

# UAV sebagai Infrastruktur Jaringan Seluler pada Keadaan Darurat

Muhammad Jody Al Fawwaz dan Wirawan

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* wirawan@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Pertukaran informasi di suatu daerah bencana harus dapat bergerak lebih cepat untuk membantu proses pemulihan pasca bencana sehingga kebutuhan bagi para korban dapat dipenuhi secara efisien. Pada jalur komunikasi seluler terdapat limitasi dikarenakan dapat dipengaruhi dengan kondisi bencana seperti pemadaman listrik hingga kerusakan pada *base station* akibat bencana. Sehingga dibutuhkan suatu teknologi yang dapat memungkinkan adanya telekomunikasi efektif saat pasca bencana. Pada penelitian ini dirancang dua model arsitektur *aerial relay node* (ARN) berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). ARN digunakan untuk menyediakan jalur komunikasi pada suatu daerah bencana dengan cara meneruskan data yang diterima dari *User Equipments* (UEs) yang dijangkau dan diteruskan ke *macro base station* (MBS) terdekat dan sebaliknya. Model pertama menggunakan *relay node* berjenis *amplify-and-forward* (AF) dimana menggunakan jaringan generasi ke-4 4G LTE/LTEA pada jaringan *fronthaul* (ARN-MBS) dan jaringan akses (ARN-UEs). Model tersebut secara umum bekerja sebagai suatu *repeater* atau *amplifier*. Sementara untuk model kedua, ARN dengan jenis *decode-and-forward* (DF) bekerja sebagai seperti suatu *mobile hotspot* dimana digunakan 4G LTE/LTEA pada jaringan *fronthaul* dan wifi 802.11n pada jaringan aksesnya. Pada penelitian ini, Desa Sumbermujur dengan area seluas 16 km<sup>2</sup> dijadikan sebagai objek penelitian. Terdapat tiga parameter utama yang akan diteliti pada kedua model tersebut yakni ketinggian optimum ARN, jarak maksimum antara ARN dengan MBS, dan yang terakhir adalah jangkauan maksimum dari ARN. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa ketinggian optimum dari ARN-AF dan ARN-DF berada pada ketinggian maksimum yaitu 150 meter. Selanjutnya untuk jarak maksimum antara ARN-AF dengan MBS adalah sejauh 11 kilometer dan 8,5 kilometer untuk ARN-DF dengan MBS. Dari segi jangkauan, ARN-AF mampu menjangkau 100% objek penelitian yakni Desa Sumbermujur dengan area seluas 16 km<sup>2</sup> sementara ARN-DF hanya mampu menjangkau 3,349% area dari Desa Sumbermujur.

**Kata Kunci**—Aerial Relay Node, Amplify-and-Forward, Bencana, Decode-and-Forward, UAV.

## I. PENDAHULUAN

KEJADIAN bencana alam belakangan ini menunjukkan pentingnya peran infrastruktur komunikasi dalam menyandang layanan kritikal seperti operasi pemulihan darurat, pemulihan infrastruktur, pengawasan pasca bencana dan sebagainya [1]. Proses pertukaran informasi harus dapat bergerak lebih cepat dalam proses pemulihan pasca bencana sehingga kebutuhan-kebutuhan bagi para korban maupun tim penyelamat dapat dipenuhi secara efisien. Sosial media dapat membantu dalam menghubungkan teman, keluarga, responden, dan juga orang yang dapat memberikan bantuan. Namun, media sosial itu sendiri juga memiliki limitasi dikarenakan dapat dipengaruhi dengan kondisi bencana yang dimana terdapat pemadaman listrik yang mengganggu jaringan seluler [2]. Jaringan nirkabel dan seluler yang sudah ada tidak akan mampu memenuhi kebutuhan QoS dalam

keadaan darurat [3]. Sehingga dibutuhkan suatu teknologi yang dapat memungkinkan adanya telekomunikasi efektif saat pasca bencana.

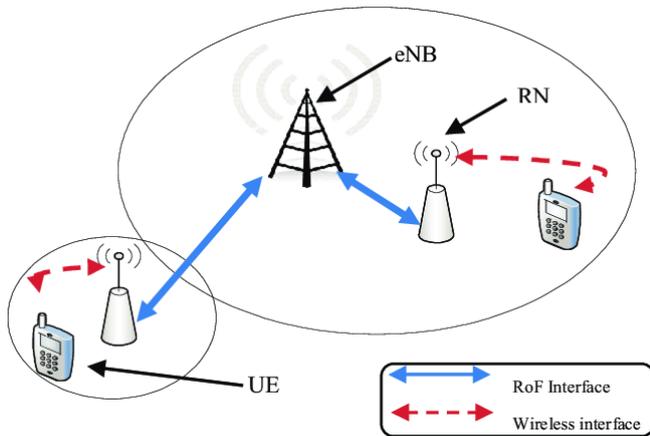
Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau secara umum dikenal sebagai drone saat ini sedang mengalami perkembangan pesat pada pengaplikasiannya dikarenakan meningkatnya kapasitas muatan dan juga daya [4]. UAV pertama kali dikembangkan untuk keperluan militer seperti pengawasan dan juga pengintaian lalu merambat ke sektor sipil seperti pembuatan film, pengawasan agrikultur, smart city, dsb [5]. Seiring dengan berkembangnya jaringan nirkabel, UAV dengan transceiver dapat bekerja sebagai relay node suatu jaringan seluler dengan ketinggian rendah yang terintegrasi dengan arsitektur jaringan yang sudah ada [6]. Suatu UAV yang bekerja sebagai *relay* dapat menyediakan layanan jangkauan on-demand (3GPP Technical Report 22.829). Dikarenakan pemasangan dan juga infrastruktur yang relatif lebih sederhana, UAV sebagai ARN menjadi salah satu pilihan yang memungkinkan untuk menjadi *access point* sementara apabila terjadi kerusakan pada infrastruktur komunikasi terestial ataupun peningkatan fluktuatif dari user equipment (parade, konser, stadion) pada suatu tempat.

Penggunaan UAV sebagai ARN yang telah disebutkan sebelumnya memiliki arsitektur yang berbeda-beda. Sudah terdapat banyak literatur penelitian pada arsitektur jaringan ARN seperti karakterisasi kanal, analisa penggunaan daya, peletakan, *fronthauling*, *backhauling*, dan optimasi mobilitas [7]. Secara langsung perbedaan tersebut menyebabkan kelebihan dan kekurangan yang berbeda-beda untuk masing-masing ARN. Salah satu hal yang menentukan performansi dari ARN tersebut adalah model sistem yang diterapkan. Penelitian pada penggunaan infrastruktur jaringan seluler yang sudah ada seperti GPRS/EDGE, UMTS, HSPA+, LTE dan juga LTE-A pada model sistem ARN masih cukup kurang [8]. Setiap jaringan tersebut akan berpengaruh pada parameter performansi *Quality of Service* (QoS). Melalui tugas akhir ini, akan dilakukan penelitian mengenai kinerja UAVsARN sebagai pelengkap pada infrastruktur jaringan seluler LTE/LTE-A dengan cara melakukan simulasi. Dari pengukuran yang telah dilaksanakan, akan dicermati jumlah perangkat yang dapat dilayani pada suatu daerah bencana. Hasil yang didapatkan dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan analisis mengenai kinerja UAV sebagai ARN pada daerah bencana, sehingga nantinya dapat dilakukan pengaplikasiannya saat keadaan darurat.

