

Optimalisasi Jumlah Ring Dan Kluster Pada Skema Routing Lorawan Berbasis Variasi Model Sebaran Sensor

Raden Andhika Ajiesastra, Ajib Setyo Arifin, Dadang Gunawan

Program Studi Teknik Telekomunikasi Dan Sistem Nirkabel Cerdas, Fakultas Teknik Elektro Universitas Indonesia

E-mail: raden.andhika01@ui.ac.id, ajib.sa@ui.ac.id, guna@eng.ui.ac.id

Abstrak— *Teknologi Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) yang sangat pesat untuk sistem IoT tidak dapat disangkal karena komunikasi nirkabel LPWAN memimpin dalam skalabilitas, masa pakai, kapasitas, biaya, dan jarak transmisi. terutama karakteristik LoRaWAN yang dapat melakukan transmisi jarak jauh dan konsumsi energi yang rendah. Namun, konfigurasi jaringan yang tepat penting dilakukan untuk proses pertukaran paket data agar semua node dapat terhubung dengan konsumsi energi rendah. Menemukan konfigurasi yang optimal untuk mendapatkan hasil maksimal dari protokol transmisi LoRa merupakan hal yang tidak terpisahkan sebelum penerapan. Distance-Ring Exponential Stations Generator (DRESG) menghadirkan skema perutean yang memungkinkan perutean multi-hop dan mengurangi konsumsi energi node. Penelitian ini menggunakan simulasi model matematis untuk memperbaiki metode tersebut dengan mengimplementasikan pembagian kluster pada busur lingkaran dengan berbagai skema penyebaran node, yang memungkinkan sistem memiliki mekanisme perutean dinamis yang menyesuaikan dengan distribusi node. Hasil simulasi menunjukkan dengan kombinasi skema distribusi node random uniform centered dapat meningkatkan efisiensi energi antara jumlah virtual ring dan node adalah 3 ring dan 6 ring, nilai bebas atau merata dari div 2 sampai dengan div 8 dengan critical node pada ring 1 dan memiliki energi terendah sebesar 0,56 mJ.*

Kata Kunci— LoRaWAN, Perutean multi-hop, distribusi node

I. PENDAHULUAN

Internet of things (IoT) merupakan sebuah konsep teknologi yang berkembang sangat pesat, bertujuan untuk memperluas manfaat dari konektivitas internet yang tersambung secara terus-menerus [1] bertujuan untuk monitoring serta controlling sehingga menghasilkan suatu data yang efisien, efektif, dan valid. Sedangkan pada sistem IoT merupakan hal yang lebih kompleks karena dapat mengintegrasikan dari sensor di luar sistem utama, dengan menggunakan kemampuan proses dari teknologi *machine learning* dan *artificial intelligence*.

Dalam sistem IoT, LPWAN sering digunakan untuk menghubungkan perangkat akhir atau node ke *gateway*. Topologi star, dimana setiap node dalam jaringan langsung terhubung ke *gateway*, merupakan topologi default yang digunakan dalam jaringan IoT [2]. Ini memastikan koneksi setiap node ke *gateway*. Sebaliknya, topologi tidak efisien dalam hal konsumsi energi. Node harus mempertahankan daya transmisi yang tinggi, belum lagi daya meningkat dengan jarak dari *gateway*. Sebagian besar node diberi daya menggunakan baterai dengan jumlah energi yang terbatas [3]. Dengan demikian, masa pakai perangkat bergantung pada energi yang dikonsumsi. Mengganti atau mengisi daya

baterai tidak akan merepotkan dalam penerapan perkotaan di mana sumber daya tersebar luas. Masalah muncul saat penerapan berada di area terpencil atau tidak dapat diakses di mana pemeliharaan konstan tidak dapat dilakukan. Oleh karena itu, memperpanjang umur node sangat penting.

Untuk memenuhi kebutuhan dan kondisi dari penelitian dilakukan skema protokol *multi-hop routing* yang bertujuan untuk meningkatkan tingkat efisiensi energi yang digunakan pada perangkat. Jaringan telekomunikasi nirkabel LoRaWAN menggunakan teknik modulasi *long range* (LoRa). Penggunaan LoRa memberikan keunggulan dari menggunakan frekuensi bebas lisensi dan konsumsi energi yang rendah [4].

Teknologi yang berkembang saat ini LPWAN digunakan dalam sistem IoT, Long-Range Wide Area Network (LoRaWAN) dengan protokol transmisi LoRa memungkinkan konsumsi energi yang lebih rendah dan jangkauan yang lebih luas [5]. Digunakan chirp spread spectrum yang membagi bandwidth menjadi multiple narrowband untuk mengirim paket data [6]. Konsumsi energi yang lebih optimal dapat dicapai dengan mengkonfigurasi ulang mekanisme routing selain *direct-hop routing* pada topologi star. Riset ini berfokus pada perancangan mekanisme routing yang memungkinkan LoRaWAN menurunkan konsumsi energi tanpa mengurangi tingkat konektivitas. Rancangan yang diusulkan berdasarkan *multi-hop routing* memungkinkan pertukaran paket data antar node sebagai relay untuk *gateway*.

