

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan dari 10.22146/jnteti.v13i3.8020

Routing Region Adaptif Mandiri pada Lalu Lintas Heterogen Jaringan Sensor Nirkabel

Muhammad Nur Rizal¹, Pari Delir Haghighi²

¹ Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281, Indonesia

² Caulfield School of Information Technology, Faculty of Information Technology, Monash University, Caulfield East, Victoria 3145, Australia

[Diserahkan: 29 Mei 2023, Direvisi: 13 Agustus 2023, Diterima: 11 Juli 2024]

Penulis Korespondensi: Muhammad Nur Rizal (email: mnrizal@mail.ugm.ac.id)

INTISARI — Makalah ini menyajikan skema perutean baru menggunakan informasi lokasi *node* untuk membuat *routing region* yang mengontrol *routing region* paket guna mencapai optimasi rute. Skema yang diusulkan bertujuan untuk mengurangi terjadinya *packet detour* atau perutean *overhead* lainnya yang disebabkan oleh transmisi paket yang tidak terarah. Kelebihan dari pendekatan ini adalah kemampuannya dalam meningkatkan masa pakai *node* pada jaringan sekaligus mengurangi waktu yang dibutuhkan sebuah paket untuk tiba di tujuan (*base station*, BS). Skema yang diusulkan ini menggunakan algoritma adaptif mandiri yang secara dinamis dapat menyesuaikan *routing region* berdasarkan perhitungan BS dari parameter lapisan jaringan untuk mencapai efisiensi energi sekaligus memenuhi kualitas data. *Routing region* membatasi area perutean dan membatasi terjadinya banjir data di seluruh jaringan, yang memiliki potensi membuang-buang sumber daya dan menyebabkan redundansi data. Simulasi menunjukkan bahwa skema yang diusulkan mengungguli skema *original fitness* dan SPEED berdasarkan konsumsi energi, waktu tunda (*delay*) transmisi, *throughput*, dan keandalan (rasio pengiriman paket) pada tingkat kemacetan yang berbeda. Skema yang diusulkan menawarkan *throughput* dua kali lipat dan mengurangi waktu tunda paket sebesar 20%. Selain itu, skema ini memiliki masa pakai yang lebih lama daripada skema lain, yaitu sekitar dua kali lipat ketika lalu lintas tidak terlalu macet. Namun, selisih masa pakai berkurang ketika jaringan memburuk.

KATA KUNCI — Jaringan Sensor Nirkabel, Algoritma Perutean, Algoritma Adaptif Mandiri, *Quality of Service* (QoS), Lalu Lintas Heterogen, Kemacetan Jaringan, Efisiensi Energi, Masa Pakai Jaringan.

I. PENDAHULUAN

Saat ini, sensor mendukung berbagai penginderaan [1]–[4], sehingga memungkinkan penelitian di berbagai aplikasi [5], [6], seperti pelacakan target, sistem keamanan, pemantauan habitat, pengendalian lingkungan, pemantauan lalu lintas, dan aplikasi layanan kesehatan. Terbatasnya daya baterai merupakan tantangan utama bagi aplikasi jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network*, WSN) [7]; sebagian besar pendekatan perutean dirancang untuk mengatasi *trade-off* energi, tetapi tidak banyak upaya yang dilakukan untuk mengoptimalkan *quality of service* (QoS) [8].

Tentu saja, dalam komunikasi data, keragaman lalu lintas yang berkaitan dengan berbagai klasifikasi data membutuhkan tingkat QoS yang berbeda [9]. Empat jenis paket digunakan dalam berbagai kategori lalu lintas dalam makalah ini, yaitu C1, C2, C3, dan C4. C1 mengacu pada lalu lintas yang sangat penting yang membutuhkan keandalan dan latensi rendah, seperti pelacakan objek dan layanan alarm keselamatan. Sementara itu, C2 adalah lalu lintas yang sensitif terhadap waktu tunda (*delay*), yang mengirimkan data dalam tenggat waktu yang diberikan, tetapi menoleransi sejumlah paket yang hilang, seperti layanan pemantauan/*streaming* video. C3 adalah lalu lintas yang sensitif terhadap keandalan, yang harus dikirim tanpa adanya hilang paket, tetapi menoleransi waktu tunda yang wajar, seperti layanan pemantauan data biasa. Terakhir, C4 mengacu pada *best effort traffic* tanpa persyaratan khusus.