## II. DASAR TEORI

### A. Relay Node

Teknologi *Relay Node* (RN) diciptakan dikarenakan kurangnya kemampuan teknologi seluler 4G dalam



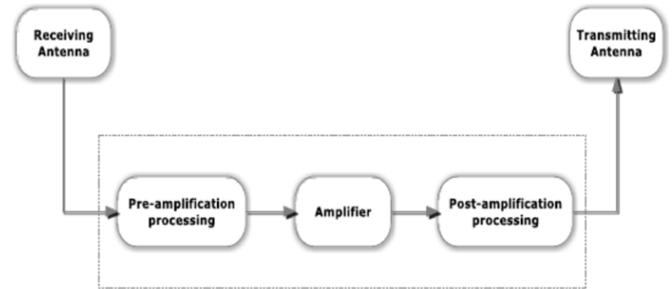
Gambar 1. Penggunaan relay node pada jaringan 4G.

memecahkan permasalahan mendasar seperti jangkauan dan juga kapasitas yang relatif kecil pada perbatasan *cell* yang disebabkan oleh rendahnya Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) [9]. Penggunaan *Relay Node* pada Jaringan 4G diberikan pada Gambar 1 [10]. Penggunaan RN pada tepi *cell* atau pun daerah yang tidak terjangkau dapat membantu dalam menaikkan kapasitas [11] dan juga memperluas jangkauan dari *cell* [12]. Secara umum, operasi dari RN terbagi menjadi 3 bagian yaitu *radio communication section* (RCS), *information recording section* (IRS), dan *information conveying section* (ICS). RCS berfungsi untuk transmisi dan penerimaan informasi, IRS untuk menyimpan informasi yang diterima, dan ICS berfungsi untuk menentukan destinasi penerima informasi.

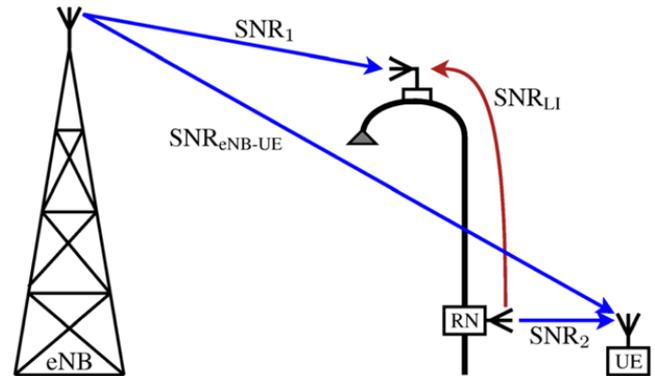
RN sendiri memiliki mode operasi dan jenis yang beragam. *Full duplex Amplify-and-Forward* (AF) masih sering digunakan sebagai pengisi celah, namun kebanyakan dari jenis RN ini tidak hanya memperkuat sinyal yang diinginkan tetapi juga interferensi dan *noise*. Sehingga masih sering RN dengan mode operasi AF digolongkan dengan *repeater*. Untuk RN jenis *Decode-and-Forward* (DF) membaca sinyal yang diterima lalu akan dilakukan pengkodean dan diteruskan sehingga *relay* jenis DF di lingkungan yang relatif lebih memiliki interferensi dan *noise* yang lebih besar. Namun hal ini membuat *relay* jenis DF membutuhkan sistem yang lebih kompleks.

Selain itu, dari segi mode operasi RN yang digunakan pada jaringan seluler generasi ke 4 umumnya dibagi menjadi dua. Pertama adalah RN jenis *inband*, dimana koneksi antara BS dengan RN menggunakan frekuensi pembawa yang sama dengan koneksi antara RN dengan UE. Umumnya, mode operasi ini digunakan pada jenis RN AF dimana sinyal yang didapatkan akan ditransmisikan lagi pada frekuensi yang sama juga. Sementara itu, RN jenis *outband* menggunakan frekuensi pembawa yang berbeda pada koneksi BS-RN dengan RN-UE. Sebagai contoh, RN dengan mode operasi *outband* akan meneruskan data atau informasi yang didapatkan dari BS menggunakan jaringan 4G dan meneruskannya ke UE dengan jaringan *wireless fidelity*. Sehingga perlu adanya pengkodean terlebih dahulu pada RN dengan mode operasi ini. Oleh karena itu RN dengan jenis DF akan tergolong pada RN dengan mode operasi *outband*.

Dikarenakan adanya *loop interference* yang terjadi pada RN *outband* [13] setiap RN yang melakukan transmisi dan juga penerimaan pesan pada pita frekuensi yang sama harus memiliki 2 antenna yang terpisah. Umumnya, sistem *outdoor-*



Gambar 2. Blok operasi *amplify-and-forward relay*.



Gambar 1. Sistem AF relay.

*to-indoor* diterapkan pada RN untuk mengisolasi kedua antenna tersebut, dimana antenna yang terhubung dengan *backhaul* diletakkan di luar bangunan dan antenna lainnya digunakan untuk menyediakan jangkauan *indoor*. Namun hal tersebut cukup mahal dan hanya mungkin dilakukan pada bangunan yang besar saja. Oleh karena itu terdapat alternatif lain dalam mengisolasi kedua antenna dengan cara membedakan properti direktivitas dari kedua antenna tersebut [14].

### B. Amplify-and-Forward

*Relay* jenis ini umumnya terdiri dari empat unit fungsional yang saling terhubung dan diilustrasikan pada Gambar 2 [15]. Antena *receiver* bertanggung jawab dalam menangkap sinyal yang lemah dan juga terdegradasi. Selanjutnya sinyal akan diteruskan pada tahap *pre-amplification* dimana meliputi *filtering*, *frequency multiplication*, *analog to digital conversion*, dan *feedback cancellation*. Sementara itu pada tahap *post-amplification* meliputi konversi analog, *filter*, dan redaman. Diantara kedua tahap ini, terdapat *amplifier* yaitu untuk menguatkan sinyal yang didapat.

Apabila AF diasumsikan dipasang pada suatu tiang lampu jalan, untuk memastikan kualitas yang baik pada *backhaul* maka digunakan antenna direktivitas yang tinggi dengan mengarah ke ENB sehingga terdapat jalur komunikasi LoS. Untuk antenna transmisi diletakkan pada titik yang lebih rendah dan menggunakan *beam pattern* yang lebih lebar dan diarahkan berlawanan dari antenna *backhaul* sehingga meminimalisir adanya *loop interference*. Asumsi ini diilustrasikan pada Gambar 3 [16].

Pada sistem ini,  $SNR_1$  dan  $SNR_2$  merujuk kepada *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) pada eNB-RN dan RN-UE. Untuk SNR pada koneksi langsung antara eNB dengan UE akan dinotasikan dengan  $SNR_{eNB-UE}$  dan untuk kekuatan *loop interference* dinotasikan dengan  $SNR_{LI}$ .  $SNR_{LI}$  umumnya didefinisikan sebagai isolasi antara kedua antenna.