Salah satu metode untuk mengaktifkan *multi-hop routing* pada LoRaWAN menggunakan algoritma Routing Protocol for Low-Power and Lossy Network (RPL) pada [5]. Memodifikasi fungsi tujuan yang digunakan dalam RPL untuk memilih *Spreading Factor* (SF) sebagai metrik perutean. Metode ini meningkatkan protokol lapisan *Medium Access Control* (MAC) standar dengan mengimplementasikan RPL untuk menentukan SF yang paling optimal untuk setiap tautan. Routing *multi-hop* lain yang memanfaatkan SF adalah [7], yang mengusulkan untuk membagi jaringan menjadi cluster. SF yang berbeda untuk transmisi untuk setiap cluster memengaruhi penggunaan energi yang berbeda karena kecepatan data bervariasi.

Penelitian terdahulu yang memanfaatkan mekanisme perutean *multi-hop* untuk jaringan masif adalah kerangka kerja *Distance-Ring Exponential Stations Generator* (DRESG) di LoRaWAN adalah [8]. Ini menggunakan jaringan topologi pohon di mana setiap node terhubung ke induknya. Cincin virtual menjadi pedoman untuk menempatkan node dengan kapasitas c^{r-1} untuk setiap cabang di ring r dan c adalah rasio anak pohon untuk satu node. Memaksa kenaikan eksponensial untuk node karena

rasio harus konstan di seluruh cabang. Konsumsi energi 96% lebih rendah dicapai dengan skema routing multi-hop jika dibandingkan dengan routing direct-hop. Penghematan energi yang disebabkan oleh lompatan yang lebih pendek untuk transmisi data mengurangi daya transmisi.

Kemudian pada metode DRESG dikembangkan oleh [9] di mana diterapkan distribusi node dapat menyebar secara acak sehingga lebih mendekati pada kehidupan nyata. Analisis dan simulasi menggunakan seribu node yang dikelompokkan oleh cincin virtual untuk mensimulasikan perutean multi-hop dan mendorong kerangka kerja ke batas lain. Rasio hubungan anak-orang tua Node dioptimalkan kembali untuk menyesuaikan dengan distribusi. Metode ini menyediakan beberapa kombinasi ring-hop, yaitu direct-hop, next-ring hop, dan variable-hop, dengan total kombinasi $R!$ di mana R adalah jumlah total ring yang digunakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kerangka kerja yang ditingkatkan dapat mencapai konsumsi energi 56% lebih rendah daripada routing direct-hop. Namun, tidak memiliki tingkat konektivitas yang tidak dapat mencapai tingkat konektivitas 99% kecuali jarak transmisi maksimum dikurangi atau mengubah pengaturan transmisi daya pada modul LoRa

II. BAHAN DAN METODE

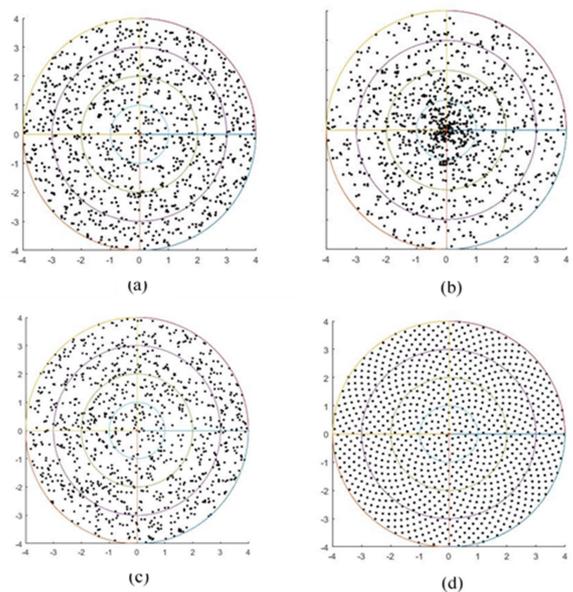
Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif sebagai sistematis dengan mengumpulkan data untuk meningkatkan jarak transmisi yang lebih pendek dan memungkinkan optimalisasi dinamis yang dapat beradaptasi dengan penyebaran distribusi node untuk setiap cluster. Analisis dalam karya ini diselesaikan dengan menggunakan pendekatan model matematis yang diproses dan disimulasikan menggunakan MATLAB®. Perancangan skema routing yang diusulkan dimulai dari pembuatan cluster dengan membagi node yang terdistribusi dengan ring kemudian membaginya lagi dengan circular arc. Di sisi lain, circular arc membatasi area untuk melarang lompatan dari satu gugus busur ke gugus lainnya. Kombinasi kedua metode tersebut membuat arah transmisi lebih lurus atau sejajar dengan gateway. Lompatan yang kurang tegak lurus ke gateway berarti rute transmisi yang lebih langsung dan lebih pendek.