Skema baru ini perlu menawarkan pendekatan umum yang mencakup semua atribut penting QoS ke dalam kerangka perutean tunggal. Skema ini harus mempertimbangkan persyaratan aplikasi yang berbeda. Dengan demikian, paket dapat dirutekan dengan *overhead* minimum guna menghemat

energi, mengurangi waktu tunda transmisi, dan memperpanjang masa perutean dengan tetap memaksimalkan *throughput*.

Banyak penelitian WSN telah mencoba menggunakan informasi lokasi *node* untuk perutean paket, penemuan perutean, dan pemeliharaan guna mencapai optimalisasi rute. Lokasi *node* digunakan untuk mengarahkan paket ke *node* tetangga yang memiliki jarak terdekat ke tujuan (*base station*, BS) guna mengurangi biaya komunikasi dan waktu tunda transmisi. Makalah ini menggunakan skema perutean baru yang memanfaatkan informasi lokasi *node* untuk membuat *routing region* yang membatasi area perutean dan membatasi banjir data di seluruh jaringan yang berpotensi membuang-buang sumber daya dan menyebabkan redundansi data.

Area perutean adalah zona persegi panjang yang dibuat dengan beberapa tahapan. Pertama, BS membuat garis untuk menghubungkan BS dan sumber (S); garis ini kemudian disebut sebagai S-BS. Kedua, BS mendefinisikan radius setiap pasangan sisi yang berdekatan dengan wilayah yang tegak lurus terhadap garis S-BS. Sisi-sisinya diberi nama *region side-1* (RS1) dan *region side-2* (RS2). Radius dapat disesuaikan dengan dinamis menggunakan algoritma adaptif mandiri berdasarkan perhitungan BS terhadap parameter lapisan jaringan sebagai cerminan nilai QoS. Penyesuaian radius diklasifikasikan ke dalam tiga level, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Setiap level tersebut menentukan rentang nilai QoS yang diklasifikasikan. Ketika nilai perhitungan QoS rendah, radiusnya akan diperbesar. Parameternya meliputi waktu tunda *end-to-end*, rasio pengiriman data, dan energi seluruh *node* di wilayah tersebut.

Skema ini memiliki beberapa kontribusi. Pertama, skema ini mampu membedakan data yang diperlukan setiap jenis lalu lintas dan menetapkan prioritas yang berbeda untuk jenis paket berbeda. Kedua, skema ini dapat mengimplementasikan pendekatan perutean *fitness* yang mempertimbangkan kualitas setiap *node*, sesuai dengan setiap kategori data yang memiliki persyaratan QoS yang berbeda. Ketiga, skema ini dapat mengatur *routing region* yang membatasi perutean data di zona tertentu guna mencapai efisiensi energi dan juga kualitas data. Terakhir, meskipun sering terjadi perubahan topologi, skema yang diusulkan dapat menyesuaikan radius *routing region* dengan menggunakan algoritma yang dapat beradaptasi sendiri, sehingga mampu mempertahankan kinerja QoS.

Makalah ini tersusun sebagai berikut: Bagian II memaparkan penelitian terkait dan Bagian III memaparkan pendekatan algoritma perutean yang diusulkan. Selanjutnya, penerapan dan evaluasi menggunakan studi simulasi komparatif disajikan pada Bagian IV. Terakhir, Bagian V merupakan kesimpulan.

II. PENELITIAN TERKAIT

Tujuan utama penelitian WSN terletak pada pendekatan manajemen energi yang memanfaatkan informasi geografis *node* untuk mengoptimalkan perutean data [10]. Beberapa pendekatan terkait penggunaan informasi lokasi telah dijelaskan sebelumnya [11].