Dalam *relay AF*, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*

(SINR) pada UE yang terhubung dengan RN didapatkan dari total daya sinyal yang diterima langsung dari eNB dan juga dari sinyal yang teramplifikasi oleh RN. Dari segi interferensi ditambah dengan daya *noise*, didapatkan dari sinyal *loop back*, *noise* yang *ter-relay*, dan juga *noise* penerima. Dengan demikian dengan memperhitungkan efek dari LI, SINR end-to-end pada UE dapat dikalkulasikan dengan Persamaan (1):

$$SINR_{AF} = \frac{SNR_1 \cdot SNR_2 + SNR_{eNB-UE}(1+SNR_{LI}+SNR_1)}{SNR_1+(1+SNR_2)(1+SNR_{LI})} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan ini, kinerja end-to-end masih dapat ditingkatkan dengan cara mengoptimalkan *gain* dari *relay*, isolasi yang lebih baik antar antenna, dan meningkatkan jangkauan dari RN itu sendiri.

Isolasi antara kedua antenna dilakukan untuk menghindari adanya *self-amplification* atau *loopback* yang dapat menyebabkan ketidak stabilan pada sistem. Umumnya, direkomendasikan nilai isolasi antara kedua antenna lebih besar daripada *gain* dari sistem tersebut. Pada penelitian [17] direkomendasikan nilai isolasi lebih tinggi sebesar 15db daripada *gain relay*. Pada penelitian [18] digunakan isolasi antenna sebesar 85-95 dB. Untuk mendapatkan ini, terdapat beberapa metode yang telah digunakan seperti menggunakan polarisasi yang berbeda pada kedua antenna, menjauhkan jarak dari kedua antenna, dan memberikan sebuah penghalang diantara kedua antenna untuk meningkatkan faktor *shielding* [17]. Persamaan (2) digunakan untuk menghitung nilai isolasi antar antenna:

$$Iso(db) = 32.44 + 20 \log(d) + 20 \log(f) + Tx_{loss} + Rx_{loss} \quad (2)$$

Dimana  $d$  merupakan jarak antara kedua antenna dalam satuan meter,  $f$  merupakan frekuensi yang digunakan dalam satuan MHz,  $Tx_{loss}$  dan  $Rx_{loss}$  adalah nilai redaman pada masing-masing *transmitter* dan *receiver*.

### C. Decode-and-Forward

Berbeda dengan *relay AF*, *relay* dengan skema *decode-and-forward* melakukan pengkodean pada sinyal yang diterima sebelum diteruskan ke destinasi. *Relay station* jenis ini membutuhkan sistem yang lebih kompleks dikarenakan membutuhkan daya komputasi yang tinggi untuk memproses dan mengolah sinyal. Pengolahan sinyal tersebut dilakukan untuk menghilangkan *noise* yang didapatkan, sehingga derau tidak ikut *ter-amplify* bersamaan dengan sinyal informasi.

Pada DF, *resources* yang digunakan pada bagian akses dapat digunakan pada RN lainnya yang berada dalam cakupan *macro cell* yang sama. Hal ini tidak memungkinkan pada AF dikarenakan eNB tidak dapat mentransmisikan sinyal yang berbeda ke banyak AF secara bersamaan. Nilai *throughput* dari dua *hops* dapat dimaksimalkan apabila *throughput* pada *backhaul* dan *fronthaul* sama. Persamaan (3) menunjukkan efisiensi spektral bertambah seiring dengan peningkatan jumlah RN  $n$ . Selain itu, batas atas nilai efisiensi pada *two-hop link* ditentukan oleh efisiensi dari *backhaul* jaringan itu sendiri.

$$SE_{DF} = SE_2 \cdot \alpha \cdot N = \left( \frac{1}{SE_1} + \frac{1}{n \cdot SE_2} \right)^{-1} \quad (3)$$

### D. Unmanned Aerial Vehicle

*Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau yang secara umum dikenal dengan istilah “*drone*” merupakan suatu pesawat

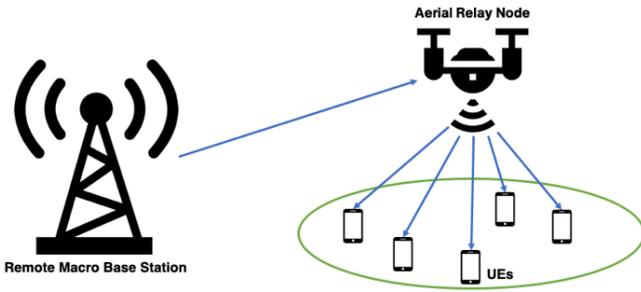
terbang tanpa awak yang dikendalikan secara jarak jauh [18]. *Drones* tersedia dalam berbagai ukuran dan juga spesifikasi. *Drone* dapat dijalankan dalam waktu yang relatif cepat sehingga menjadikan mereka kandidat yang menjajikan sebagai penyedia konektivitas dalam keadaan darurat. Setiap *drone* memiliki batas beban maksimum yang dapat dibawa yang disebut dengan *payload*. *Payload* pada suatu *drone* umumnya berkisar dari sepuluh gram hingga ratusan kilogram [19]. Semakin besar *payload* suatu *drone* semakin banyak peralatan dan aksesoris yang dapat dibawa oleh *drone* tersebut. Umumnya, *payload* yang dibawa merupakan kamera video dan berbagai macam sensor yang digunakan untuk pengawasan, komersil, pengintaian, dsb [20]. Umumnya, *payload Base Station* atau *remote radio heads* (RRH) juga dapat dipasang pada drone untuk menyediakan jaringan seluler, sehingga pada kasus ini dibutuhkan *payload* dari drone yang mencapai beberapa kilogram.

Dari segi mekanis penerbangannya, *drone* dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu *multi-rotor*, *fixed-wing*, dan juga *hybrid fixed/rotary wing drones*. *Multi-rotor drones* memungkinkan untuk *take-off* dan *landing* secara vertical dan juga melayang pada suatu titik tertentu sehingga dapat menyediakan jangkauan jaringan yang tetap di suatu area. Tingkat manuver yang tinggi pada jenis drone ini menjadikan mereka sangat cocok sebagai penyedia jaringan dikarenakan mereka dapat diterbangkan pada titik yang diinginkan atau bergerak sesuai trayektori yang dikehendaki saat membawa *base station*. Sementara itu, *fixed-wing drone* dapat *glide* di udara sehingga menjadikan mereka lebih efisien dalam segi energi dan dapat membawa membawa *payload* yang lebih besar. Sayap pada *drone* jenis ini membuat mereka terbang lebih cepat. Namun, hal tersebut membuat mereka tidak dapat terbang secara vertical dan juga membutuhkan jalan atau *runaway* untuk *take-off*. *Hybrid fixed/rotary wing drone* merupakan hal yang baru saja dibuat dengan cara menggabungkan kedua jenis *drone* sebelumnya. *Drone* jenis ini dapat terbang secara vertical dan juga *glide* di udara sehingga membuat mereka dapat mencapai tujuan dengan cepat.

Ketinggian terbang *drone* bervariasi dari sepuluh meter untuk *drone* kecil hingga ratusan kilometer untuk *drone* besar. Ketinggian maksimum suatu *drone* merupakan parameter penting untuk UAV sebagai ARN dikarenakan akan sangat berpengaruh pada jangkauan jaringan dan juga memenuhi kebutuhan QoS [21]. Dari kemampuan ketinggian *drone* dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *Low-altitude platforms (LAPs)* dan *High-altitude Platforms (HAPs)*. LAP umumnya diberikan pada *drone* yang berfungsi untuk membantu komunikasi seluler dan memiliki LoS yang berjarak dekat (3GPP Technical Report 36.913). HAP memiliki jangkauan yang lebih luas dan dapat mengudara lebih lama dibandingkan dengan LAP. Namun, dalam menerbangkan HAP terdapat prosedur yang relatif lebih kompleks dan umumnya digunakan untuk menyediakan koneksi inteARNet bagi banyak orang atau area yang sangat luas. HAP jarang digunakan pada jaringan seluler dikarenakan besarnya interferensi yang didapatkan dari *base station* lain (3GPP Technical Report 36.300).