Pekerjaan ini memulai perancangan simulasi skema routing dengan mendistribusikan node dalam ruang kerja melingkar sebagai jarak transmisi maksimum menjadi radius ring terluar. Proses perancangan dilanjutkan dengan membuat cluster-cluster untuk node-node dalam jaringan, dimulai dari cincin dan dilanjutkan dengan circular arc. Selanjutnya, simulasi menghitung energi yang dikonsumsi untuk mentransmisikan dan menerima paket data dari node kritis di setiap ring untuk setiap cluster dan setiap kemungkinan skema routing.

A. Distribusi node

Penelitian ini memulai perancangan skema routing dengan mendistribusikan node dalam ruang kerja melingkar. Jaringan menggunakan satu gateway yang terletak di tengah jaringan yang mencakup seribu node yang didistribusikan secara acak. Node yang terdistribusi membentuk area berbentuk lingkaran yang dibatasi oleh jarak transmisi maksimum modul LoRa. Itu menjadi radius area jika diukur dari titik pusat sistem, yang merupakan pintu gerbang

Distribusi seragam merupakan metode yang dipilih untuk mengacak lokasi node [9], [10]. Ini dimulai dengan mendistribusikan angka acak dalam rentang populasi node, membuat dataset dalam satu dimensi. Penyebaran node sebagai distribusi area menggunakan sistem koordinat dua dimensi dengan sumbu vertikal dan horizontal. Menemukan koordinat menggunakan produk sinus (untuk vertikal) dan cosinus (untuk horizontal) dengan kumpulan data yang dihasilkan sebelumnya. Metode skema random uniform menciptakan penyebaran yang berjarak sama dimana jarak antar node terdistribusi secara merata digambarkan pada Gambar 1(a). Metode lain yang digunakan adalah dengan mengakar kuadratkan kumpulan data dan kemudian menghitung hasilnya. Pendekatan skema *random uniform centered* menciptakan penyebaran node yang lebih fokus menyebar ke node pusat atau tengah seperti pada Gambar 1(b). Skema *random fibonacci* Gambar 1(c) penyebaran node semakin bertambah mengikuti jumlah ring dari yang terdekat gateway hingga terjauh dari gateway. Skema fibonacci spread pada gambar 1(d) penyebaran node yang tersusun secara teratur pada setiap ring dimana node semakin bertambah mengikuti jumlah ring dari yang terdekat gateway hingga terjauh dari gateway.



Gambar 1. Hasil simulasi skema *multi-hop routing* (a) *random uniform*, (b) *random uniform centered*, (c) *random Fibonacci*, (d) *Fibonacci spread*

B. Pengelompokan Node

Ada dua jenis cluster yang digunakan dalam skema routing, ring dan circular arc. Ring-ring tersebut digunakan sebagai panduan virtual untuk transmisi data agar dapat melakukan hop ke node lain seperti yang telah disebutkan pada [9]. Adapun circular arc, itu membagi lingkaran distribusi node menjadi area transmisi yang lebih kecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Setiap cluster membatasi lompatan dari satu cluster ke cluster lain sambil memungkinkan hubungan anak-orang tua di cluster yang sama. Area yang lebih kecil berarti tampilan yang lebih detail dapat diterapkan ke setiap cluster untuk membuat konektivitas yang adaptif dan dinamis antar node saat melakukan multi-hop. Jarak routing akan lebih pendek karena rute yang diambil akan lebih tegak lurus dengan gateway.

Dalam skenario ini, kluster ring memiliki peningkatan radius yang sama untuk setiap ring, dan kemampuan jarak transmisi maksimum gateway akan menjadi radius ring paling luar. Untuk mekanisme pengelompokan, ring dan node membandingkan jaraknya dari gateway. Jika jarak sebuah simpul lebih pendek dari jari-jari cincin, simpul tersebut akan dianggap sebagai populasi cincin. Begitu juga sebaliknya, jika jarak suatu simpul lebih jauh dari jari-jari suatu cincin, maka simpul tersebut akan dianggap sebagai populasi cincin berikutnya. Semua node dalam jaringan menerapkan proses yang sama. Cincin dihitung dari cincin paling dalam mulai dari 1.

Adapun *circular arc*, masing-masing memiliki besar sudut yang sama. Garis gradien virtual digambar di jaringan untuk mengelompokkan node untuk menentukan batas setiap kluster. Itu dimulai dengan garis dari pintu gerbang ke utara sampai lingkaran paling luar. Kemudian, garis lain dibentuk dengan memutar garis pertama dengan sudut yang ditentukan dari lingkaran penuh dibagi dengan nilai maksimum *circular arc*. Dengan adanya gradien garis yang terbentuk dapat menentukan koordinat yang dilewati oleh garis tersebut. Node-node yang memiliki koordinat antara dua garis tersebut merupakan bagian dari satu kluster *circular arc*. Proses dilanjutkan dengan mengulang proses ke arc berikutnya searah jarum jam.

