.v10i3.2021.331-342

Arinze, N.S., Okafor, P.U. & Onah, O.I. 2021. The adverse effect of electromagnetic radiation from cellular base stations in Nigeria. *Advance Journal of Science, Engineering and Technology* 5(4): 269–280.

Azizan, N.F.M. & Tarmidi, Z. 2025. GIS-based site suitability for 5G telecommunication towers enhancing mobile network coverage. *Journal of Advanced Geospatial Science & Technology* 5(2): 302–324. https://doi.org/10.11113/jagst.v5n2.113

Azmi, E.S. & How, V. 2025. Technology potential in improving disaster response communication: A qualitative study in Malaysia. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences* 21(3): 51–62. https://doi.org/10.47836/mjmhs.21.3.8

Basarudin, H., Yunus, N.H.M., Ramli, A.F., Mansor, Z., Sali, A., Seng, G.H. & Abu, M.A. 2023. Evaluation of climate change effects on rain rate distribution in Malaysia using hydro-estimator for 5G and microwave links. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 13(4): 11064–11069. https://doi.org/10.48084/etasr.5552

Berita Harian. 2022. Kerajaan memperkasakan masyarakat negara digital. *Berita Harian*, 17 Mei.

Bernama. 2023. MCMC: Repair work on telco tower in Kg Gasak, Chini to take time. *New Straits Times*, 18 Ogos.

Bernama. 2025. 264 telecommunication towers affected by floods in Kelantan restored—Fahmi. *Bernama*, 20 Januari.

Cao, X., Liu, L., Cheng, Y. & Shen, X.S. 2018. Towards energy-efficient wireless networking in the big data era: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20(1): 303–332. https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2771534

Carreras-Coch, A., Navarro, J., Sans, C. & Zaballos, A. 2022. Tecnologías de comunicación en situaciones de emergencia. *Electronics* 11(7): 1155. https://doi.org/10.3390/electronics11071155

Chamata, J.E. 2016. A proposal for the adoption of unmanned aerial technology in Malaysia. Dlm. *Proceedings of the 4th Borneo Research Education Conference (BREC)*, 1–12.

Chiaraviglio, L., Lodovisi, C., Franci, D., Grillo, E., Pavoncello, S., Aureli, T., Blefari-Melazzi, N. & Alouini, M.S. 2022. How much exposure from 5G towers is radiated over children, teenagers, schools and hospitals? *IEEE Open Journal of the Communications Society* 3: 1592–1614. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3208938

Cisco Systems. 2017. *Wireless LAN Design Guide for High-Density Client Environments in Higher Education*. Cisco Systems.

Dai, L., Qi, J., Han, J., Wang, Z., Ge, W. & Wang, C. 2012. Camera selection for unmanned helicopter power line inspection. Dlm. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies*, 1–4.

Daoud, A.O., Kineber, A.F., Chileshe, N., Elmansoury, A. & Abdel Aziz, K.M. 2025. Investigating barriers to drones implementation in sustainable construction using PLS-SEM. *Scientific Reports* 15: 3650. https://doi.org/10.1038/s41598-024-76470-2

Delidimitriou, S., Babas, D., Manassas, A., Wiart, J. & Samaras, T. 2026. RF-EMF bystander exposure in the 5G era measured across various microenvironments in Greece. *Annals of Telecommunications*. https://doi.org/10.1007/s12243-026-01143-2

Dilli, R. 2021. Implications of mmWave radiation on human health: State of the art threshold levels. *IEEE Access* 9: 13009–13021.

Donnis, E. & Rahmat, M.N. 2025. Exploring the utilisation of drone technology in construction: Insights and practices within the Sarawak region. *Built Environment Journal* 22(1): 1–13. https://doi.org/10.24191/bej.v22i1.977

DOSH. 2025. *Occupational Accident Statistics*. Department of Occupational Safety and Health Malaysia.

Elhakim, Y., Hazem, N., Ismail, T., Mahmoud, M. & Fahim, I. 2023. Towards greener telecommunication towers: A framework for "LEED for telecom towers." *Cogent Engineering* 10(1): 1–17.