### E. Aerial Relay Node

Aerial Relay Node (ARN) merupakan suatu istilah yang



Gambar 4. Penggunaan ARN sebagai infrastruktur jaringan seluler.

diberikan kepada suatu UAV yang membawa suatu *relay node*. Perbedaan dan juga kelebihan ARN dengan infrastruktur terestial berada pada kemampuan mereka untuk menyediakan konektivitas atau jaringan pada suatu lokasi spesifik secara *on-demand*. Dikarenakan ARN terbuat dari UAV menjadikan mereka memiliki mobilitas, fleksibilitas di dalam ruang tiga dimensi, ketinggian yang adaptif, dan juga rotasi simetris. Karakteristik ini yang memungkinkan mereka untuk menyediakan layanan konektivitas yang rendah interferensi, berkapasitas tinggi, dengan degradasi yang rendah [22]. Penggunaan *Aerial Relay Node* diilustrasikan pada Gambar 4.

Walaupun kebanyakan dari riset mengenai UAV dalam komunikasi nirkabel menjadikan UAV tersebut sebagai *Aerial Base Station* [23-27], belakangan ini terdapat kenaikan pada jumlah riset pada UAV sebagai *relay node* [28-34]. UAV sebagai *relay node* dapat digunakan apabila infrastuktur terestial seperti *base station* rusak yang disebabkan oleh bencana alam atau saat terdapat kenaikan jumlah pengguna [6][35-36]. Pada penelitian [37-40], UAV sebagai *relay* dapat digunakan untuk menydiakan *wireless coverage* antara perangkat nirkabel di permukaan dengan *base station* yang relatif jauh.

Dalam pengaplikasiannya, *relay node* yang berada pada UAV akan berkomunikasi secara langsung dengan BS yang dituju. Hal tersebut dapat dicapai dikarenakan pada ketinggian tertentu, tidak ada rintangan atau hambatan antara kedua antena sehingga terjadi komunikasi LoS. Berdasarkan (3GPP Technical Specification 36.777), model *path loss* pada *macro base station* (MBS) dengan UAV digunakan RMAV-LoS *channel model*. Model ini dapat digunakan apabila probabilitas dari LoS adalah sama dengan satu. Hal ini didapatkan dengan cara meletakkan tinggi UAV diantara 40m hingga 300m dari permukaan tanah. Sehingga *path loss* antara MBS dengan UAV dapat diekspresikan dengan Persamaan (4):

$$L_{(db)} = \max \left( 23.9 - 1.8 \log_{10}(h_{uav}) \log_{10}(d_{3d}) + 20 \log_{10} \left( \frac{40\pi f_c}{3} \right) \right) \quad (4)$$

Dimana  $h_{uav}$  berada pada jarak antara 40m hingga 300m, dimana  $d_{m,u,t}$  representasi dari jarak 3D antara UAV dengan MBS. Perlu diingat apabila ketinggian UAV semakin bertambah maka kualitas dari sinyal yang diterima akan berkurang dikarenakan terkena *fading*, namun hal ini tidak akan mempengaruhi nilai probabilitas LoS pada jalur MBS-to-UAV.

Sementara itu untuk *path loss model* pada hubungan UAV dengan UEs didapatkan Persamaan (5) sebagai berikut:

Tabel 1.

Nilai dari  $(\alpha, \beta)$  untuk tiap jenis lingkungan.

Environment	$(\alpha, \beta)$
Suburban	(4.88, 0.43)
Urban	(9.61, 0.16)
Dense Urban	(12.08, 0.114)

$$L_{(db)}(d_{3d}, \phi) = P(LOS) \cdot L_{LOS} + P(NLOS) \cdot L_{NLOS} \quad (5)$$

Dimana  $d_{3d}$  merupakan jarak tiga dimensi antara UAV dengan *ground user*,  $P(LOS)$  merupakan probabilitas terjadinya koneksi atau komunikasi *line-of-sight* pada derajat evaluasi sebesar  $\phi$ ,  $P(NLOS)$  merupakan probabilitas terjadinya komunikasi non-LoS dan sama dengan  $(1 - P(LOS))$ , serta  $L_{LOS}$  and  $L_{NLOS}$  merupakan rata-rata *path loss* pada jalur komunikasi LoS dan NLoS.

Probabilitas LoS dipengaruhi dari jenis pemukiman (*rural, urban, dense urban*, dsb), ketinggian antenna pemancar, jarak horizontal antara antenna pemancar dan penerima, dan juga sudut elevasi. Umumnya, probabilitas ini digunakan sebagai penentu apakah komunikasi antara kedua antenna tersebut dapat diasumsikan sebagai LoS atau tidak. Persamaan probabilitas LoS ini dapat dilihat pada Persamaan (6):

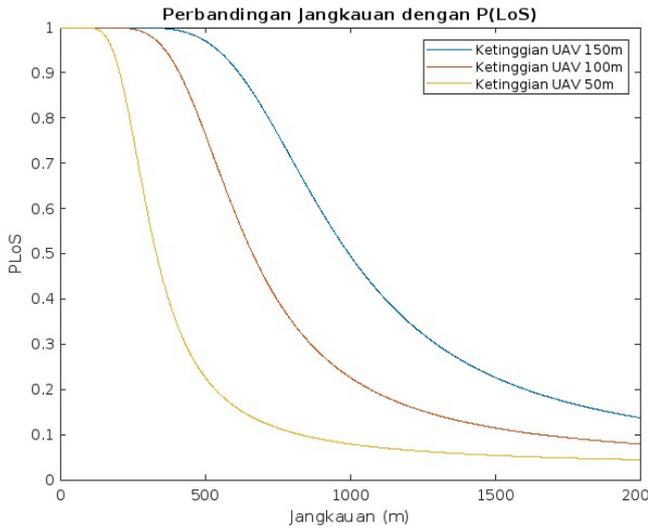
$$P(LOS) = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left(\frac{180}{\pi} \theta - \alpha\right)\right)} \quad (6)$$

Dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  merupakan konstanta lingkungan, dan  $\theta$  merupakan sudut elevasi. Dari persamaan tersebut didapatkan bahwa semakin tinggi nilai sudut elevasi maka probabilitas dari LoS akan semakin tinggi. Dimana sudut elevasi didapatkan dari jarak horizontal antara kedua antenna dan ketinggian antenna pemancar. Nilai dari  $(\alpha, \beta)$  untuk tiap jenis lingkungan diberikan pada Tabel 1 [41].

### III. MODEL SISTEM

Pada penelitian ini, dimodelkan arsitektur ARN menggunakan *relay node* berjenis *amplify-and-forward* dan *decode-and-forward*. Pada ARN-AF digunakan *signal booster* yang bekerja pada pita frekuensi 1930-1990 MHz, bandwidth 20 MHz, dan gain sebesar 100 dB. Selain itu, digunakan dua jenis antena yakni *directional* dengan gain sebesar 11 dBi untuk komunikasi pada jaringan *fronthaul* (ARN-MBS) dan antena *omnidirectional* dengan gain 5 dBi untuk jaringan akses (ARN-UE).