C. Hubungan Anak-Orang Tua pada Node

Hubungan anak-orang tua node menentukan jumlah maksimum node anak yang dapat dimiliki oleh node induk. Meningkatkan nilai berarti node induk perlu menerima dan memproses lebih banyak paket data sebelum mengirimkan ke node induk berikutnya. Diperlukan konfigurasi dan pengoptimalan tergantung pada populasi node dan distribusi untuk menyeimbangkan konsumsi energi dan tingkat konektivitas

DRESG pertama pada [8], setiap cabang memiliki rasio anak-induk yang tetap. Kerangka kerja yang ditingkatkan menggunakan pendekatan berbeda yang memperhitungkan distribusi node anak. hubungan anak-orang tua tidak lagi tetap, tetapi bergantung pada jumlah node di setiap ring. Mengingat jumlah cincin dan busur lingkaran adalah R dan K, C^k adalah matriks hubungan anak-orang tua $R \times R$ dari *circular arc* ke-k dengan $k = 1, 2, \dots, K$. Elemen matriks $c_{i,j}^k$ mengacu pada jumlah anak pada ring ke-j yang terhubung ke simpul induk di ring ke-i sebagai,

$$c_{i,j}^k = \left\lceil \frac{N_j^k}{N_i^k} \right\rceil \quad (1)$$

di mana fungsi pembulatan ke atas dan N_j^k adalah jumlah simpul pada busur lingkaran ke-k dan cincin ke-j dengan $i < j$, sebaliknya untuk N_i^k . Karena matriks yang diterapkan untuk *upstream* dalam kerangka kerja, $c_{i,j}^k$ adalah nol ketika $i \geq j$ untuk setiap kluster k yang membentuk matriks menjadi segitiga bawah. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, nilai K adalah 1 karena tidak memperhitungkan busur lingkaran [9].

D. Kombinasi Ring-Hop dengan Circular Arc Cluster

Untuk setiap cluster busur lingkaran k, sebuah node di ring r dapat mengirimkan data langsung ke gateway atau node lain di ring yang lebih dekat ke gateway [9]. Jika sebuah node dari ring r mengirim paket data ke sebuah node di ring (r-1), itu mendefinisikan koneksi sebagai one hop

atau $d(r)=1$. Ini juga berlaku untuk koneksi dua hop atau $d(r)=2$ ketika dikirim ke node dalam ring (r-2) dan lebih banyak lagi yang sama. Koneksi gateway langsung didefinisikan sebagai $d(r)=r$ saat paket data melompati sejumlah r. Rancangan koneksi jaringan dalam kerangka yang diusulkan ini didasarkan pada nilai $d(r)$ dengan menggabungkan berbagai kemungkinan multi-hop.

kombinasi R! ring-hop potensial untuk jaringan cincin R. Kombinasi ring-hop terdiri dari *direct hop* (DH), *next-ring hop* (NRH), dan *variable hop* (VH). DH atau single-hop routing memberi tahu node untuk mengirim data langsung ke gateway. NRH adalah perutean *multi-hop* yang mengirim data dalam rantai melalui semua cincin sebelum diterima oleh gateway. Sedangkan VH menggabungkan kedua metode yang disebutkan sebelumnya. Jaringan dengan opsi $R=1$ terbatas pada DH karena node mengirim data langsung ke gateway. Jaringan dengan $R=2$ memperoleh NRH di atas DH sebagai opsi karena node mampu melakukan satu lompatan. Untuk VH terjadi Minimal $R=3$ diperlukan dan mungkin untuk diterapkan dalam jaringan. Dengan alasan yang sama, potensi kombinasi VH adalah $R!-2$. Tabel 1 mencerminkan kombinasi ring-hop untuk jaringan dengan $R=3$ untuk membuat konsep DH, NRH, dan VH.

TABEL 1. POTENSI KOMBINASI RING-HOP UNTUK JARINGAN RING TIGA

Kombinasi Ring-Hop	$d(r) = 1$	$d(r) = 2$	$d(r) = 3$
1 (DH)	1	2	3
2 (NRH)	1	1	1
3 (VH)	1	1	2
4 (VH)	1	2	1
5 (VH)	1	1	3
6 (VH)	1	2	2

Setiap kombinasi ring-hop pada Tabel I digambarkan dengan matriks konektivitas yang merepresentasikan jumlah paket data yang dibawa dalam transmisi untuk satu node pada ring tertentu [8]. Matriks konektivitas ke-k yang direpresentasikan dalam Δ^k adalah matriks segitiga atas tanpa offset. Elemen $\lambda_{i,j}^k$ menyatakan nilai biner dalam matriks Δ^k dari baris i dan kolom j. Untuk $\lambda_{i,j}^k=1$, node pada ring i mengirimkan data ke ring j. Sebaliknya, $\lambda_{i,j}^k=0$, node pada ring i tidak mengirimkan data ke ring j. Tabel 2 memberikan kombinasi ring-hop yang dikonversi dari Tabel 1 ke dalam matriks konektivitas.

TABEL 2. KEMUNGKINAN MATRIKS *CONNECTIVITY* PADA JUMLAH *VIRTUAL RING* TIGA

Skema Routing	Connectivity matrix Δ^k
1 (DH)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
2 (NRH)	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
3 (VH)	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
4 (VH)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
5 (VH)	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
6 (VH)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Tabel 2, elemen diagonal matriks konektivitas ($i=j$) selalu 1 karena sebuah node harus mengirimkan paket datanya pada baseline minimum. Elemen segitiga bawah ($i<j$) selalu 0 karena kerangka perutean multi-hop bukan untuk transmisi hilir. Diasumsikan bahwa gateway memiliki akses ke saluran untuk mengirimkan sinyal langsung ke node, dibandingkan dengan node dengan sumber daya terbatas dari baterai.

