Tinjauan Arsitektur dan Celah Regulasi Pemanfaatan Spektrum Sub-THz untuk Sistem HAPS di Indonesia

Sandryones Palinggi[1], Lidemar Halide[2], Asma Amaliah[3]

[1,2,3] Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Correspondent Author: sandryones@poliupg.ac.id

***Abstract* — Growing demand for data capacity drives the exploration of the sub-THz spectrum between 100-300 GHz for 6G networks. HAPS operating at altitudes of 20-50 km offers a non-terrestrial option for high-capacity links. This study examines architectural options for sub-THz based HAPS systems and identifies regulatory gaps in Indonesia. A qualitative literature review employing a descriptive analytical approach was conducted. Three architectural options were analysed: a single sub-THz feeder link, a multi-HAPS mesh with inter-platform links, and a hybrid architecture that combines a sub-THz feeder with a lower-frequency backup. Technical specifications were compared against tropical atmospheric constraints and the national licensing framework based on UU No. 36/1999 and PP No. 53/2000. The results indicate that all three options offer high capacity potential yet face severe molecular absorption and heavy rain attenuation in tropical regions. The hybrid option appears more realistic for Indonesia as it improves link availability. At the same time the national regulatory framework does not classify radio stations operating above 100 GHz and provides no allocation for sub-THz feeder or inter-platform links. Technical viability therefore depends on robust link design against tropical rain fade and on licensing rules capable of accommodating the selected architecture.**

Keyword — HAPS, Non-Terrestrial Network, Regulatory Gap, Sub-THz Spectrum, Tropical Rain Attenuation

Abstrak — Kebutuhan kapasitas data yang meningkat mendorong eksplorasi spektrum sub-THz antara 100-300 GHz untuk jaringan 6G. HAPS pada ketinggian 20-50 km menawarkan opsi non-terestrial untuk konektivitas berkapasitas tinggi. Kajian ini menelaah opsi arsitektur sistem HAPS berbasis sub-THz serta mengidentifikasi celah regulasi di Indonesia. Metode yang digunakan adalah studi literatur kualitatif dengan pendekatan deskriptif analitis. Tiga opsi arsitektur dikaji yaitu *feeder link* tunggal sub-THz jaringan antar-HAPS dengan konektivitas silang dan arsitektur hibrida yang menggabungkan *feeder* sub-THz dengan cadangan pita lebih rendah. Spesifikasi teknis dibenturkan dengan batasan atmosfer tropis dan kerangka perizinan nasional berdasarkan UU No. 36 Tahun 1999 serta PP No. 53 Tahun 2000. Hasil menunjukkan bahwa ketiga opsi memiliki potensi kapasitas tinggi tetapi menghadapi serapan molekuler dan redaman hujan yang berat di wilayah tropis. Opsi hibrida tampak lebih realistis untuk Indonesia karena meningkatkan ketersediaan *link*. Di sisi lain kerangka regulasi nasional belum mengklasifikasikan stasiun radio di atas 100 GHz dan belum menyediakan alokasi untuk *feeder* maupun *link* antar-platform sub-THz. Kelayakan teknis bergantung pada desain *link* yang tangguh terhadap redaman hujan tropis serta aturan perizinan yang mampu mengakomodasi arsitektur yang dipilih.

Kata kunci — HAPS, Jaringan Non-Terestrial, Celah Regulasi, Spektrum Sub-THz, Redaman Hujan Tropis

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan kapasitas data terus meningkat dan mendorong pergeseran arsitektur jaringan menuju generasi keenam. Pita di bawah 6 GHz hingga gelombang milimeter sudah banyak dimanfaatkan sehingga ruang spektrum yang tersisa semakin sempit. Kondisi itu mendorong eksplorasi spektrum sub-THz pada rentang 100 GHz sampai 300 GHz. Pita ini menjanjikan lebar pita yang sangat besar dan memungkinkan laju data mencapai orde terabit per detik.

Infrastruktur terestrial memiliki batas jangkauan dan biaya yang tinggi terutama di wilayah dengan topografi sulit. High-Altitude Platform Station (HAPS) yang beroperasi di ketinggian 20-50 km menjadi alternatif yang menarik untuk dikaji lebih jauh. Hal ini telah disampaikan dalam hasil *World Radiocommunication Conference* tahun 2019 (WRC-19) [1] serta diperkuat dalam hasil *World Radiocommunication Conference* tahun 2023 (WRC-23) [2]. Platform ini dapat berfungsi sebagai stasiun relai atau tulang punggung nirkabel [3], [4]. Integrasi HAPS dengan spektrum sub-THz membuka peluang untuk konektivitas jaringan berkapasitas besar serta interkoneksi antar-platform di stratosfer [5].