Pendekatan pertama didasarkan pada protokol umum yang menggunakan informasi lokasi dari *node* sumber, tetangga, dan tujuan untuk meneruskan paket dalam mode *greedy*. Protokol-protokol ini meliputi Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [12], Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) [13], dan Greedy Other Adaptive Face Routing (GOAFR) [14]. GOAFR menggabungkan teknik *greedy* dan *face routing* untuk membatasi penemuan rute dan memilih *node* dengan jarak terdekat ke *node* pengirim. GOAFR cocok untuk jaringan dengan kepadatan tinggi. Namun, protokol ini membutuhkan lebih banyak perulangan, sehingga proses perutean untuk merutekan paket ke tujuan memerlukan waktu yang lebih lama. Mirip dengan GOAFR, GPSR membangun pendekatan *perimeter forwarding* dengan mengirimkan paket melalui *node* di tepi graf di sekitar tujuan ketika tidak ada *node* tetangga yang lebih dekat. GEAR merupakan perluasan dari mekanisme GPSR [13]. GEAR membagi *routing region* menjadi empat zona dan menggunakan energi yang tersisa serta informasi geografis dari *node* tetangga untuk memperkirakan biaya *link* sebuah jalur. GEAR memilih *node* yang lebih dekat ke tujuan dan menggunakan jalur sebelumnya jika tetangga ke tujuan tidak tersedia.

Pendekatan kedua didasarkan pada protokol yang membagi *routing region* ke dalam zona persegi panjang (*grid*) yang lebih kecil, seperti Geographical Adaptive Fidelity (GAF) [15] dan GRID [16]. Berdasarkan lokasi *node* dan radius transmisi, GAF membentuk sebuah *grid* virtual kecil. Sisi *grid* didefinisikan oleh $L = \frac{R}{\sqrt{5}}$. *Node-node* di dalam *grid* berkomunikasi satu sama lain dan secara berkala memilih *cluster head* yang secara aktif memonitor dan melaporkan semua kejadian kepada tujuan saat *node* lain tidur. Oleh karena itu, GAF dapat mencapai konservasi energi untuk memperpanjang masa pakai jaringan. GRID menggunakan bentuk *grid* dan melakukan *grid leader* untuk merutekan paket dengan cara *grid-by-grid*. GRID cocok untuk jaringan yang besar dan padat karena protokol ini membagi jaringan ke dalam wilayah yang lebih kecil (*grid*).

GRID juga dapat mempertahankan rute tetap aktif ketika *node* tujuan bergerak keluar dari wilayah tersebut dengan melakukan operasi *handoff* yang mirip dengan sistem seluler.

Pendekatan terakhir adalah algoritma yang menggunakan informasi berbasis lokasi untuk membatasi area perutean paket untuk mencapai optimalisasi rute. Protokol ini termasuk protokol Location-Aided Routing (LAR) [17], Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) [18], dan wireless sensor networks in home automation (WSNHA) - location-based self-adaptive routing (LBAR) [19]. LAR dan DREAM mencoba untuk mengurangi perutean *overhead* dengan cara membatasi area penemuan rute dalam zona *request* yang lebih kecil. Zona ini dapat diperluas dengan cara mengadaptasi bentuk berdasarkan kecepatan *mobile node*. Zona ini merepresentasikan tiga bentuk: persegi panjang, batang, dan kipas. Dalam [19], protokol mendefinisikan zona *request* silinder untuk menemukan rute, memelihara, dan meneruskan paket. Sebuah *node* dapat secara adaptif menyesuaikan radius zona silinder menggunakan teorema Bayesian yang dapat dipelajari sendiri berdasarkan probabilitas transmisi data yang berhasil dan yang tidak berhasil. Transmisi gagal ketika sebuah *node* sumber tidak menerima paket *route reply* dari *node* tujuan atau sebaliknya. Setiap *node* membuat tabel yang berisi jumlah transmisi paket yang berhasil dan gagal pada zona radius yang berbeda dan memilih radius yang memiliki probabilitas yang lebih tinggi untuk meneruskan paket.