Setelah menentukan kombinasi ring-hop potensial, langkah selanjutnya adalah menemukan perutean multi-hop hemat energi untuk node kritis [9]. Node kritis bertindak sebagai perwakilan untuk jaringan karena menghabiskan energi paling banyak dibandingkan dengan node lainnya. Di DH, simpul kritis adalah cincin jauh karena perlu menggunakan lebih banyak daya untuk mengatasi jarak transmisi. Di NRH, simpul kritis adalah cincin terdekat saat meneruskan paket data dari cincin lain

E. Konsumsi Energi Node

Node kritis memiliki masa hidup yang lebih pendek. Semakin banyak node kritis mati, semakin pendek umur jaringan. Oleh karena itu, cara memilih kombinasi ring-hop terbaik yang dapat mengurangi konsumsi energi node kritis menjadi penting. Pemilihan kombinasi ring-hop yang tepat dimulai dengan memodelkan konsumsi energi node. Pada penelitian ini model energi transceiver digunakan karena konsumsi energi terbesar diperlukan untuk transmisi dan penerimaan. Model ini juga telah digunakan oleh penelitian Biswajid Paul [9].

Untuk setiap busur lingkaran k dan cincin r , jumlah paket yang ditransmisikan dapat dirumuskan sebagai

$$n_p^k(r) = 1 + \sum_{i=r+1}^R \lambda_{r,i}^k c_{i,r}^k \quad (2)$$

Energi yang dibutuhkan untuk simpul pada busur lingkaran k dan cincin r untuk transmisi didefinisikan sebagai

$$E_{tx}^k(r) = \frac{n_p^k(r) L_{tx}(p) V_{DD}}{s_{tx}} \quad (3)$$

Masalah seumur hidup jaringan adalah penipisan energi yang tidak seragam dari node yang berbeda. Dengan kata lain, bagaimana mengurangi konsumsi energi dari node kritis dengan memilih kombinasi ring-hop terbaik. Perhitungan konsumsi energi dimulai dengan mencari spesifikasi energi modul komunikasi. Salah satu modul LoRa standar dan banyak tersedia adalah SX1272 oleh Semtech. Modul memiliki tingkat daya transmisi yang dapat dikonfigurasi pada Tabel 3 dan sensitivitas penerima pada Tabel 4 berdasarkan lembar data yang disediakan dari pabrikan [11].

TABEL 3. KOMUNIKASI TX MODUL LoRa SX1272

	Daya TX (dBm)	Arus TX (dBm)
Modul LoRa SX1272	20	125
	17	90
	13	28
	7	18

TABEL 4. KOMUNIKASI RX MODUL LoRa SX1272

	Date Rate (kbps)	Sensivitas (dBm)	Arus RX (mA)
Modul LoRa SX1272	9.380	-122	10.5
	1.172	-131	
	0.586	-134	
	0.293	-137	

Konfigurasi dipilih berdasarkan link budget yang tersedia di jaringan. Jaringan LoRaWAN merupakan jaringan nirkabel yang mengalami kehilangan transmisi yang dikenal dengan path loss yang dihitung dengan persamaan (2) dari [8]. Variabel d adalah jarak transmisi, dan f adalah frekuensi yang digunakan untuk transmisi. Persamaan dapat dikonversi untuk beradaptasi dengan kehilangan jalur tertentu dan menyesuaikan jarak node dengan (3)

$$PL(d) = 23.3 + 37.6(d) + 21\left(\frac{f}{900 \text{ MHz}}\right) \quad (4)$$

$$d = 10^{\left(\frac{PL(d) - 23.3 - 2121\left(\frac{f}{900 \text{ MHz}}\right)}{37.6}\right)} \quad (5)$$

Setiap node di setiap ring membutuhkan perhitungan path loss karena setiap node mungkin memiliki jarak transmisi yang berbeda. Proses penghitungan menggunakan node kritis yang mewakili cluster yang terhubung ke nilai maksimum yang dinyatakan dalam matriks hubungan anak-orang tua untuk memastikan bahwa hasil simulasi sebanding dengan pekerjaan sebelumnya. Dengan demikian, simulasi menghitung satu simpul untuk setiap cincin di setiap busur lingkaran.

Perhitungan dimulai dengan mencari konsumsi energi transmisi. Node yang memiliki anak perlu mengirimkan data dirinya dan anak mereka. Total paket yang perlu diteruskan dijelaskan dalam [9] sebagai

$$n_p(r) = 1 + \sum_{i=r+1}^R \lambda_{r,i} c_{i,r} \quad (6)$$

di mana r adalah cincin simpul saat ini. Karena metode yang diusulkan memiliki kluster lain dengan busur lingkaran yang dilambangkan dengan K untuk jumlah kluster dan k untuk busur simpul saat ini, persamaannya menjadi

$$n_p(r) = \sum_{k=1}^K (1 + \sum_{i=r+1}^R A_{r,i} c_{i,r}(k)) \quad (7)$$

untuk mengetahui jumlah rata-rata paket yang dikirimkan untuk satu node dalam cincin tertentu dari seluruh busur.