Penerapan spektrum sub-THz pada HAPS menghadapi tantangan propagasi yang berat. Gelombang pada frekuensi ini mengalami redaman molekuler oleh uap air dan oksigen. Curah hujan yang tinggi di wilayah tropis khususnya pada wilayah Indonesia, ikut mempengaruhi kondisi tersebut [6], [7]. Redaman hujan dapat memutus konektivitas jaringan antara stasiun bumi dan platform stratosfer dalam waktu singkat. Pemahaman perilaku fisik terhadap koneksi jaringan ini menjadi syarat penting sebelum spesifikasi teknis dirancang.

Wilayah Indonesia memiliki karakteristik geografis yang memperkuat urgensi pemanfaatan arsitektur non-terestrial dalam pemanfaatan spektrum frekuensi guna memperkuat pemerataan *broadband* khususnya pada daerah-daerah tertentu. Negara kepulauan, seperti Indonesia yang memiliki ribuan pulau tersebar, menyebabkan terhambatnya pembangunan infrastruktur serat optik dan menara seluler di seluruh wilayah menjadi sangat mahal dan lambat dari segi waktu. Banyak daerah terpencil masih bergantung pada koneksi satelit yang memiliki latensi tinggi dan kapasitas terbatas. Dari sinilah, HAPS dapat menjadi solusi alternatif dalam menjembatani keterbatasan tersebut. Namun keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada ketersediaan spektrum yang mampu menopang lalu lintas data dalam skala dan jumlah yang besar. Spektrum sub-THz

menawarkan kapasitas tersebut tetapi hanya jika konektivitas jaringan dirancang dengan memperhitungkan kondisi atmosfer tropis secara tepat dan cermat [8].

Di tingkat global, identifikasi spektrum di atas 100 GHz masih dalam tahap awal melalui forum radiokomunikasi internasional. Hasil WRC-23 lebih banyak membahas pita gelombang mikro dan belum memberikan kerangka yang lengkap untuk operasional HAPS pada pita sub-THz [2]. Di Indonesia, kerangka hukum masih berpusat pada alokasi pita konvensional yaitu Undang-Undang (UU) No. 36 Tahun 1999 [9] dan Peraturan Pemerintah (PP) No. 53 Tahun 2000 [10] dimana belum adanya aturan yang mengatur secara spesifik klasifikasi stasiun radio udara pada frekuensi di atas 100 GHz. Belum tersedianya tabel alokasi spektrum nasional, dapat menjadi catatan penting bagi instansi terkait dalam mengatur sprektrum khususnya sub-THz.

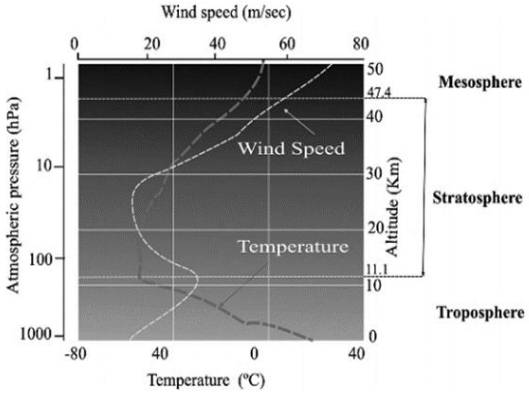
Kekosongan regulasi ini tidak hanya bersifat administratif tetapi terkait dengan perizinan. Tanpa klasifikasi perizinan yang jelas pengembang teknologi dan operator telekomunikasi akan menghadapi ketidakpastian hukum dalam uji coba maupun operasional sistem HAPS berbasis sub-THz di masa mendatang. Ketidakpastian tersebut dapat memperlambat investasi dan inovasi di dalam negeri, sementara itu negara lain telah memulai memetakan spektrum ekstrem untuk jaringan non-terestrial. Jika Indonesia terlambat menyiapkan landasan dan payung hukum, maka peluang pemanfaatan teknologi berkapasitas tinggi di lapisan stratosfer akan menjadi sulit. Kajian ini disusun untuk memetakan celah tersebut secara sistematis, dan menjadi pondasi jangka panjang dalam penentuan arah kebijakan penggunaan spektrum di Indonesia.