Pada ARN-DF, digunakan MiFi sebagai *relay decode-and-forward*. MiFi tersebut akan menyediakan jaringan wifi 802.11n pada jaringan akses sementara menggunakan jaringan seluler 4G pada jaringan *fronthaul* nya. Untuk saat ini dari segi jumlah maksimum perangkat yang terhubung, MiFi MI Nighthawk merupakan MiFi dengan batas jumlah perangkat yang terhubung yang paling banyak yaitu mencapai 20 perangkat. Protokol WiFi 802.11n digunakan dalam arsitektur ini dikarenakan protokol tersebut bekerja dalam frekuensi 2.4 GHz sehingga dari segi jangkauan akan lebih baik dibandingkan dengan frekuensi 5 GHz walaupun kecepatan data akan lebih kecil. Batas maksimum perangkat yang terhubung dengan MiFi tersebut dipengaruhi dari kemampuan memproses data atau *processing capability* dari



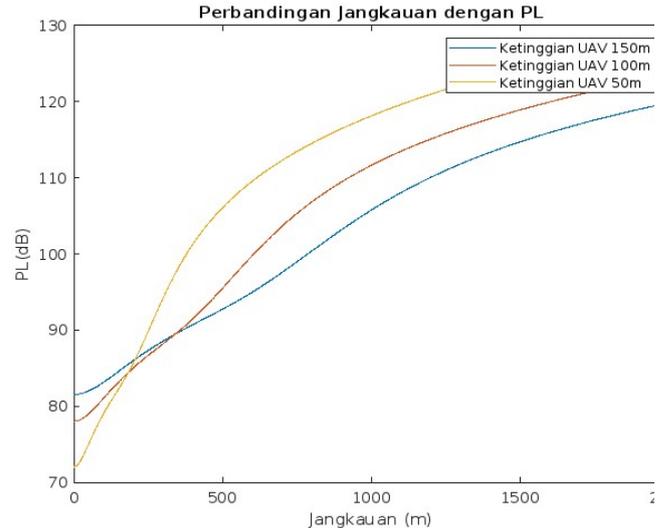
Gambar 5. Hasil perbandingan jangkauan dengan P(LoS).

suatu perangkat. Sehingga walaupun secara teoritikal suatu *router* dapat terhubung dengan 255 perangkat, tipe *processor* yang digunakan pada suatu *router* akan menjadi penentu utama dalam batas maksimum perangkat yang terhubung. Selanjutnya untuk memaksimalkan jangkauan pada *fronthaul*, pada arsitektur ini akan digunakan antenna *omnidirectional* 5dBi yang dipasang pada MiFi menggunakan konektor TS9.

ARN-AF diharapkan dapat menerima sinyal dari MBS yang dituju dengan antenna *directional* secara LoS. Sinyal yang ditangkap tersebut selanjutnya diamplifikasi oleh *signal booster* lalu ditransmisikan ke suatu daerah yang tidak terlayani jaringan seluler dengan antenna *omnidirectional*. Perlu diingat bahwa arsitektur ini tidak akan meningkatkan kapasitas jaringan namun hanya memperluas jangkauan dari suatu MBS saja dikarenakan komponen utama arsitektur ini merupakan sebuah *relay*. Sehingga batas maksimum perangkat yang dapat dilayani oleh RN ini akan bergantung pada kapasitas MBS pada waktu tertentu yang terhubung dengan RN. Apabila MBS yang terhubung pada RN tidak sedang mengalami penghambatan dari trafik, diharapkan semua perangkat pada suatu daerah yang terhubung melalui RN dapat terlayani.

Sementara pada ARN-DF diharapkan dapat menyediakan jaringan internet melalui WiFi kepada sekelompok orang yang berada pada suatu daerah tanpa sinyal (pada kasus ini adalah tim penanggulangan bencana). Seperti pada sub-bab sebelumnya dimana dibahas dalam penanggulangan bencana akan dilakukan pengumpulan data dari korban melalui kuisisioner, survey, dan interview oleh pihak berwajib diharapkan dengan adanya jaringan WiFi ini, perpindahan informasi akan lebih efisien tidak hanya antar personil maupun keluar daerah tersebut.

Pada penelitian ini, dimodelkan suatu UAV yang dapat mendukung arsitektur *Aerial Relay Node* yang telah dibuat. Pada arsitektur AF, dibutuhkan suatu UAV dengan kapasitas *payload* yang relatif besar untuk dapat membawa komponen-komponen seperti *relay station*, dua antenna, baterai, dll. Dalam proses pemodelan UAV yang akan digunakan perlu diperhatikan komponen-komponen dari UAV itu sendiri seperti *body frame*, *rotor*, *propeller/wing*, *kit frame landing*, *electronic speed controller*, dan *flight controller*. Sementara pada arsitektur DF, dibutuhkan suatu UAV dengan kapasitas



Gambar 6. Hasil perbandingan jangkauan dengan *pathloss*.

*payload* yang relatif kecil untuk dapat membawa komponen-komponen seperti MiFi, dua antenna TS9 connector. Dalam proses pemodelan UAV yang akan digunakan perlu diperhatikan batas maksimum *payload* dari UAV komersil.

#### IV. HASIL DAN DISKUSI

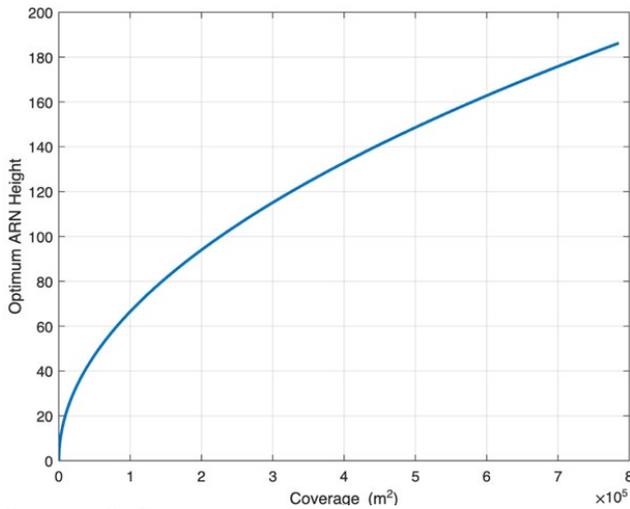
Berdasarkan hasil simulasi, dengan bertambahnya ketinggian dari UAV maka probabilitas komunikasi LoS dengan perangkat yang lebih jauh akan semakin mendekati 100%. Berdasarkan data ini didapatkan bahwa jangkauan LoS akan bertambah secara linear seiring dengan bertambahnya ketinggian ARN.