Jika paket membutuhkan agregasi sebelum mentransmisikan untuk mengurangi muatan transmisi. Hasil dari (4) atau (5) dibagi dengan nilai agregasi yang dilambangkan dengan $n_p^{[max]}$ yang disebutkan dalam [9] sebagai

$$n_{DP}^{[TX]}(r) = \frac{n_p(r)}{n_p^{[max]}} \quad (8)$$

Hasil yang diterapkan pada perhitungan konsumsi energi dijelaskan dalam [8] sebagai

$$e^{[TX]}(r) = n_{DP}^{[TX]}(r) \times \frac{L_{DP}}{S^{[TX]}} \times I^{[TX]}(p) \times V_{DD} \quad (9)$$

di mana L_{DP} adalah ukuran data dalam kilobyte dan $S^{[TX]}$ adalah kecepatan data yang digunakan untuk mengirim paket dari Tabel II. Produk dari kedua variabel ini adalah total waktu dalam detik untuk mengirim paket data. Kemudian, $I^{[TX]}$ adalah variabel arus transmisi modul dari Tabel II dan V_{DD} adalah untuk tegangan kerja modul. Tegangan dengan arus digabungkan akan memberikan nilai daya yang digunakan dalam Watt. Kemudian, konsumsi energi akan menjadi hasil perkalian daya dengan waktu dalam satuan Joule.

Untuk konsumsi energi pada sisi penerima, perhitungannya seperti yang dijelaskan pada [8] dengan

$$e^{[RX]}(r) = \sum_{i=r}^{R-1} A_{r,i+1} c_{i+1,r} \left(\frac{1 + \sum_{j=i+2}^R \Lambda_{i+1,j} c_{j,i+1}}{n_p^{[max]}} \right) \times \frac{L_{DP}}{S_{i+1,r}^{[TX]}} \times I^{[RX]}(p) \times V_{DD} \quad (10)$$

dimana memiliki metode yang sama dengan menghitung energi transmisi, dimulai dengan mencari jumlah paket yang diterima kemudian mencari waktu dan tenaga yang dibutuhkan untuk memproses. Untuk mengadaptasi cluster busur lingkaran, (10) diubah menjadi

$$e^{[RX]}(r) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=r}^{R-1} \Lambda_{r,i+1} c_{i+1,r}(k) \left(\frac{1 + \sum_{j=i+2}^R \Lambda_{i+1,j} c_{j,i+1}(k)}{n_p^{[max]}} \right) \right) \times \frac{L_{DP}}{S_{i+1,r}^{[TX]}} \times I^{[RX]}(p) \times V_{DD} \quad (11)$$

Menemukan konsumsi energi total hanya menambahkan kedua hasil dari (7) dan (9) seperti pada

$$e^{[TOTAL]}(r) = e^{[TX]}(r) + e^{[RX]}(r) \quad (12)$$

di mana (r) artinya perhitungan yang disajikan adalah untuk cincin tunggal. Oleh karena itu, untuk menghitung konsumsi energi total untuk sistem dan setiap kemungkinan kombinasi skema perutean membutuhkan pengulangan untuk setiap langkah. Sebuah loop untuk setiap matriks

konektivitas, konsumsi energi total setiap cincin, dan setiap busur lingkaran.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendekatan kerja ini menggunakan model matematis dan disimulasikan menggunakan MATLAB®. Inisialisasi dan konfigurasi simulasi menggunakan modul LoRa SX1272 pada frekuensi 868 MHz dan data telemetri GPS untuk LoRa dengan sebaran node yang berbeda. Untuk parameter lengkap yang digunakan dalam simulasi ini, lihat Tabel 5.

TABEL 5. PARAMETER PENGUJIAN PADA SIMULASI

Parameter	Value
Jumlah Node	1000
Distribusi Node	Random Uniform, Random Uniform Centered, Random Fibonacci, Fibonacci Spread
Frekuensi Kerja	868 MHz
Besar Data	19 Byte
Tegangan Kerja	3 V
Agregasi Data	Tidak Digunakan

A. Simulasi total konsumsi minimum energi circular ring dengan distribusi penyebaran node random uniform.

Tujuan simulasi pertama adalah untuk membandingkan dengan pekerjaan sebelumnya di [9]. Perbandingan yang dilakukan adalah dengan membuat kembali kerangka kerja untuk memastikan hasil dalam kondisi dan lingkungan yang sama. Total konsumsi energi minimum adalah jumlah energi yang dikonsumsi oleh node di setiap ring dengan energi terendah. Ini akan mendapatkan gambaran energi yang dibutuhkan untuk siklus pertukaran data paket dalam jaringan. Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 6.