Kajian ini bertujuan mengisi kekosongan literatur domestik dimana fokus tinjauan bertumpu pada arsitektur *link* HAPS berbasis sub-THz serta analisis celah regulasi untuk kebutuhan pemerataan *broadband* di Indonesia. Studi yang ada sebelumnya, pada umumnya masih membahas HAPS pada pita seluler konvensional serta pita penggunaan HAPS dalam jalur komunikasi seperti *uplink*/*downlink* maupun sebagai *link backhaul*. Tulisan ini mengambil arah berbeda dengan menempatkan batasan iklim tropis dan kekosongan perizinan sebagai titik kritis. Hasilnya diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan teknis bagi perumusan kebijakan tata kelola spektrum di masa depan.

II. KAJIAN PUSTAKA

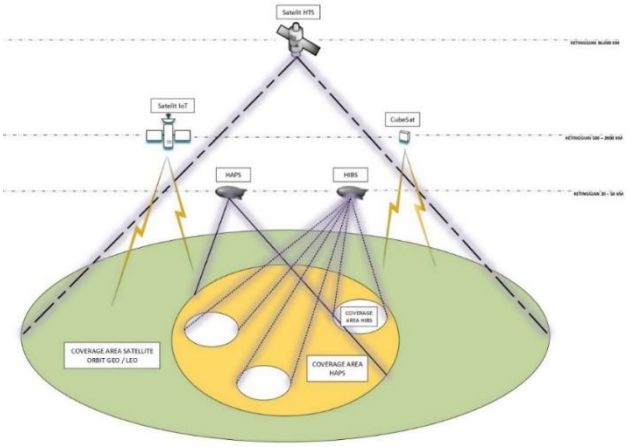
A. High-Altitude Platform Station (HAPS)

HAPS merupakan infrastruktur telekomunikasi layer ketiga setelah seluler dan satelit, dimana platform ini ditempatkan pada lapisan stratosfer dengan ketinggian operasional berada pada rentang 20-50 km di atas permukaan bumi [11], [12], [13]. Pada ketinggian tersebut kecepatan angin relatif rendah sehingga platform dapat menjaga posisinya dengan lebih stabil dibanding lapisan troposfer. Dinamika cuaca ekstrem dan pembentukan awan sebagian besar terjadi di bawah ketinggian tersebut sehingga hal ini menjadi satu keuntungan tersendiri. Karakteristik fisik ini menjadikan stratosfer cocok untuk penempatan stasiun relai ataupun sebagai stasiun pangkalan komunikasi nirkabel secara lebih stabil dan terkontrol [12], [13].



Gambar 1. Kecepatan Angin dan Temperatur pada Lapisan Stratosfer

Keunggulan utama HAPS terletak pada kemudahan penyebaran dan biaya operasional yang lebih rendah dibanding konstelasi satelit pada umumnya. Platform dapat dikerahkan dalam waktu yang relatif singkat dan dapan dipindahkan ataupun digeser sesuai kebutuhan cakupan. Selain itu, latensi komunikasi yang lebih rendah karena jarak ke permukaan bumi jauh lebih dekat dibanding satelit geostasioner membuat platform HAPS lebih mudah untuk dikendalikan. Namun platform ini tetap memiliki keterbatasan daya muat serta stabilitas dalam jangka panjang. Faktor angin stratosfer dan kondisi termal harus diperhitungkan dalam desain sistem agar *link* komunikasi tetap andal [12], [13]. Gambar 1 memperlihatkan ketinggian operasional HAPS terhadap kecepatan angin relatif rendah dan suhu stabil sehingga platform dapat menjaga posisi dengan lebih baik dibanding lapisan troposfer.



Gambar 2. Ilustrasi *Coverage* Area dari Platform Ruang Udara Berdasarkan Ketinggian

Terdapat dua jenis platform utama dapat beroperasi di stratosfer, yaitu aerostatik dan aerodinamik. Platform aerostatik mampu membawa muatan yang lebih berat sekitar

1000 kg dan menawarkan perawatan yang relatif mudah, tetapi stabilitasnya sensitif terhadap angin kencang. Platform aerodinamik lebih ringan dan lebih murah dioperasikan dalam kondisi turbulen, namun hanya mampu membawa muatan jauh lebih kecil yaitu kurang dari 100 kg serta memiliki daya power yang terbatas [12], [13], [14].