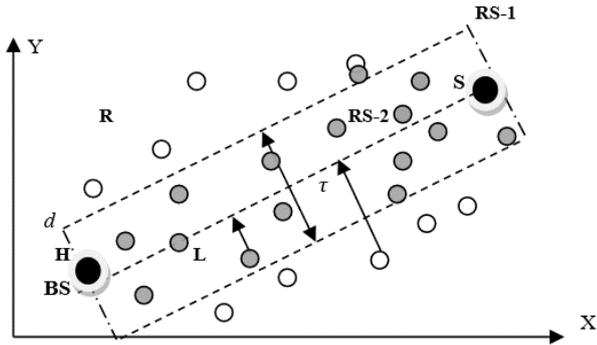
Skema yang diusulkan berbeda dengan algoritma sebelumnya yang menggunakan pendekatan zona perutean karena adaptasi *routing region* diinisiasi oleh BS (bukan *node*) untuk menghindari biaya *overhead* guna mempertahankan tabel rute ke tujuan dengan menggunakan perhitungan parameter QoS, seperti waktu tunda, rasio pengiriman data, dan energi semua *node* di wilayah tersebut. BS secara berkala menghitung metrik QoS untuk menemukan radius optimal dalam menentukan ukuran *routing region*.

Makalah ini membahas peningkatan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [20], [21]. Peningkatan ini bertujuan untuk meningkatkan optimasi rute dan membatasi relai/transmisi yang tidak terarah karena area perutean yang tidak tepat, sehingga membuang-buang energi dan meningkatkan waktu tunda transmisi di WSN.

Skema yang diusulkan menggunakan pendekatan zona *request* berdasarkan teknik LAR guna menemukan rute yang efektif untuk perutean data. Skema ini menggunakan algoritma adaptif mandiri yang secara dinamis menyesuaikan ukuran *routing region* berdasarkan perhitungan BS dari parameter lapisan jaringan untuk meningkatkan keberhasilan perutean data dengan tetap mempertimbangkan efisiensi energi. Makalah ini membandingkan skema yang diusulkan, bernama TeGaReGioN, dengan skema asli untuk aplikasi WSN yang memiliki jenis lalu lintas data yang berbeda berdasarkan perbedaan persyaratan QoS [22], yaitu TeGaR dan SPEED, karena algoritma yang sudah ada menggunakan pendekatan informasi berbasis lokasi dan mempertimbangkan gagasan QoS.

III. DESAIN PERUTEAN YANG DIUSULKAN

Pada algoritma yang diusulkan, setiap sensor memperoleh informasi geografis (lokasi) dengan menggunakan beberapa metode lokalisasi. Dengan menggunakan lokasi, setiap *node* berkomunikasi dengan tetangga terdekatnya yang berada dalam jangkauan transmisi *node* $\{N_{Nj}; distN_{Ni} \leq P_{range}\}$.



Gambar 1. Routing region pada skema yang diusulkan.

BS menyebarkan pesan yang berisi nilai *hop*-nya (0) dan berkoordinasi melalui jaringan agar setiap *node* dalam jaringan dapat menentukan jumlah *hop* dan jaraknya ke BS. Sebuah *node* secara berkala memperbarui tabel yang berisi energi, jarak ke BS, informasi tentang kegagalan akses saluran, dan panjang antrian paket serta menukar informasi tabel antartetangga. Saat ini, setiap *node* mengetahui lokasi dan atribut tetangganya untuk mengatur penemuan rute, perutean paket, dan pemeliharaan rute.

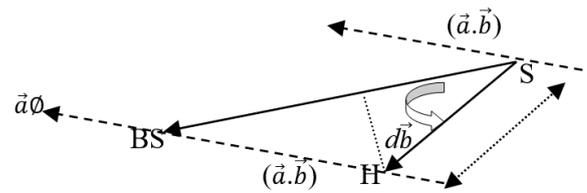
Skema yang diusulkan menggunakan *routing region* untuk membatasi area perutean data ke tujuan, sehingga BS secara rutin memperbarui ukuran *routing region* dengan menghitung nilai QoS guna menemukan radius optimal untuk wilayah tertutup. BS menyiarkan radius yang diperbarui, yang sesuai dengan vektor sumber BS tertentu ke seluruh jaringan, sehingga *node* dapat memperbarui lokasinya (masih berada di dalam *routing region* atau berada di luar). Setelah semua *node* menentukan lokasi pada area tertutup tertentu, skema yang diusulkan memilih *node* untuk meneruskan paket ke tujuan menggunakan pendekatan perutean *fitness*.