TABEL 6. HASIL KONSUMSI ENERGI MINIMUM PADA VIRTUAL RING

Jumlah Virtual Ring	Critical Ring	Konsumsi Energi (mJ)
3	1	2,02
4	1	4,27
5	1	8,10
6	2	2,59
7	2	3,24

B. Simulasi total konsumsi minimum energi virtual ring dan circular arc menggunakan distribusi penyebaran node Random Uniform, Random Uniform Centered, Random Fibonacci, Fibonacci Spread

Skema penyebaran node dengan kluster dilakukan untuk mengurangi jarak transmisi antar node yang dilakukan saat melakukan hop antar ring dan mempersempit daerah transmisi, dengan memperhitungkan konfigurasi yang berbeda pada masing-masing virtual ring dan kluster circular arc sehingga memungkinkan untuk konsumsi energi dapat dioptimalkan.

Simulasi kedua membandingkan dampak penggunaan virtual ring dalam jaringan. Skenario ini menerapkan sistem ring clustering dengan menggunakan distribusi penyebaran node *Random Uniform*, *Random Uniform Centered*, *Random Fibonacci*, *Fibonacci Spread*, untuk mencari penggunaan metode penyebaran *critical node* pada ring sebagai energi yang terendah.

a) Distribusi penyebaran node *Random Uniform*

Tabel 7, menunjukkan hasil yang menerapkan sistem clustering pada virtual ring dengan dengan metode distribusi node random uniform

TABEL 7. HASIL SIMULASI TOTAL KONSUMSI ENERGI MINIMUM DISTRIBUSI NODE *RANDOM UNIFORM* PADA *VIRTUAL RING* DAN SISTEM *CLUSTERING*

Jumlah virtual ring	Critical Ring	Kosumsi Energi (mJ)							Skema Routing
		Div 2	Div 3	Div 4	Div 5	Div 6	Div 7	Div 8	
3	1	2,08	2,08	2,20	2,07	2,07	2,07	1,88	NRH
4	1	4,51	4,51	4,51	6,06	6,32	5,46	4,79	NRH
5	1	11,9	10,1	9,66	10,7	8,98	9,17	7,07	NRH
6	1	1,88	2,20	2,39	2,39	2,39	2,53	2,53	NRH
7	2	3,31	3,24	3,82	4,09	4,17	3,59	3,08	NRH

Hasil simulasi pada tabel 7 menunjukkan bahwa dengan distribusi yang berifat random uniform kombinasi optimal antara jumlah virtual ring dan node adalah 3 virtual ring yang memiliki energi terendah sebesar 2.20 mJ pada divisi 4 dengan critical ring 1 menggunakan skema *routing Next Ring Hop* (NRH)

b) Distribusi penyebaran node *Random Uniform centered*

TABEL 8. HASIL SIMULASI TOTAL KONSUMSI ENERGI MINIMUM DISTRIBUSI NODE *RANDOM UNIFORM CENTERED* PADA *VIRTUAL RING* DAN SISTEM *CLUSTERING*

Jumlah virtual ring	Critical Ring	Kosumsi Energi (mJ)							Skema Routing
		Div 2	Div 3	Div 4	Div 5	Div 6	Div 7	Div 8	
3	1	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	NRH
4	1	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	NRH
5	1	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	NRH
6	1,2	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	NRH
7	1	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	NRH

Hasil simulasi pada tabel 8 menunjukkan bahwa dengan distribusi yang berifat *random uniform centered* kombinasi optimal antara jumlah virtual ring dan node adalah 3 ring dan 6 ring, nilai bebas atau merata dari divisi 2 sampai dengan divisi 8 dengan critical node pada ring 1 dan memiliki energi terendah

sebesar 0,56 mJ menggunakan skema *routing Next Ring Hop* (NRH)

c) Distribusi penyebaran node *Random Fibonacci*

Hasil simulasi pada tabel 9 menunjukkan bahwa dengan distribusi yang berifat random fibonacci kombinasi optimal antara jumlah virtual ring dan circular arc adalah 3 virtual ring, mempunyai nilai energi total terendah sebesar 2,71 mJ pada divisi 7 dengan critical ring pada ring 1 menggunakan skema *routing Next Ring Hop* (NRH)

TABEL 9. HASIL SIMULASI TOTAL KONSUMSI ENERGI MINIMUM DISTRIBUSI NODE *RANDOM FIBONACCI* PADA *VIRTUAL RING* DAN SISTEM *CLUSTERING*

Jumlah virtual ring	Critical Ring	Kosumsi Energi (mJ)							Skema Routing
		Div 2	Div 3	Div 4	Div 5	Div 6	Div 7	Div 8	
3	1	1,63	2,34	2,20	1,63	1,81	2,71	2,53	NRH
4	1	3,24	4,33	5,41	6,57	5,86	3,77	4,09	NRH
5	1	5,22	7,89	7,28	4,76	6,83	11,5	5,85	NRH
6	1,2	1,88	2,71	1,69	2,20	1,69	3,08	9,01	VRH
7	1,2	3,92	0,88	3,43	2,41	2,15	2,95	5,12	VRH

d) Distribusi penyebaran node *Fibonacci Spread*

TABEL 10. HASIL SIMULASI TOTAL KONSUMSI ENERGI MINIMUM DISTRIBUSI NODE *FIBONACCI SPREAD* PADA *VIRTUAL RING* DAN SISTEM *CLUSTERING*