Karakteristik ketinggian operasional juga memengaruhi pola cakupan. Satu platform HAPS dapat mencakup wilayah yang jauh lebih luas dibanding stasiun pangkalan terestrial biasa. Cakupan yang luas tersebut menuntut manajemen interferensi yang ketat terutama jika beberapa platform beroperasi berdekatan, dimana desain sistem harus menyeimbangkan antara luas cakupan dan keandalan *link* agar manfaat kapasitas tinggi tidak hilang oleh gangguan antar-platform. Gambar 2 menunjukkan cakupan variasi antara satelit, satelit IoT, cubesat, dan platform HAPS, dimana masing-masing platform memiliki batasan coverage yang berbeda-beda [14].

B. Hasil World Radiocommunication Conference 2023

Kerangka regulasi internasional untuk jaringan non-terestrial terus berkembang melalui sidang konferensi radiokomunikasi di tingkat global. Hasil WRC-23 menghasilkan beberapa kesepakatan terkait operasional HAPS. Walau demikian, sebagian besar keputusan masih berfokus pada identifikasi spektrum gelombang mikro dan pita di bawah 100 GHz [2]. Hasil sidang terakhir tahun 2023 tersebut belum menyediakan atau adanya kesepakatan aturan alokasi spektrum yang terstruktur untuk operasional HAPS pada pita frekuensi ekstrem.

Kondisi ini menunjukkan bahwa regulasi spektrum global bergerak lebih lambat dibanding perkembangan perangkat keras. Perangkat yang mampu beroperasi di atas 100 GHz sudah mulai dikembangkan di beberapa laboratorium. Namun tanpa kerangka alokasi yang jelas penggunaan spektrum tersebut masih terbatas pada uji coba terbatas. Kesenjangan antara kemajuan teknologi dan kesiapan regulasi menjadi alasan pentingnya kajian antisipatif. Tanpa pemetaan dini dari negara-negara yang ingin memanfaatkan spektrum sub-THz, kelak akan menghadapi ketidakpastian dalam perencanaan jangka panjang dalam pemanfaatan teknologi pada rentang frekuensi sub-THz.

Ketiadaan resolusi khusus untuk pita sub-THz pada WRC-23 [2], juga memperlihatkan bahwa komunitas internasional masih memprioritaskan pemanfaatan spektrum yang sudah lebih matang secara teknis. Keputusan ini jelas dapat dipahami secara lebih seksama, terkhusus dari sisi kehati-hatiannya, dan sekaligus menunda kepastian bagi negara yang ingin menyiapkan ekosistem lebih awal. Indonesia perlu membaca celah ini sebagai kesempatan untuk menyusun posisi nasional sebelum kerangka global menjadi lebih mengikat.

C. Frekuensi Sub-THz

Spektrum sub-THz mencakup rentang 100 GHz sampai 300 GHz. Lebar pita yang tersedia sangat besar dan memungkinkan laju transmisi data mencapai orde terabit per detik. Kapasitas ini jauh melampaui kemampuan pita gelombang milimeter yang saat ini banyak digunakan. Namun kendala utama terletak pada perambatan gelombang yang sangat rentan terhadap redaman atmosfer [15].

Molekul oksigen dan uap air menyerap energi elektromagnetik secara signifikan pada frekuensi tersebut. Di wilayah tropis dengan kelembapan tinggi dan curah hujan intensif redaman ini menjadi lebih parah [7], [16], dimana *link* komunikasi dapat terputus dalam waktu yang relatif singkat ketika hujan lebat terjadi. Perhitungan *fade margin* haruslah memperhitungkan faktor degradasi cuaca secara tepat dan cermat. Tanpa perencanaan yang memadai, maka keandalan sistem akan sulit dijaga terutama untuk konektivitas jaringan yang membutuhkan tingkat *availability* yang tinggi.

Redaman atmosfer pada pita sub-THz tidak bersifat seragam di seluruh rentang frekuensi. Terdapat jendela spektrum tertentu yang relatif lebih bersih namun tetap memerlukan perhitungan yang teliti. Di Indonesia pola curah hujan yang tinggi sepanjang tahun membuat pemilihan jendela tersebut menjadi lebih terbatas. Desain sistem harus mempertimbangkan kemungkinan penggunaan frekuensi cadangan pada pita yang lebih rendah untuk menjaga kontinuitas layanan [8].