Namun, dapat dilihat juga pada Gambar 6 bahwa semakin tinggi letak ARN semakin tinggi juga nilai *initial pathloss* nya, sehingga ketinggian optimal pada suatu ARN disesuaikan dengan luasnya daerah yang dijangkau. Sebagai contoh apabila daerah yang ingin dilayani oleh ARN memiliki area sebesar 100m x 100m saja, ketinggian dari ARN optimal tidak akan lebih dari 50 meter. Hal tersebut disebabkan probabilitas LoS 100% pada ketinggian 50 meter sudah jauh melebihi dari jangkauan yang diinginkan. Dalam kondisi seperti ini perlu diperhitungkan *trade-off* antara P(LoS) dengan *pathloss* tiap perangkat yang akan dilayani oleh ARN. Selain itu apabila pada suatu daerah diinginkan suatu jangkauan lebih kecil dari radius 243 meter (dengan ketinggian UAV 150 m) dengan probabilitas LoS 100% dapat diperoleh menggunakan perhitungan sederhana seperti pada Persamaan (7):

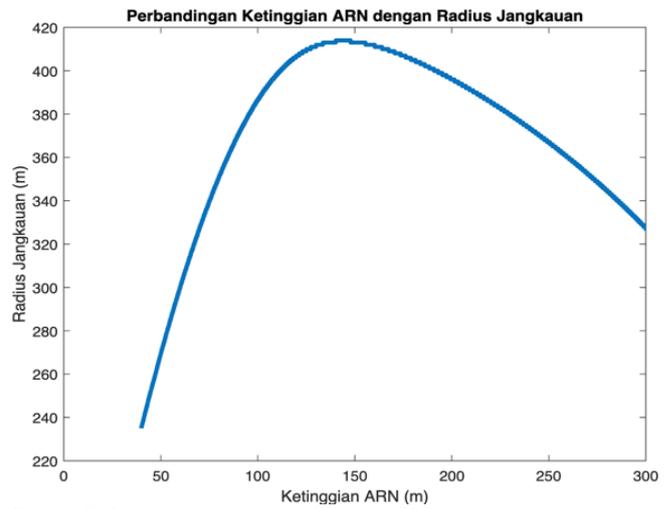
$$h_{\min(P_{LoS}=1)} = 0.617 \times R \tag{7}$$

Dimana R merupakan radius jangkauan yang diinginkan dan 0.617 merupakan hasil dari  $\tan(31.68^\circ)$ .  $31.68^\circ$  sendiri merupakan batas minimum sudut elevasi pada kondisi suburban yang didapatkan dari hasil simulasi sebelumnya dan dapat dilihat pada Gambar 5. Sehingga persamaan tersebut digunakan hanya dapat digunakan untuk kondisi pemukiman suburban saja.

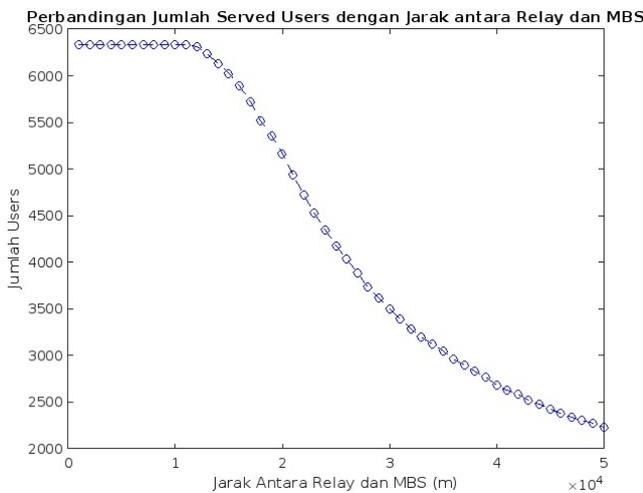
Namun perlu diingat bahwa ketinggian UAV dengan probabilitas 100% belum tentu merupakan ketinggian yang optimum, sehingga dengan perbandingan PL dan P(LoS) yang didapatkan sebelumnya akan dilakukan perhitungan dimana *path loss* minimum didapatkan dengan probabilitas



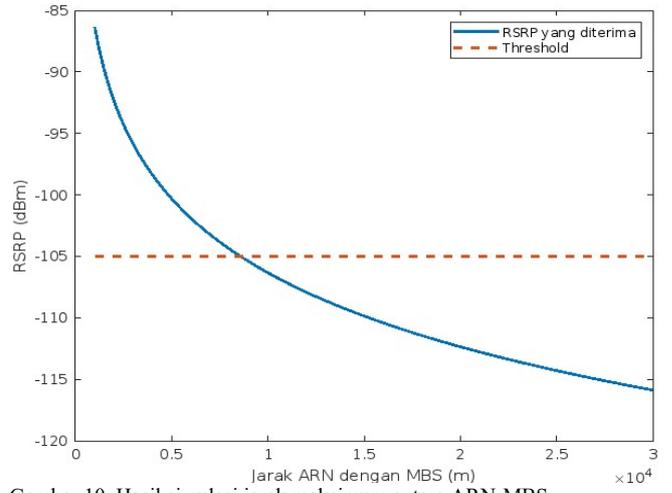
Gambar 7. Grafik ketinggian optimum.



Gambar 9. Perbandingan antara ketinggian ARN dengan radius jangkauan.



Gambar 8. Hasil uji jarak maksimum antara ARN-MBS.



Gambar 10. Hasil simulasi jarak maksimum antara ARN-MBS.

LoS yang paling besar. Sehingga berdasarkan persamaan ketinggian optimum dari suatu UAV didapatkan dari  $\tan(\theta)$  optimum atau  $\theta_{opt}$ . Sehingga untuk mendapatkan sudut elevasi optimum didapatkan Persamaan (8) sebagai berikut:

$$\frac{\pi}{9 \ln 10} \tan(\theta_{opt}) + \frac{abA \exp(-b(\theta_{opt}-a))}{(a \exp(-b(\theta_{opt}-a))+1)^2} = 0 \quad (8)$$

Sehingga berdasarkan persamaan tersebut didapatkan sudut elevasi optimum untuk daerah suburban adalah sebesar 20.34°. Sehingga berdasarkan perhitungan tersebut, pada kondisi yang digunakan pada penelitian ini, didapatkan ketinggian optimum senilai 744.98 meter apabila diluar peraturan perundang-undangan yang berlaku di Indonesia.

Hasil perhitungan ketinggian optimum pada tiap radius jangkauan yang bervariasi dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan grafik tersebut diperoleh bahwa luas area diatas 507.694 m<sup>2</sup> atau area dengan radius 402 meter akan memiliki ketinggian optimum ARN sebesar 150 meter. Sehingga apabila luas suatu area yang ingin dilayani oleh ARN melebihi 507.694 m<sup>2</sup>, secara otomatis ketinggian optimum dari ARN akan tetap pada ketinggian 150 meter dikarenakan peraturan penerbangan UAV yang berlaku di Indonesia. Namun apabila radius dari area yang ingin dilayani lebih kecil dari 402 meter, grafik pada Gambar 7 dapat dijadikan acuan dalam mendapatkan ketinggian optimum.

Berdasarkan Gambar 8, pada kasus ini jarak maksimum antara ARN dengan MBS berada pada 11 km. Setelah itu,

jumlah perangkat yang akan terlayani akan turun secara perlahan seiring dengan bertambahnya jarak ARN-MBS. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya jarak antara ARN dengan MBS, *path loss* antara kedua node tersebut akan semakin besar mengakibatkan daya dari sinyal yang dapat diamplifikasi oleh ARN juga akan semakin kecil. Dapat dilihat juga bahwa pada Gambar 6 semakin jauh posisi perangkat dari ARN, semakin kecil juga daya yang didapat. Sehingga saat *pathloss* antara ANR-MBS bertambah, perangkat yang berada pada *edge* akan menjadi perangkat pertama yang tidak mencapai batas ambang RSRP -120 dBm. Sama seperti dengan ketinggian optimum dari ARN, jarak maksimum pada ARN-MBS akan bergantung pada luas area yang ingin layani. Selain itu, hal tersebut juga dapat dipengaruhi oleh letak posisi dari tiap perangkat.