Elhakim, Y., Ismail, T. & Samy, I. 2022. Comparative analysis of wind-loaded telecom tower structures with recommendations. Dlm. *Proceedings of the 2022 4th Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference*, 1–4. https://doi.org/10.1109/NILES56402.2022.9942423

Elsayed Ali, A.S., Dafaalla Hamadelnil, M.A., Hamadelzain Eltahir, M.S., Elfadil Ahmed, M.A. & El-Faki Onsa, S.J. 2020. *Structural Analysis and Design of Telecommunication Tower*. Almughtaribeen University.

Famoriji, O.J. & Shongwe, T. 2025. Machine learning approach for ground-level estimation of electromagnetic radiation in the near field of 5G base stations. *Applied Sciences* 15(13): 7302. https://doi.org/10.3390/app15137302

Febrian, M., Pujangkoro, S. & Lubis, A.N. 2023. Analysis of factors affecting property land rental value for telecommunication towers. *Journal of Innovation Research and Knowledge* 2(8): 3203–3210.

Ferrier, L., Ibrahim, H., Issa, M. & Ilinca, A. 2021. State of the art of telecommunication systems in isolated and constrained areas. *Sensors* 21(9): 3073.

Ham, Y., Han, K.K., Lin, J.J. & Golparvar-Fard, M. 2016. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped unmanned aerial vehicles (UAVs): A review of related works. *Visualization in Engineering* 4(1): 1–8. https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z

Harun, N.H., Norazahar, N. & James, B.B. 2020. Factor that influencing level of safety awareness among port employee in Malaysia. Dlm. *The Management of Work Performance, Safety and Entrepreneurship Trend in Malaysia*, disunting oleh N.F. Habidin, S.Y. Yee Ong, T.W. Tuan Chik & U.A. Muhamad, 27–32. Kaizentrenovation Sdn. Bhd.

Hasbi, A. 2025. Worker dies on top of telco tower. *New Straits Times*, 15 April.

Isa, M.F.M., Ab Rahim, N.Z. & Fathi, M.S. 2019. It's a bird…it'saplane…it'sadrone…:Telecommunication tower inspection using drone. Dlm. *Proceedings of the 2019 6th International Conference on Research*

and Innovation in Information Systems (ICRIIS), 1–5. https://doi.org/10.1109/ICRIIS48246.2019.9073663

Ishihara, T., Yamazaki, K., Araki, A., Teraoka, Y., Tamura, N., Hikage, T., Omiya, M., Mizuta, M. & Kishi, R. 2020. Exposure to radiofrequency electromagnetic field in the high-frequency band and cognitive function in children and adolescents: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(24).

Islam, S., Raihan, A., Ali, S. & Uddin, J. 2021. Analyzing the effect of radiation on human beings of electromagnetic waves from BTS and MS in Kushtia, Bangladesh. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education* 12(10): 448–458.

Ismail, N.A. & Wan Zain, W.Z. 2022. Statistical analysis of rainfall data in Peninsular Malaysia using strong transformation of cubic spline analysis. *Jurnal Kejuruteraan SI* 5(2): 237–240. https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-si5(2)-26

ITU-R. 2007. *Radio-Frequency Channel Arrangements for Fixed Wireless Systems Operating in the 13 GHz (12.75–13.25 GHz) Frequency Band*. Geneva: International Telecommunication Union.

ITU-R. 2022. *Radio-Frequency Channel Arrangements for Fixed Wireless Systems Operating in the 17.7–19.7 GHz Frequency Band*. Geneva: International Telecommunication Union.

ITU-R. 2025. *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems*. Geneva: International Telecommunication Union.

Jit Singh, M.J., Wan Saleh, W.S., Abed, A.T. & Fauzi, M.A. 2023. A review on massive MIMO antennas for 5G communication systems on challenges and limitations. *Jurnal Kejuruteraan* 35(1): 95–103. https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(1)-09

Kahar, R.A., Ab Rahman, M.N., Saibani, N., Mansor, M.F. & Pardi, H. 2023. Determining the differences in performance between two techniques of radio frequency scanning at telecommunication towers. Dlm. *Proceedings of the 13th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 1193–1205. https://doi.org/10.46254/AN13.20230351

Kandregula, V.R., Zaharis, Z.D., Ahmed, Q.Z., Khan, F.A., Loh, T.H., Schreiber, J., Serres, A.J.R. & Lazaridis, P.I. 2024. A review of unmanned aerial vehicle-based antenna and propagation measurements. *Sensors* 24(22): 7395. https://doi.org/10.3390/s24227395