Jumlah virtual ring	Critical Ring	Kosumsi Energi (mJ)							Skema Routing
		Div 2	Div 3	Div 4	Div 5	Div 6	Div 7	Div 8	
3	1	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	NRH
4	1	4,07	4,07	4,07	4,51	4,07	4,51	4,07	NRH
5	1	7,53	8,36	8,36	10,1	9,03	11,2	9,47	NRH
6	1	2,20	2,20	2,20	2,20	2,59	2,20	2,20	VRH
7	1,2	3,22	3,45	3,41	3,45	3,45	3,43	3,45	VRH

Hasil simulasi pada tabel 10 menunjukkan bahwa dengan distribusi yang berifat random fibonacci kombinasi optimal antara jumlah virtual ring dan circular arc adalah 3 virtual ring yang mempunyai nilai energi total bebas atau merata dari divisi 1 sampai divisi 8 dengan energi terendah sebesar 2.02 mJ, critical ring pada ring 1 dan skema *routing* yang ideal menggunakan *Next Ring Hop* (NRH)

Dari perbandingan hasil simulasi tabel 7, tabel 8, tabel 9 dan tabel 10, simulasi skema distribusi node *Random Uniform centered* memiliki nilai energi terendah sebesar 0,56 mJ dikarenakan peningkatan efisiensi energi mengartikan node dapat memiliki masa aktif yang lebih lama.

IV. KESIMPULAN

Penelitian telah dilakukan untuk perancangan skema *multi-hop routing* menggunakan *virtual ring* dan *circular arc* untuk sistem telekomunikasi LoRaWAN dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dari beberapa skema distribusi *node*. Perancangan dilakukan dengan menggunakan simulasi model matematis untuk mendapatkan nilai konsumsi energi berdasarkan spesifikasi modul LoRa SX1272 dari masing-masing skema. Dapat disimpulkan dari penelitian ini bahwa

1. Perancangan penelitian dengan metoda skema kluster distribusi *node virtual ring* dan *circular arc* untuk *multi-hop routing* dapat meningkatkan efisiensi energi pada *critical node pada ring dibanding dengan tanpa circular arc*.
2. Dengan kombinasi skema distribusi *node random uniform centered* dapat meningkatkan efisiensi energi antara jumlah *virtual ring* dan *node* adalah 3 ring dan 6 ring, nilai bebas atau merata dari div 2 sampai dengan div 8 dengan *critical node* pada ring 1 dan memiliki energi terendah sebesar 0,56 mJ menggunakan skema routing *Next Ring Hop* (NRH).
3. Dari beberapa skema penelitian ini dengan distribusi yang berifat *random fibonacci* memiliki energi total tertinggi sebesar 2.71 mJ dengan kombinasi optimal antara jumlah *virtual ring* dan *node* adalah 3 *virtual ring* pada divisi 7 dengan *critical ring* 1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yoyon Efendi, "Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile", Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer, Vol. 4, No. 1, April 2018.
- [2] F. Muteba, K. Djouani, and T. Olwal, "A comparative Survey Study on LPWA IoT Technologies: Design, considerations, challenges and solutions," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, pp. 636–641, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROCS.2019.08.090.
- [3] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, Y. Zhang, M. Robert, and J. P. Koskinen, "Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13," *2016 IEEE Conf. Stand. Commun. Networking, CSCN 2016*, Dec. 2016, doi: 10.1109/CSCN.2016.7785170.
- [4] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, M. D. Cano, and A. F. Skarmeta, "Performance evaluation of lora considering scenario conditions," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/s18030772.
- [5] B. Sartori, S. Thielemans, M. Bezunartea, A. Braeken, and K. Steenhaut, "Enabling RPL multihop communications based on LoRa," *Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun.*, vol. 2017-October, Nov. 2017, doi: 10.1109/WIMOB.2017.8115756
- [6] L. Vangelista, "Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 1818–1821, Dec. 2017, doi: 10.1109/LSP.2017.2762960.
- [7] G. Zhu, C. H. Liao, M. Suzuki, Y. Narusue, and H. Morikawa, "Evaluation of LoRa receiver performance under co-technology interference," in *CCNC 2018 - 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference*, Jan. 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–7, doi: 10.1109/CCNC.2018.8319183.
- [8] S. Barrachina-Muñoz, B. Bellalta, T. Adame, and A. Bel, "Multi-hop communication in the uplink for LPWANs," *Comput. Networks*, vol. 123, pp. 153–168, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.comnet.2017.05.020.
- [9] B. Paul, "A Novel Energy-Efficient Routing Scheme for LoRa Networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 15, pp. 8858–8866, Aug. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2983765.
- [10] M. O. Farooq, "Multi-hop communication protocol for LoRa with software-defined networking extension," *Internet of Things*, vol. 14, p. 100379, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.IOT.2021.100379
- [11] "Semtech SX1272/73 Datasheet Rev. 4," 2023. Accessed: april. 5, 2023. [Online]. <https://manualzz.com/doc/55353362/semtech-sx1272-lora%C2%AE-transceiver-datasheet>