Berdasarkan hasil simulasi perbandingan ketinggian dengan radius jangkauan dari ARN-DF didapatkan bahwa radius jangkauan maksimum berada pada 414 meter atau area seluas 538.456,414 m<sup>2</sup> pada ketinggian UAV 140,6 meter hingga 147,8 meter. Setelah melewati ketinggian 147,8 meter dapat dilihat bahwa radius jangkauan dari ARN akan menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian ARN. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya ketinggian ARN, *path loss* antara ARN dengan UE akan semakin bertambah sehingga nilai RSSI yang diterima oleh perangkat pada jarak  $r_n$  akan berada di bawah *threshold*. Sehingga dalam mendapatkan ketinggian UAV optimum dapat diperoleh menggunakan persamaan (16) dimana sudut elevasi yang

digunakan merupakan sudut elevasi optimum pada kondisi daerah suburban yaitu  $20,43^\circ$  yaitu sebesar 153,47 meter.

Berdasarkan Gambar 9 didapatkan bahwa radius jangkauan dari ketinggian optimum tersebut hanya akan mencapai 413 meter saja namun perlu diingat juga bahwa semakin tinggi ARN maka probabilitas LoS juga akan semakin tinggi sehingga nilai *pathloss* non-LoS akan semakin kecil. Pada ketinggian UAV 153,47, luas area jangkauan sama dengan pada ketinggian 150 meter. Luas area jangkauan tersebut adalah sebesar  $535.858,317 \text{ m}^2$  atau sekitar 3.34% dari luas area Desa Sumbermujur.

Selanjutnya untuk jarak maksimum antara ARN dengan MBS didapatkan sejauh 8,5 kilometer (Gambar 10). Perhitungan ini diperoleh menggunakan persamaan *free space path loss* dengan frekuensi carrier yaitu pada 1900 MHz. Berdasarkan persamaan tersebut, daya yang diterima akan mengalami penurunan sebesar  $20 \cdot \log(d_n - d_{n-1})$  pada jarak  $d_n$ . Digunakan *threshold* RSRP sebesar -105 dBm. Berbeda dengan pada ARN-AF dimana digunakan *threshold* RSRP sebesar -120 atau tergolong dalam indikasi cukup, pada ARN-DF digunakan indikator baik sebagai *threshold*. Hal ini disebabkan perangkat MiFi yang digunakan sebagai RN-DF akan dianggap sebagai satu perangkat oleh MBS, sehingga data yang diterima dari 20 perangkat pada jaringan WiFi akan diteruskan oleh MiFi menggunakan *fronthaul* LTE sebagai satu perangkat. Sehingga untuk mencegah adanya *bottleneck* pada jaringan *fronthaul* dibutuhkan *data rate* atau kapasitas yang lebih besar. Saat RSRP yang diterima oleh ARN menyentuh dibawah -105 dBm, koneksi antara ARN dengan MBS akan diasumsikan terputus. Pada kondisi tersebut, ARN akan tetap dapat menyediakan jaringan akses WiFi pada perangkat yang dijangkau namun tidak akan ada data yang dapat dikirim maupun diterima oleh perangkat.

Secara teoritikal wifi 802.11n memiliki kecepatan *throughput* hingga 600 Mbps. Namun pada perangkat ini dimana memiliki kemampuan komputasi yang terbatas, perangkat ini hanya mampu melayani hingga 20 perangkat saja. Namun hal ini dapat diatasi dengan penggunaan 3 *mobile hotspot* pada satu UAV dengan penggunaan *band* yang berbeda yakni 1, 5, dan 6. Namun dengan 3 perangkat MiFi maka beban akan bertambah tiga kali lipat sehingga membutuhkan UAV dengan *payload* maksimum sebesar 1 kg. Secara teoritikal pada ARN-DF tiap perangkat mampu memiliki kecepatan data hingga 30 Mbps. Namun, dalam kondisi nyata dimana terdapat derau dan *losses*, kecepatan data akan dibawah 30 Mbps. Dari segi arsitektur, berbeda dengan ARN-AF, ARN-DF menggunakan *resource* yang berbeda pada jaringan akses dan jaringan *fronthaul* yaitu 2,4 GHz pada akses dan 1,9 GHz pada *fronthaul*, sehingga tidak perlu difaktorkan nilai dari isolasi antenna atau *loopback interference*. Pada ARN-DF nilai *maximum throughput* sangat bergantung pada jaringan *fronthaul* dikarenakan secara teoritis, kapasitas LTE FDD pada lebar pita 20 MHz adalah sekitar 400 Mbps apabila menggunakan 4x4 MIMO. Sehingga nilai *throughput* maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan diskusi, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan. Pertama, penggelaran ARN-AF

memiliki ketinggian optimum pada ketinggian maksimum yakni 150 meter dan mampu memberikan layanan 100% pada jangkauan area seluas  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  apabila jarak antara ARN-AF dengan MBS tidak melebihi jarak maksimum yakni 11 kilometer. Kapasitas dari arsitektur ini sangat bergantung pada kondisi trafik pada MBS yang terhubung dengan ARN. Sementara itu, *relay* yang digunakan memiliki gain yang baik yaitu sebesar 100 dB namun *relay* ini hanya dapat bekerja pada satu jenis operator saja, sehingga perlu dibuat suatu pembagian jadwal terbang pada masing-masing operator atau menyediakan lebih dari satu ARN dengan jenis operator yang berbeda-beda.

Kedua, pada *Aerial Relay Node Decode-and-* ketinggian optimum yakni 153,47 dengan jangkauan seluas  $535.858,317 \text{ m}^2$  serupa dengan pada ketinggian maksimum 150 meter. ARN-DF mampu menyediakan layanan pada suatu daerah apabila jarak antara ARN-MBS tidak melebihi 8,5 km. Apabila digunakan Model UAV dengan *payload* 1 kg, dapat digunakan 3 MiFi dengan penggunaan band 1, 5, dan 6 untuk meningkatkan jumlah perangkat menjadi sebanyak 60 perangkat.

Ketiga, ARN berjenis AF cocok digunakan untuk melayani perangkat dalam jumlah besar untuk keperluan *light use* seperti pesan singkat dikarenakan nilai SNR yang kecil, dalam kasus ini adalah korban bencana. Untuk ARN-DF data rate yang ditawarkan kepada tiap perangkat lebih besar dibandingkan dengan ARN-AF sehinggadapat digunakan untuk menyediakan jaringan pada pihak berwajib atau pihak yang bertanggung jawab dalam proses penanggulangan bencana seperti pembuatan laporan, pelaksanaan kuisioner, dan juga survey.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Economic Research Office, *Information and Communications in the Aftermath of the Great East Japan Earthquake*. Tokyo: Ministry of Internal Affairs and Communications Japan, 2011.
- [2] G. B. Kapur, S. Bezek, and J. Dyal, *Effective Communication During Disasters Making Use of Technology, Media, and Human Resources*. Florida: Apple Academic Press, 2017.
- [3] Z. Zhao *et al.*, "Smart unmanned aerial vehicles as base stations placement to improve the mobile network operations," *Comput. Commun.*, vol. 181, pp. 45–57, 2022, doi: 10.1016/j.comcom.2021.09.016.
- [4] S. Chandrasekharan *et al.*, "Designing and implementing future aerial communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 26–34, 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470932.
- [5] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2624–2661, 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2560343.
- [6] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, "Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond," in *Proceedings of the IEEE*, 2019, pp. 2327–2375. doi: 10.1109/JPROC.2019.2952892.
- [7] A. Fotouhi *et al.*, "Survey on UAV cellular communications: practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3417–3442, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2906228.
- [8] L. Afonso, N. Souto, P. Sebastiao, M. Ribeiro, T. Tavares, and R. Marinheiro, "Cellular for the skies: exploiting mobile network infrastructure for low altitude air-to-ground communications," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 31, no. 8, pp. 4–11, 2016, doi: 10.1109/MAES.2016.150170.
- [9] R. Schoenen and B. H. Walke, "On PHY and MAC Performance of 3G-LTE in a Multi-Hop Cellular Environment," in *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007, pp. 926–929. doi: 10.1109/WICOM.2007.238.
- [10] T. Kanesan, W. P. Ng, Z. Ghassemlooy, and J. Perez, "Radio Relaying for Long Term Evolution Employing Radio-Over-Fibre," in *16th European Conference on Networks and Optical Communications*,