Kang, C.C., Teh, Y.H., Tan, J.D., Ariannejad, M.M. & Samdin, S.B. 2023. Review of 5G wireless cellular network on COVID-19 pandemic: Digital healthcare and challenges. *Jurnal Kejuruteraan* 35(3): 551–556. https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(3)-02

Karunakaran, S., Ramli, M.Z., Malek, M.A., Musir, A.A., Imran, N.F., Fuad, N.F.S.M., Zawawi, M.H. & Zainal, M.Z. 2018. Causes of delay on highway construction project in Klang Valley. *AIP Conference Proceedings* 2030: 020242.

Karunasena, D., Dampage, U., Kularathna, R., Senarathna, O. & Madhuwantha, K. 2019. ComBot for inspection and fault monitoring/reporting of telecommunication mast elements. Dlm. *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICSPCC46631.2019.8960732

Khuzairi, M., Rahim, H.A., Abdulmalek, M. & Warip, N.M. 2019. Radio frequency radiation measurement for base tower station safety compliances: A case study in Pulau Pinang, Malaysia. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 8(1): 150–157.

Kopyt, A. & Rodo, P. 2026. Design and implementation of a trajectory planning application for UAV inspection of telecommunication masts. *Applied Sciences* 16(3): 1582. https://doi.org/10.3390/app16031582

Krajaechun, S., Jaireung, S. & Khunthong, T. 2025. Occupational safety and health support system for telecommunication tower climbers. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports* 28(2): e254166. https://doi.org/10.55164/ajstr.v28i2.254166

Levitt, B.B. & Lai, H. 2010. Biological effects from exposure to electromagnetic radiation emitted by cell tower base stations and other antenna arrays. *Environmental Reviews* 18: 369–395.

Marshall, A., Wilson, C.A. & Dale, A. 2023. Telecommunications and natural disasters in rural Australia: The role of digital capability in building disaster resilience. *Journal of Rural Studies* 100: 102996. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.03.004

Matracia, M., Saeed, N., Kishk, M.A. & Alouini, M.S. 2022. Post-disaster communications: Enabling technologies, architectures, and open challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society* 3: 1177–1205. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3192040

MCMC. 2021a. *2021 Annual Report*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021b. *Kebakaran Melibatkan Kabin Menara Komunikasi di Menara Felda, Seberang Tayor, Kemaman, Terengganu: Kerja Baik Pulih Rangkaian Komunikasi Terjejas Dijalankan*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021c. *Menara Komunikasi di Kg. Gelong Badak, Bachok, Kelantan Tumbang Akibat Cuaca Buruk*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021d. *Menara Komunikasi di Menara Ladang Sibol B, Kota Tinggi Terbakar: Kerja-Kerja Baik Pulih Giat Dijalankan*. Kenyataan media. Cyberjaya:

Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021e. *Menara Komunikasi Milik TM Tumbang Akibat Hujan Lebat dan Angin Kencang di Seberang Perak, Perak Tengah*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021f. *Menara Komunikasi Terbakar di Batu 10, Hutan Melintang, Perak: Kerja-Kerja Pembaikan Sedang Giat Dijalankan*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2021g. *Status Baik Pulih Infrastruktur Komunikasi yang Terjejas Akibat Banjir*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2022a. *Kebakaran Menara Komunikasi di Bukit Bunga, Serting Tengah, Negeri Sembilan: Kerja Baik Pulih Rangkaian Komunikasi Terjejas Sedang Dijalankan*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2022b. *Menara Telekomunikasi yang Terbakar di Telupid, Sabah Sedang Dibaik Pulih dan Diselesaikan Secara Berperingkat*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2022c. *SKMM Jamin Liputan 4G Akan Bertambah Baik*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2023a. *Digital Connectivity: Ensuring Everyone Gets Connected: A Glance at Malaysia's Digital Connectivity Journey JENDELA*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2023b. *Struktur Menara Komunikasi di Kg. Gasak, Chini, Pekan, Pahang Alami Kerosakan Akibat Perbuatan Vandalisme*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2023c. *Struktur Menara Komunikasi di Kg. Rambai Sebunga, Pekan, Pahang Rosak Akibat Perbuatan Vandalisme*. Kenyataan media. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2024a. *MCMC and MIDA Collaborate to Develop 5G Readiness Assessment Framework for SMEs in Malaysia*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2024b. *MCMC Bersama Syarikat Telekomunikasi Berusaha Pulihkan Perkhidmatan Rangkaian Terjejas Akibat Banjir di Sabah*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2024c. *Ministerial Direction on 5G Network Implementation and Revocation of the Ministerial Direction on the Deployment of 5G Infrastructure and Network, Direction No. 3 of 2021*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