D. Model Implementasi Spektrum Sub-THz pada HAPS

Spektrum sub-THz tidak dirancang untuk akses langsung ke perangkat pengguna di permukaan bumi. Karakteristik propagasi yang buruk dapat membuat sinyal sulit mencapai terminal yang bersifat *mobile*. Penggunaannya harus disesuaikan untuk konektivitas jaringan berkapasitas besar antara stasiun pengendali bumi dan platform HAPS [5]. *Link* ini berfungsi sebagai jalur utama yang menyalurkan lalu lintas data dari dan menuju jaringan inti.

Selain itu frekuensi ini dapat dipakai sebagai *backbone* nirkabel untuk interkoneksi antar-platform di stratosfer. Konektivitas silang tersebut memungkinkan pembentukan jaringan stratosfer yang mencakup area geografis luas. Struktur jaringan seperti ini dapat mengurangi ketergantungan pada infrastruktur serat optik di darat. Namun desain antena dan sistem *tracking* harus sangat presisi karena lebar berkas pada frekuensi tinggi sangat sempit dimana setiap pergeseran posisi platform dapat menurunkan kualitas *link* secara drastis [17], [18].

Model implementasi ini menuntut koordinasi yang ketat antara segmen bumi dan segmen udara. Stasiun pengendali bumi harus memiliki kemampuan *tracking* yang akurat serta cadangan daya yang cukup untuk mengkompensasi redaman yang ada. Di sisi platform, keterbatasan daya dan bobot akan membatasi pemilihan perangkat keras yang dapat dibawa. Kedua batasan tersebut harus diperhitungkan secara bersamaan agar arsitektur tetap realistis untuk diterapkan di wilayah tropis.

Pada siaran pers yang diadakan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) [14], dimana disampaikan bahwa peluang pengembangan teknologi THz di masa depan masih sangat terbuka lebar. Meskipun, saat ini teknologi ini belum

banyak digunakan secara luas. Senada dengan itu, BRIN juga menyoroti penggunaan teknologi 6G yang menyentuh ranah sub-THz yang sementara dikebut sebagai media implementasi dari perkembangan teknologi cerdas masa depan [19] dalam upaya mempersiapkan jaringan teresterial yang kelak terhubung dengan platform HAPS di statosfer.

E. Celah Regulasi Nasional

Kerangka perizinan frekuensi di Indonesia masih bertumpu pada UU No. 36 Tahun 1999 [9] dan PP No. 53 Tahun 2000 [10], dimana kedua instrumen hukum tersebut disusun pada masa ketika spektrum di atas 100 GHz belum menjadi perhatian utama. Hal ini, mengakibatnya klasifikasi stasiun radio udara yang beroperasi pada pita ekstrem belum didefinisikan.

Celah regulasi haruslah mencakup aspek teknis yang lebih rinci. Belum ada ketentuan mengenai batas daya pancar yang diizinkan pada pita ekstrem maupun mekanisme koordinasi interferensi antar-platform. Ketentuan mengenai perizinan stasiun bumi yang mendukung konektivitas jaringan sub-THz juga belum tersedia. Tanpa pengaturan yang lebih detail proses uji coba dan operasional akan berjalan tanpa kepastian regulasi yang memadai.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif analitis. Pendekatan kualitatif dipilih karena pernyataan penelitian ini berfokus pada kesesuaian antara kebutuhan teknis arsitektur HAPS sub-THz dengan kerangka regulasi yang berlaku. Analisis komparatif dilakukan dengan memetakan spesifikasi operasional konektivitas jaringan dan inter-platform *link* terhadap klasifikasi stasiun serta tabel alokasi spektrum nasional. Pemetaan ini memungkinkan identifikasi celah secara sistematis tanpa memerlukan pengukuran lapangan. Lingkup kajian dibatasi pada level konseptual dan kebijakan karena data pengukuran propagasi sub-THz di Indonesia masih sangat terbatas. Oleh karena itu hasil yang diharapkan berupa argumen posisi dan rekomendasi arah regulasi, bukan pada hasil prediksi kuantitatif yang berbasis data analitik.