- 2011, pp. 212–215.
- [11] A. So and B. Liang, “Effect of relaying on capacity improvement in wireless local area networks,” *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.*, vol. 3, pp. 1539–1544, 2005, doi: 10.1109/WCNC.2005.1424743.
- [12] T. Beniero, S. Redana, J. Hamalainen, and B. Raaf, “Effect of Relaying on Coverage in 3GPP LTE-Advanced,” in *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009, pp. 2–5. doi: 10.1109/VETECS.2009.5073520.
- [13] W. T. Slingsby and J. P. McGeehan, “A High-Gain Cell Enhancer,” in *Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference - Frontiers of Technology*, 1992, pp. 756–758. doi: 10.1109/VETEC.1992.245465.
- [14] W. T. Slingsby and J. P. McGeehan, “Antenna Isolation Measurements for on-Frequency Radio Repeaters,” in *1995 Ninth International Conference on Antennas and Propagation, ICAP '95*, 1995, pp. 239–243. doi: 10.1049/cp:19950300.
- [15] E. N. Onwuka et al., “Survey of cellular signal booster,” *Int. J. Inf. Eng. Electron. Business (IJIEEB)*, vol. 10, no. 6, pp. 21–31, 2018, doi: 10.5815/ijieeb.2018.06.03.
- [16] A. B. Saleh, S. Redana, B. Raaf, T. Riihonen, J. Hamalainen, and R. Wichman, “Performance of Amplify-and-Forward and Decode-and-Forward Relays in LTE-Advanced,” in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/VETECF.2009.5378824.
- [17] Y. Tan, Y. Sun, and D. Lauder, “Automatic impedance matching and antenna tuning using quantum genetic algorithms for wireless and mobile communications,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 7, no. 8, pp. 693–700, 2013, doi: 10.1049/iet-map.2012.0320.
- [18] A. S. M. Marzuki, A. R. Rahim, B. Mohmd, K. Khalil, A. Naemat, and A. Tee, “Antenna Isolation Considerations in WCDMA Repeater Deployment,” in *2006 International RF and Microwave Conference, 2006*, 2006, pp. 347–350. doi: 10.1109/RFM.2006.331101.
- [19] P. G. Fahlstrom and T. J. Gleason, *Introduction to UAV Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. doi: 10.1002/9781118396780.
- [20] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, 2014, doi: 10.1109/LWC.2014.2342736.
- [21] M. Ding, P. Wang, D. López-Pérez, G. Mao, and Z. Lin, “Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 2365–2380, 2016, doi: 10.1109/TWC.2015.2503391.
- [22] R. J. Jakubowski, “A New Generation of High-Power Cellular Repeaters,” in *40th IEEE Conference on Vehicular Technology*, 1990, pp. 24–28. doi: 10.1109/VETEC.1990.110290.
- [23] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, and R. Miura, “Toward future unmanned aerial vehicle networks: architecture, resource allocation and field experiments,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. T1, pp. 94–99, 2019, doi: 10.1109/MWC.2018.1700368.
- [24] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “Modeling Air-to-Ground Path Loss For Low Altitude Platforms in Urban Environments,” in *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, pp. 2898–2904. doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248.
- [25] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Drone Small Cells in the Clouds: Design, Deployment and Performance Analysis,” in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417609.
- [26] A. Sawalmeh, N. S. Othman, H. Shakhathreh, and A. Khreishah, “Providing Wireless Coverage in Massively Crowded Events Using UAVs,” in *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 2017, pp. 158–163. doi: 10.1109/MICC.2017.8311751.
- [27] H. Shakhathreh et al., “Unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572–48634, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- [28] A. H. Sawalmeh, N. S. Othman, H. Shakhathreh, and A. Khreishah, “Wireless coverage for mobile users in dynamic environments using UAV,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 126376–126390, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938272.
- [29] S. Yin, Z. Qu, and L. Li, “Uplink Resource Allocation in Cellular Networks with Energy-Constrained UAV Relay,” in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417737.
- [30] U. Demir, C. Tokar, and Ö. Ekici, “Energy-Efficient Deployment of UAV in V2X Network Considering Latency and Backhaul Issues,” in *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235026.
- [31] S. Kumar, S. Suman, and S. De, “Backhaul and Delay-Aware Placement of UAV-Enabled Base Station,” in *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2018, pp. 634–639. doi: 10.1109/INFOCOMW.2018.8406910.
- [32] Y. Chen, W. Feng, and G. Zheng, “Optimum placement of UAV as relays,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 248–251, 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2776215.
- [33] P. Zhan, K. Yu, and A. L. Swindlehurst, “Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 3, pp. 2068–2085, 2011, doi: 10.1109/TAES.2011.5937283.
- [34] Y. He, D. Zhai, D. Wang, X. Tang, and R. Zhang, “A relay selection protocol for UAV-assisted VANETs,” *Appl. Sci.*, vol. 20, no. 23, p. 8762, 2020, doi: 10.3390/app10238762.
- [35] T. D. P. Perera, D. N. K. Jayakody, S. Garg, N. Kumar, and L. Cheng, “Wireless-Powered UAV assisted Communication System in Nakagami-m Fading Channels,” in *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCNC46108.2020.9045123.
- [36] L. Zhang et al., “A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117460–117504, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929241.
- [37] H. Ullah, N. G. Nair, A. Moore, C. Nugent, P. Muschamp, and M. Cuevas, “5G communication: an overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 37251–37268, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905347.
- [38] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, “A comprehensive survey on UAV communication channel modeling,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107769–107792, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933173.
- [39] H. Hildmann and E. Kovacs, “Review: using unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile sensing platforms (MSPs) for disaster response, civil security and public safety,” *Drones*, vol. 3, no. 3, p. 59, 2019, doi: 10.3390/drones3030059.
- [40] S. Shakoore, Z. Kaleem, M. I. Baig, O. Chughtai, T. Q. Duong, and L. D. Nguyen, “Role of UAVs in public safety communications: energy efficiency perspective,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 140665–140679, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942206.
- [41] I. Moon, L. T. Dung, and T. Kim, “Optimal 3D placement of UAV-BS for maximum coverage subject to user priorities and distributions,” *Electronics*, vol. 11, no. 7, p. 1036, 2022, doi: 10.3390/electronics11071036.