MCMC. 2025. *Gangguan Telekomunikasi di Kuala Kangsar Akibat Kebakaran Menara*. Cyberjaya: Malaysian Communications and Multimedia Commission.

Merz, T. & Kendoul, F. 2011. Beyond visual range obstacle avoidance and infrastructure inspection by an autonomous helicopter. Dlm. *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4953–4960.

Mohammed Zain, R., Mohd Zahari, H. & Mohd Zainol, N.A. 2023. Inter-agency information sharing coordination on humanitarian logistics support for urban disaster management in Kuala Lumpur. *Frontiers in Sustainable Cities* 5: 1149454. https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1149454

Mohd Shaid, M.A. & Che Seman, F. 2025. Development of a dashboard for drone-assisted high-altitude cellular network coverage. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering* 6(2): 190–198. https://doi.org/10.30880/eeee.2025.06.02.023

Montgomery, C.D. 2020. *Design and Analysis of Experiments*. Edisi ke-9. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Moud, H.I., Shojaei, A. & Flood, I. 2018. Current and future applications of unmanned surface, underwater, and ground vehicles in construction. Dlm. *Construction Research Congress 2018*, 106–115. https://doi.org/10.1061/9780784481264.011

Muhammad, M., Idris, K., Mohamed Shaffril, H.A., Sulaiman, A.H., Samah, B.A. & Suandi, T. 2018. Attitude of small-scale fishermen towards adaptation to climate change. *Pertanika Journal of Social Sciences and Humanities* 26(T): 123–136.

Mutalib, S., Abdullah, M.H., Abdul-Rahman, S. & Aziz, Z.A. 2016. A brief study on paddy applications with image processing and proposed architecture. Dlm. *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Systems, Process and Control*, 16–18. https://doi.org/10.1109/SPC.2016.7920716

NADMA. 2024a. *Laporan Harian Bencana, 11 Januari 2024*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

NADMA. 2024b. *Laporan Harian Bencana, 13 Januari 2024*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

NADMA. 2024c. *Laporan Harian Bencana #04, 1 Disember 2024*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

NADMA. 2025a. *Laporan Harian Bencana #13, 2 Februari 2025*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

NADMA. 2025b. *Laporan Harian Bencana #19, 22 Mac 2025*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

NADMA. 2025c. *Laporan Situasi Bencana di Sabah, 16 September 2025*. Putrajaya: Agensi Pengurusan Bencana Negara.

Nasidi, N.M., Wayayok, A., Abdullah, A.F. & Mohd Kassim, M.S. 2021. Dynamics of potential precipitation under climate change scenarios at Cameron Highlands, Malaysia. *SN Applied Sciences* 3: 334. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04332-x

Norzailawati, M.N., Alias, A. & Akma, R.S. 2016. Designing zoning of remote sensing drones for urban applications: A review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41: 131–138.

Olorunsola, A.B., Ikumapayi, O.M., Oladapo, B.I., Alimi, A.O. & Adeoye, A.O.M. 2021. Temporal variation of exposure from radio-frequency electromagnetic fields around mobile communication base stations. *Scientific African* 12: e00724.

Pahlavan, K. 2022. Understanding of RF cloud interference measurement and modeling. *International Journal of Wireless Information Networks* 29(3): 206–221. https://doi.org/10.1007/s10776-021-00541-8

Papiliopoulou, A., Papavasileiou, M., Bessas, T., Vayas, I., Thanopoulos, P., Vamvatsikos, D., Vlachakis, K., Dasiou, M.-E., Tobolt, M., Bezas, M.-Z., Jaspart, J.-P., Demonceau, J.-F., Beyer, A. & Bureau, A. 2019. *Innovative Solution for Design and Strengthening of Telecommunication and Transmission Lattice Towers Using Large Angles from High Strength Steel and Hybrid Technique for Angles with FRP Strips*.