Sumber data mencakup publikasi standar ITU-R [20] terkait pedoman propagasi pada pita sub-THz serta laporan hasil WRC [1], [2]. Data regulasi diambil dari UU No. 36 Tahun 1999 [9] dan PP No. 53 Tahun 2000 [10]. Dokumen-dokumen tersebut dipilih karena menjadi rujukan utama dalam penataan spektrum dan perizinan stasiun radio di Indonesia.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa arsitektur *link* HAPS berbasis spektrum sub-THz memiliki potensi kapasitas yang sangat besar namun menghadapi batasan fisik khususnya di wilayah tropis. Spektrum pada rentang 100 GHz sampai 300 GHz pada dasarnya menyediakan lebar pita yang memungkinkan laju data orde terabit per detik. Namun karakteristik propagasi gelombang pada frekuensi tersebut sangat sensitif terhadap serapan molekuler oleh uap air dan oksigen [15]. Di Indonesia kelembapan udara yang tinggi sepanjang tahun memperkuat redaman tersebut. Akibatnya *fade margin* harus dirancang jauh lebih besar dibanding perhitungan di wilayah beriklim sedang.

Tantangan paling kritis muncul dari redaman hujan. Curah hujan lebat yang sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia dapat menurunkan level sinyal secara drastis dalam waktu yang relatif sangat singkat [7], [16]. *Feeder link* antara stasiun bumi dan platform HAPS berisiko terputus total ketika kapasitas hujan mencapai intensitas yang tinggi. Kondisi ini berbeda dengan *link* pada pita gelombang mikro yang relatif lebih tahan (*resilience*) terhadap hujan. Oleh karena itu desain sistem harus mempertimbangkan skema diversitas atau *link* cadangan (*redundancy*) pada frekuensi lebih rendah agar ketersediaan layanan tetap terjaga [8].

Dari sisi arsitektur topologi spektrum sub-THz lebih sesuai digunakan sebagai *feeder link* dan interkoneksi antar-platform daripada akses langsung ke pengguna [5]. Lebar berkas antena pada frekuensi tinggi sangat sempit sehingga *tracking* posisi platform harus sangat presisi. Setiap pergeseran kecil akibat angin stratosfer dapat menurunkan kualitas koneksi layanan secara signifikan [17], [18]. Interkoneksi antar-HAPS membuka peluang pembentukan jaringan stratosfer yang mencakup wilayah luas. Namun skema ini tetap menuntut koordinasi frekuensi dan manajemen interferensi yang ketat antar-platform.

Tinjauan arsitektur dimulai dari opsi konektivitas jaringan tunggal berbasis sub-THz. Satu stasiun bumi dihubungkan langsung ke satu platform HAPS menggunakan pita sub-THz sebagai jalur *backhaul* utama dimana arsitektur seperti ini mampu memanfaatkan lebar pita besar untuk mendukung transportasi laju data yang tinggi [7]. Namun pada wilayah tropis redaman hujan dapat menurunkan level sinyal secara drastis [8]. Ketersediaan *link* menjadi sangat bergantung pada *fade margin* yang jauh lebih besar. Lebar berkas antena yang sempit juga menuntut sistem *tracking* posisi yang presisi [18]. Dari sisi regulasi skema ini belum memiliki dasar hukum karena UU No. 36 Tahun 1999 [9] dan PP No. 53 Tahun 2000 [10] tidak mengatur klasifikasi stasiun radio udara di atas 100 GHz [11], [12].

Opsi kedua adalah arsitektur jaringan antar-HAPS (*inter-HAPS link*). Beberapa platform dihubungkan melalui *link* konstelasi sub-THz sehingga membentuk jaringan stratosfer yang mencakup wilayah lebih luas [7]. Skema ini mengurangi ketergantungan pada infrastruktur serat optik di darat. Namun *beamwidth* yang sempit dan *path loss* yang tinggi membuat koordinasi frekuensi serta manajemen interferensi menjadi kritis [17], [18]. Di iklim tropis putusnya satu konektivitas silang akibat hujan lebat dapat merambat ke seluruh jaringan jika tidak disediakan mekanisme cadangan (*redundancy*). Kerangka perizinan nasional juga belum menyediakan ketentuan mengenai

koordinasi interferensi antar-platform maupun batas daya pancar untuk konektivitas silang pada pita ekstrem.