Algoritma yang diusulkan menawarkan dua metode yang memberikan efisiensi energi dan optimasi rute, yaitu algoritma *routing region* adaptif dan pendekatan perutean *fitness* [20]. Masing-masing metode dijelaskan sebagai berikut.

A. ALGORITMA ROUTING REGION

Pada skema yang diusulkan, ketika *node* sumber S ingin melaporkan peristiwa ke BS, *node* S harus mencari rute ke BS. Pada awalnya, *node* S, yang tidak memiliki jalur ke BS, mengirimkan pesan penemuan rute ke BS secara *hop-by-hop* hingga pesan tersebut tiba di tujuan. Dengan diterimanya pesan tersebut, BS kemudian memeriksa lokasi *node* sumber dalam tabel rutenya dan membuat garis lurus imajiner ke *node* sumber. Jika beberapa sumber membuat beberapa *event*, BS membuat lebih dari satu garis imajiner. BS secara berkala menentukan radius *routing region* dengan menggunakan perhitungan nilai QoS guna membuat setiap pasangan sisi wilayah yang berdekatan tegak lurus dengan garis (S-BS), yaitu RS1 dan RS2, seperti terlihat pada Gambar 1. BS menyiarkan radius sepasang S-BS tertentu melalui jaringan. Dengan demikian, setiap *node* dapat menentukan lokasinya, berada di dalam atau di luar wilayah tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada (6).

Routing region ditunjukkan sebagai garis putus-putus pada Gambar 1. Gambar 1 menunjukkan koordinat *node* S, BS, H, dan L sebagai masing-masing (X_s, Y_s) , (X_{BS}, Y_{BS}) , (X_H, Y_H) dan (X_L, Y_L) . Jarak antara *node* H dengan garis (S-BS) adalah d , sedangkan jarak antara *node* L dengan garis adalah τ . Syarat untuk menentukan suatu *node* berada pada daerah perutean adalah: jika jaraknya (d) adalah $0 \leq d \leq \text{Radius}(R)$, seperti *node*



Gambar 2. Cara menentukan jarak antara sebuah *node* ke garis (S-BS).

H; sebaliknya, jarak lainnya (τ) adalah $> R$, seperti *node* L. Garis (S-BS) tegak lurus dengan RS1 dan RS2, sehingga jarak antara setiap *node* ke garis (S-BS) seharusnya juga tegak lurus. Misalnya, diasumsikan bahwa garis (S-BS) adalah vektor \vec{a} dan garis yang menghubungkan *node* S ke *node* H adalah vektor \vec{b} , sedangkan \vec{a} dan $\vec{b} \in \mathbb{R}^n$ bukan vektor nol. Dari kedua vektor tersebut kemudian ditentukan sudut ϕ , seperti terlihat pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan bahwa d mengindikasikan jarak antara *node* H dengan garis (S-BS). Dengan demikian, ditemukan nilai d lebih rendah atau lebih tinggi dari (R) sebagai jari-jari wilayah tersebut. Gambar 2 menunjukkan bahwa hasil perkalian dua vektor \vec{a} dan \vec{b} adalah vektor $(\vec{a} \cdot \vec{b})$. Misalnya persamaan perkalian silang dua vektor yang diturunkan dari hukum kosinus adalah sebagai berikut.

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cos \phi. \quad (1)$$

Kemudian, sudut ϕ ditentukan menggunakan (2).

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|}. \quad (2)$$

Panjang vektor \vec{a} dan vektor \vec{b} adalah

$$\|\vec{a}\| = \text{Rad } S - BS = \sqrt{[(X_{bs} - X_s)^2 + (Y_{bs} - Y_s)^2]} \quad (3)$$

$$\|\vec{b}\| = \text{Rad } S - H = \sqrt{[(X_h - X_s)^2 + (Y_h - Y_s)^2]} \quad (4)$$

sehingga sudut ϕ ditentukan sebagai berikut.