Peksa, J. & Mamchur, D. 2024. A review on the state of the art in copter drones and flight control systems. *Sensors* 24: 3349. https://doi.org/10.3390/s24113349

Pintor, L., Atzori, L. & Iera, A. 2025. Sustainability in telecommunication networks and key value indicators: A survey. *Computer Networks* 271: 111466. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111466

Pomarnacki, R., Bručas, D., Jačionis, T. & Plonis, D. 2025. Unmanned aerial vehicles for the monitoring of telecommunication towers from the engineering approach. *Drones* 9: 308. https://doi.org/10.3390/drones9040308

Purvis, A. 2022. Working at height. *Steel Times International* 46(3): 63–65.

Quamruzzaman, M., Haque, M., Haque, S. & Das, U.C. 2021. Electromagnetic radiation from cell phones used in Dhaka City. Dlm. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, disunting oleh Y.-D. Zhang, T. Senjyu, C. So-In & A. Joshi, Jil. 182, 147–157. Cham: Springer.

Rahim, H., Amirul, M., Abdul, M., Zaffrie, M., Amin, M. & Haimid, M.T. 2018. Perception and acceptance of farmers on precision farming technology in selected granary area. *Economic and Technology Management Review* 13: 97–110.

Rahman, R.A., Radzi, A.R., Saad, M.S.H. & Doh, S.I. 2020. Factors affecting the success of highway construction projects: The case of Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 712: 012030.

Raza, M., Awais, M., Ali, K., Aslam, N., Parathaman, V.V., Imran, M. & Ali, F. 2020. Establishing effective communications in disaster-affected areas and artificial intelligence-based detection using social media platform. *Future Generation Computer Systems* 112: 1057–1069. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.06.040

Romeli, N., Zakaria, A.A., Muhammad Halil, F., Abd Ghapar, M.A.A. & Ishak, N. 2023. Earthwork volumetric estimation via unmanned aerial system application: Perception from Penang contractors. *Jurnal Kejuruteraan* 35(3): 657–669. https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(3)-13

Rosmadi, H.S., Ahmed, M.F., Mokhtar, M.B. & Lim, C.K. 2023. Reviewing challenges of flood risk management in Malaysia. *Water* 15(13): 2390. https://doi.org/10.3390/w15132390

Sainuddin, N., Mohd Sultan, J., Idris, F. & Azuani, M. 2021. Data collision and interference minimization in wireless sensor network using node data addressing with random access time. *Jurnal Kejuruteraan* 33(4): 1105–1112. https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(4)-33

Sajid, Z.W., Ullah, F., Qayyum, S., Masood, R., Inam, H. & Maqsoom, A. 2025. AIoT-powered drones in the construction industry: A review. *Drone Systems and Applications* 13: 1–21. https://doi.org/10.1139/dsa-2025-0001

Seng, M.C. 2023. Telco tower in Padawan razed by fire. *New Sarawak Tribune*, 14 Julai.

Shamshiri, R.R., Hameed, I.A., Balasundram, S.K., Ahmad, D., Weltzien, C. & Yamin, M. 2018. Fundamental research on unmanned aerial vehicles to support precision agriculture in oil palm plantations. Dlm. *Agricultural Robots: Fundamentals and Applications*, disunting oleh J. Zhou & B. Zhang, 91–116. IntechOpen.

Simic, M., Bil, C. & Vojisavljevic, V. 2015. Investigation in wireless power transmission for UAV charging. *Procedia Computer Science* 60: 1846–1855. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.295

Sing, R.D.R., Hamzah, S.H. & Singh, G.K.S. 2025. Assessing the impact of safety assurance practices on telecommunication tower maintenance effectiveness in Malaysia: The moderating role of risk exposure. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies* 8(4): 62–77. https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i3.7739

Singh, A.K., Mohandes, S.R., Muhodir, S.H., Zhang, W., Antwi-Afari, M.F. & Shakor, P. 2025. Exploring barriers to unmanned aerial vehicle (UAV) technology for construction safety management using mixed-methods approach. *Buildings* 15(12): 2092. https://doi.org/10.3390/buildings15122092

Sridharan, H. & Govindarajan, S. 2023. Sustainability in telecom: Reducing the environmental impact of networks. *International Journal of Science and Research* 12(1): 1352–1365. https://doi.org/10.21275/SR24913031348