Opsi ketiga yang lebih realistis untuk kondisi Indonesia adalah arsitektur hibrida. *Feeder link* utama tetap menggunakan sub-THz sementara pita frekuensi lebih rendah disiapkan sebagai cadangan ketika redaman hujan melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Pendekatan ini meningkatkan ketersediaan layanan. Desain antena dan sistem *switching* harus mampu berpindah frekuensi secara cepat dan adaptif. Dari sisi regulasi, opsi hibrida menuntut alokasi spektrum sub-THz untuk *feeder* utama sekaligus kejelasan perizinan untuk penggunaan pita cadangan. Kedua kebutuhan tersebut juga belum tertuang dalam tabel alokasi spektrum nasional maupun dalam klasifikasi stasiun yang diatur peraturan yang berlaku [11], [12].

Secara keseluruhan tinjauan terhadap ketiga opsi arsitektur, memperlihatkan pola yang sama. Setiap opsi memiliki potensi kapasitas tinggi tetapi terbentur batasan propagasi tropis yang memaksa penambahan kompleksitas teknis berupa diversitas frekuensi. Di saat yang sama, kerangka regulasi nasional belum menyediakan landasan untuk mengizinkan stasiun yang beroperasi pada pita di atas 100 GHz maupun untuk mengatur koordinasi antar-platform. Hasil WRC-23 [2] masih berfokus pada pita di bawah 100 GHz sehingga belum memberikan payung regulasi internasional yang dapat langsung diadopsi secara langsung [4]. Kelayakan pemanfaatan spektrum sub-THz untuk sistem HAPS di Indonesia masih ditentukan oleh kesiapan kerangka perizinan yang mampu mengakomodasi karakteristik teknis arsitektur yang dipilih.

Temuan ini menegaskan bahwa tinjauan arsitektur tidak dapat dipisahkan dari analisis celah regulasi. Tanpa kejelasan klasifikasi stasiun dan alokasi spektrum setiap opsi arsitektur yang dibahas tetap berada pada tingkat konsep dan sulit diuji secara operasional di dalam negeri.

V. KESIMPULAN

Kajian ini memperlihatkan bahwa arsitektur HAPS berbasis spektrum sub-THz menawarkan kapasitas konektivitas yang besar namun menghadapi batasan fisik yang keras di wilayah tropis Indonesia. Tiga opsi arsitektur telah ditinjau. Opsi pertama yaitu konektivitas jaringan tunggal memanfaatkan lebar pita sub-THz secara penuh tetapi sangat rentan terhadap putusnya konektivitas saat hujan lebat. Opsi kedua yaitu jaringan antar-HAPS memperluas cakupan melalui konektivitas silang namun menuntut koordinasi frekuensi dan manajemen interferensi yang ketat. Opsi ketiga yaitu hibrida yang menggabungkan *feeder* sub-THz dengan cadangan pita lebih rendah memberikan ketersediaan layanan yang lebih baik dan tampak lebih sesuai dengan kondisi curah hujan tropis.

Ketiga opsi menghadapi kendala yang sama dari sisi regulasi. UU No. 36 Tahun 1999 dan PP No. 53 Tahun 2000 belum mengatur klasifikasi stasiun radio udara pada pita di atas 100 GHz. Tabel alokasi spektrum nasional juga belum menyediakan peruntukan untuk *feeder link* maupun *link* antar-platform sub-THz. Tanpa landasan perizinan yang jelas setiap opsi arsitektur tetap sulit diuji secara operasional di dalam negeri.

Kelayakan pemanfaatan spektrum sub-THz untuk sistem HAPS di Indonesia bergantung pada dua syarat. Pertama adalah kemampuan merancang *link* yang tangguh terhadap redaman atmosfer tropis. Kedua terkait ketersediaan kerangka perizinan yang mengatur klasifikasi stasiun dan alokasi spektrum secara eksplisit. Kajian ini menempatkan pemetaan opsi arsitektur dan celah regulasi sebagai langkah awal sebelum penyusunan aturan yang lebih rinci.