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\sqrt{((X_{bs} - X_s) \cdot (X_h - X_s)) + ((Y_{bs} - Y_s) \cdot (Y_h - Y_s))}}{\sqrt{((X_{bs} - X_s)^2 + (Y_{bs} - Y_s)^2) \cdot ((X_h - X_s)^2 + (Y_h - Y_s)^2)}}. \quad (5)$$

Ketika sudut ϕ didefinisikan, jarak (d) dari *node* mana pun (pada kasus ini adalah *node* H) ke (S-BS) dihitung sebagai (6).

$$d = \|\vec{b}\| \cdot \sin \phi = \sqrt{[(X_h - X_s)^2 + (Y_h - Y_s)^2]} \cdot \sin \phi. \quad (6)$$

Berdasarkan (6), jika jarak (d) adalah $0 \leq d \leq R$, *node* berada dalam wilayah pemetaan; sebaliknya, jika $0 \leq R \leq d$, *node* berada di luar *routing region*. *Node* menginformasikan kepada tetangga tentang posisi relatif *node* terhadap *routing region*. Hal ini dilakukan untuk membantu penemuan rute dan perutean paket.

1) ROUTING REGION ADAPTIF MANDIRI

Pada situasi dengan lalu lintas yang tinggi, banyak *node* dapat menjadi macet atau lebih cepat mati, sehingga menyebabkan hilangnya paket karena terjadi kegagalan rute paket. Kemacetan menyebabkan kesulitan merutekan paket dari sumber ke tujuan. Sebagai upaya mengatasi situasi ini, skema yang diusulkan perlu memperluas radius (R) *routing region*, sehingga dapat melibatkan lebih banyak *node* untuk berpartisipasi dalam perutean data. Sebaliknya, ketika lalu lintas normal dan QoS meningkat, algoritma yang diusulkan mengurangi radius *routing region* secara adaptif menjadi area yang lebih kecil. *Routing region* yang lebih kecil dapat

TABEL I
PEMETAAN ANTARA NILAI QoS DAN PENYESUAIAN ROUTING REGION

No	Adaptasi Pembelajaran Mandiri		
	Definisi (RR)	Nilai QoS	Radius
1	Rendah	$0 < \text{nilai} \leq a$	$0,5R$
2	Sedang	$a < \text{nilai} \leq b$	R
3	Tinggi	$\text{nilai} > b$	$2R$

menghemat konsumsi energi karena *node* yang digunakan untuk mengirimkan paket akan lebih sedikit dan, di sisi lain, lebih banyak *node* di luar zona perutean yang masuk ke mode *idle*. Selain itu, radius statis setiap *routing region* tidak harus digunakan untuk mengatasi dinamika jaringan, yaitu perubahan topologi, ketidakstabilan *link*, atau ketersediaan akses saluran. Skema yang diusulkan dirancang untuk dapat beradaptasi dengan perubahan dalam jaringan, dengan mengusulkan *routing region* yang dapat beradaptasi sendiri berdasarkan nilai parameter QoS untuk mencapai kinerja QoS yang optimal.

Keputusan penyesuaian radius tersebut didasarkan pada proses belajar mandiri yang dilakukan BS setelah mempertimbangkan informasi berikut.

1. Waktu tunda kedatangan paket secara *end-to-end*.
2. Rasio pengiriman data yang ditentukan dari jumlah data yang diterima di BS dibagi dengan jumlah data yang dikirim sumber.
3. Keseluruhan energi semua *node* dalam perutean.

2) FORMULA ROUTING REGION

Pada bagian ini, dijelaskan cara skema membuat keputusan berdasarkan evaluasi parameter lapisan jaringan (metrik QoS) untuk menyesuaikan *routing region* secara dinamis. Pembelajaran mandiri BS dapat diwujudkan dengan rumus berikut.

$$RR(\text{region}) = \frac{\sum_{x=1}^3 (\alpha QoS_x)}{x} \tag{7}$$

$$RR(\text{region}) = \frac{\alpha_1 QoS(\text{de}) + \alpha_2 QoS(\text{En}) + \alpha_3 QoS(\text{Dr})}{3} \tag{8}$$

Fungsi $\alpha_1 QoS(\text{de})$ adalah fungsi waktu tunda seluruh lalu lintas data dalam jangka waktu tertentu. Makin rendah waktu tundanya, makin baik kinerja QoS. Parameter α_1 merupakan konstanta pembobotan untuk membakukan nilai waktu tunda.