Sulaiman, Y., Khong, B.T.W., Lun, L.K., Ghani, N.H.A. & Khairi, M.Q.I.M. 2024. A new adoption intention model of drone application in food delivery services in Malaysia: A conceptual paper. *WSEAS Transactions on Business and Economics* 21: 488–498. https://doi.org/10.37394/23207.2024.21.41

Takaya, K., Ohta, H., Kroumov, V., Shibayama, K. & Nakamura, M. 2019. Development of UAV system for autonomous power line inspection. Dlm. *Proceedings of the 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing*, 762–767.

Tang, K.H.D. 2019. Climate change in Malaysia: Trends, contributors, impacts, mitigation and adaptations. *Science of the Total Environment* 650: 1858–1871. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.316

Tauhid Ahmad, N.H., Ishak, A.N. & Jit Singh, M.S. 2021. Ramalan pelemahan hujan di Malaysia menggunakan data TRMM (Prediction of rain attenuation in Malaysia using TRMM data). *Jurnal Kejuruteraan* 33(2): 329–341. https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(2)-17

Tawiah, L.M. & Kwarteng, O.A. 2018. RF radiation potential environmental health impact on riggers in telecommunication industry in Ghana. Dlm. *Environmental Science and Technology*, disunting oleh G.A. Sorial & J. Hong, 432. American Science Press.

The Star. 2022. Telco tower upgrades were 11% behind JENDELA target. *The Star*, 28 April.

Tukimat, N.N.A., Othman, A.S., Wan Ahmad, S. & Muthusamy, K. 2018. Evaluation of climate variability performances using statistical climate models. *Sains Malaysiana* 47(1): 77–84. https://doi.org/10.17576/jsm-2018-4701-09

Wahab, S.N., Othman, N., Sahak, M.Y. & Subramaniam, N. 2024. Elevating healthcare resilience: Role of drones in mitigating supply chain challenges in Malaysia. *Environment-Behaviour Proceedings Journal* 9(SI19): 55–63. https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9isi19.5769

Wang, Q., Li, W., Yu, Z., Abbasi, Q., Imran, M., Ansari, S., Sambo, Y., Wu, L., Li, Q. & Zhu, T. 2023. An overview of emergency communication networks. *Remote Sensing* 15(6): 1595. https://doi.org/10.3390/rs15061595

Wariishi, H. & Tanaka, T. 2019. A study on safety awareness by risk avoidance in building facilities and practicability of risk prediction sheets under ISO 45001. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 330: 022096.

Xiang, Y.W. 2023. Technician dies after being stung by swarm of hornets while working at Kulim telecom tower. *Harian Metro*, 26 Julai.

Xie, X., Liu, Z., Xu, C. & Zhang, Y. 2017. A multiple sensors platform method for power line inspection based on a large unmanned helicopter. *Sensors* 17(6): 1222. https://doi.org/10.3390/s17061222

Yazid, A.S.M., Wahid, R.A., Nazrin, K.M., Ahmad, A., Nasruddin, A.S., Rozilawati, D., Hamzah, M.A. & Razak, M.Y.A. 2019. Terrain mapping from unmanned aerial vehicles. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 13(1): 1–16.

Yen, X.C., Shanmugam, K. & Ehsan Rana, M. 2022. Short-term mobile ad hoc network with LoRa-based infrastructure in disaster relief. *Journal of Applied Technology and Innovation* 6(2): 55–59.

Yürüşen, N.Y., Rowley, P.N., Watson, S.J. & Melero, J.J. 2020. Automated wind turbine maintenance scheduling. *Reliability Engineering & System Safety* 200: 106965. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106965

Zailani, M.A.H., Raja Sabudin, R.Z.A., Abdul Rahman, R., Mohd Saiboon, I., Ismail, A. & Mahdy, Z.A. 2021. Drone technology in maternal healthcare in Malaysia: A narrative review. *Malaysian Journal of Pathology* 43(2): 251–259.

Zermane, A., Mohd Tohir, M.Z., Baharudin, M.R. & Mohamed Yusoff, H. 2022. Risk assessment of fatal accidents due to work at heights activities using fault tree analysis: Case study in Malaysia. *Safety Science* 151: 105724. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105724