DAFTAR ACUAN

[1] ITU, "World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19): Provisional Final Acts," Sharm El-Sheikh, Egypt, 2019. [Online]. Available: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/12/01/R12010000014A01PDFE.pdf

[2] ITU, "World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23) – Final Acts," ITU Publisher, 2023. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.16-2024-PDF-E.pdf

[3] S. Palinggi, M. Mimsyad, and Y. George Yefri Lely, "Kajian Komparasi Regulasi Terhadap Skenario Arsitektur HIBS pada AWG-25 untuk Indonesia Berdasarkan WRC-23," in *Seminar Nasional Hasil Riset dan Pengabdian (SNHRP)*, 2026, pp. 1–8. [Online]. Available: https://snhrp.unipasby.ac.id/prosiding/index.php/snhrp/issue/view/8/

[4] Republic of Indonesia, "APT Report on Technical and Operational Analysis for Using High Altitude Platform Station as IMT Base Stations (HIBS) in the Frequency Bands Below 2.7 GHz Identified for IMT," Tangerang, Indonesia, AWG-25/OUT-10 (Rev.1), 2019.

[5] K. Tamesue, S. H. Myint, K. Jitsuno, T. Sato, T. Sato, and T. Kawanishi, "Scheme Design for High-Throughput Terahertz Feeder Link in Non-Terrestrial-Networks," *J. Adv. Simul. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: 10.15748/jasse.11.1.

[6] D. Chakraborty, S. D. Nair, and M. Mukherjee, "Rain-Based Attenuation and Dispersion Characteristics of Terahertz Wave in Tropical Climate: Experimentally Verified Reliability Study," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 36605–36617, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3265468.

[7] C. Sudhamani *et al.*, "Effects of Atmospheric Gases and Rain Intensity on Terahertz Wave Propagation in 6G Wireless Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 142, no. 1–2, pp. 263–286, May 2025, doi: 10.1007/s11277-025-11807-2.

[8] I. Shayea, T. Abd. Rahman, M. Hadri Azmi, and A. Arsad, "Rain attenuation of Millimetre Wave above 10 GHz for Terrestrial Links in Tropical Regions," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 29, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.1002/ett.3450.

[9] DPR-RI, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 36 Tahun 1999 tentang Telekomunikasi*. 1999.

[10] Presiden RI, *Peraturan Pemerintah Nomor 53 Tahun 2000 Tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio Dan Orbit Satelit*. 2000.

[11] S. Palinggi, "Analisis Interferensi Antara HAPS Layanan Bergerak Dengan Jaringan IMT-2020 (5G) Pada Pita Frekuensi 700 MHz," Institut Teknologi Bandung, 2020. [Online]. Available: https://digilib.itb.ac.id/gdl/view/52303/sandryones?rows=1&per_page=2

[12] A. Aragón-Zavala, J. L. Cuevas-Ruíz, and J. A. Delgado-Penín, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

[13] D. Grace and M. Mohorcic, *Broadband Communications via High Altitude Platform Stations*, First. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

[14] S. Palinggi and A. Lande, "Overview Teknologi Ruang Udara Masa Depan dalam Teori, Regulasi dan Terapannya di Indonesia," in *Seminar Nasional (SEMNAS) Hasil Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun 2021*, 2021, pp. 436–446. [Online]. Available: https://conference.usm.ac.id/index.php/semnas_lppm/semnas2021/paper/view/11

[15] Z. Yang, W. Gao, and C. Han, "A Universal Attenuation Model of Terahertz Wave in Space-Air-Ground Channel Medium," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 5, pp. 2333–2342, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3386759.

[16] D. Chakraborty and M. Mukherjee, "Terahertz Window Frequency Signal Attenuation and Dispersion Characteristics in Tropical Climate Zone: An Experimentally Validated Reliability Analysis," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54773–54783, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3170480.

[17] H. Kitanozono *et al.*, "Development of High Altitude Platform Station Backhaul System Using 38GHz Band Frequency," in *2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, IEEE, Aug. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/APWCS50173.2021.9548757.

[18] C. Xiangchun, H. Jianhong, and F. Jieqing, "Propagation Modeling and Characteristic Analysis of Terahertz waves via High Altitude Platforms," *China Commun.*, vol. 21, no. 12, pp. 126–138, Dec. 2024, doi: 10.23919/JCC.ea.2022-0396.202401.

[19] A. Tirtana, "BRIN Kembangkan Teknologi Jaringan 6G Berbasis Sub-Terahertz," Validnews.id. [Online]. Available: https://validnews.id/kultura/brin-kembangkan-teknologi-jaringan-g-berbasis-sub-terahertz

[20] ITU-R, "Radio Regulations Vol.1 Edition of 2024," in *ITU Publications*, 2024. [Online]. Available: https://www.itu.int/pub/R-REG-RR