Fungsi $\alpha_2 QoS(\text{En})$ adalah fungsi yang mewakili energi semua *node* di *routing region*. Lebih banyak energi berarti peluang *node* untuk dipertahankan dalam mengirimkan data lebih tinggi. Parameter α_2 adalah faktor bobot standarisasi untuk energi.

Fungsi $\alpha_3 QoS(\text{Dr})$ adalah fungsi rasio pengiriman data (*Dr*) pada BS. Rasio yang lebih tinggi mencerminkan efektivitas algoritma perutean dalam perutean paket. Parameter α_3 adalah faktor pembobotan standarisasi *Dr*.

Tabel I menunjukkan penyesuaian *routing region* yang dapat diklasifikasikan menjadi tiga tingkat berbeda, misalnya (rendah, sedang, tinggi). Rendah didefinisikan sebagai radius *routing region* yang ditetapkan ke $0,5R$ oleh algoritma. Sementara itu, sedang memiliki (R) dan tinggi bernilai $2R$. R adalah rentang transmisi daya awal. Nilai terbaik dari a dan b membantu menemukan kinerja rute yang optimal.

B. PENDEKATAN PERUTEAN FITNESS

Setelah menetapkan *routing region* dan menentukan posisi *node* terhadap wilayah tersebut, skema yang diusulkan mempertimbangkan kualitas setiap *node* di wilayah tersebut dengan melihat kesesuaian *node* dengan setiap jenis lalu lintas

guna melakukan diferensiasi rute. Hal tersebut dilakukan menggunakan fungsi *fitness* untuk memilih kandidat *node y* berikutnya karena tipe kategori data yang berbeda sebagai berikut [20].

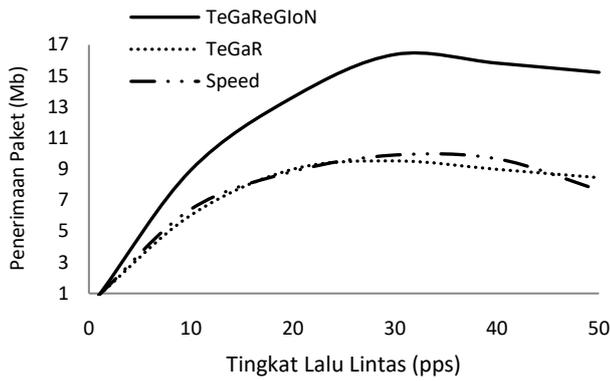
$$Fit(y) = \omega_0 f(E_y) + \omega_1 f(\text{dist}_y - BS) + \omega_2 f(\text{Err}_y) + \omega_3 f(\text{Load}_y) \tag{9}$$

dengan $\omega_0 f(E_y)$ merupakan faktor yang mencerminkan sisa energi berdasarkan masa pakai baterai. *Node* dengan energi yang lebih tinggi memiliki kemungkinan lebih besar untuk dipilih. ω_0 adalah konstanta pembobotan dan $\omega_1 f(\text{dist}_{y-BS})$ adalah faktor jarak antara *node* dan BS yang mewakili estimasi waktu tunda transmisi data. Makin dekat dengan tujuan, prediksi waktu tunda sebuah *node* makin rendah. *Node* tersebut juga akan makin tertarik untuk meneruskan paket *real-time*. Parameter ω_2 adalah faktor pembobotan, sedangkan fungsi $\omega_2 f(\text{Err}_y)$ merupakan fungsi yang mengevaluasi ketersediaan *link* dari kandidat *node* berikutnya. Tingginya tingkat kesalahan ditunjukkan dengan banyaknya kegagalan akses saluran. Hal ini dapat menurunkan kemungkinan *node* untuk dipilih. Fungsi $\omega_3 f(\text{Load}_y)$ merupakan faktor yang mencerminkan jumlah paket yang menunggu dalam antrian. Faktor ini membuat *node* yang banyak digunakan menjadi kurang menarik, meskipun *node* tersebut memiliki banyak energi. Parameter ω_3 adalah faktor pembobotan.

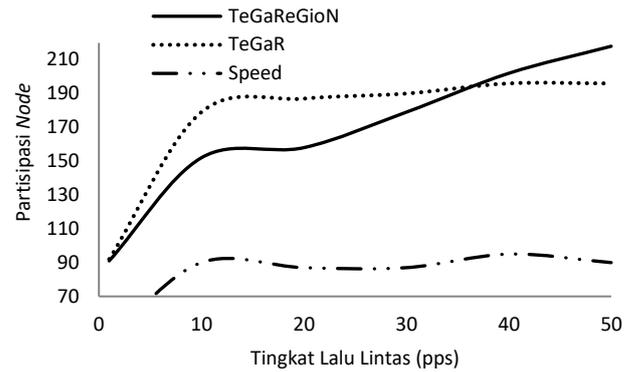
Setiap jenis paket memerlukan bobot yang berbeda untuk parameter yang berbeda dan penjumlahan konstanta pembobotannya adalah 1. Contohnya adalah paket QoS tertinggi memberikan bobot yang tinggi untuk energi dan jarak karena memerlukan keandalan dan latensi yang lebih rendah. Lalu lintas yang dapat diandalkan membutuhkan bobot energi yang lebih tinggi. Sementara itu, lalu lintas yang sensitif terhadap waktu tunda membutuhkan bobot jarak yang lebih tinggi. Terakhir, untuk semua parameter 3, layanan *best-effort* diberi bobot yang sama.

IV. SIMULASI DAN EVALUASI

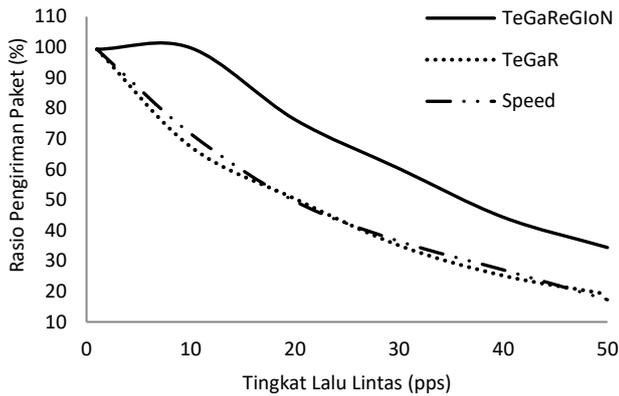
Pada algoritma yang diusulkan, setiap sensor mengetahui lokasinya. Untuk mengevaluasi pendekatan di atas, WSN berbasis Java (*Java-based WSN*, JWSN) dikembangkan untuk membangun grafik jaringan dan menyimulasikan algoritma dalam hal *throughput*, waktu tunda, dan masa pakai jaringan. Simulator ini menggunakan mekanisme *carrier-sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA) [23], yang umumnya menggunakan protokol 802.11 untuk jaringan nirkabel. Sebelum memulai transmisi data, CSMA/CA mengharuskan pengirim dan penerima mengirimkan paket *request to send* (RTS) dan *clear to send* (CTS) untuk mengurangi tabrakan paket. Ketika sebuah *node* mengetahui RTS dari *node* tetangga, tetapi *node* tersebut bukan CTS yang sesuai, *node* tersebut akan meneruskan paket ke tetangga lainnya. Dalam jaringan, 350 *node* ditempatkan secara acak pada jaringan berukuran $300 \times 300 \text{ m}^2$, sedangkan BS, yang merupakan tujuan, terletak di tengah-tengah jaringan. Kemacetan dibuat dengan menciptakan aliran data dari enam sumber dengan tingkat lalu lintas yang berbeda ($1-50 \text{ packet per second}$ (pps)). Sumber-sumber tersebut ditempatkan di sudut dan tepi jaringan. Untuk menguji ketahanan dan efisiensi energi skema, simulasi dijalankan selama 300 s dengan berbagai parameter sebagai berikut: *node* stasioner, kecepatan data (250 kbps), ukuran paket (1 kb), periode siklus Hello (8 s), energi awal (15 J), dan jangkauan transmisi awal (30 m).



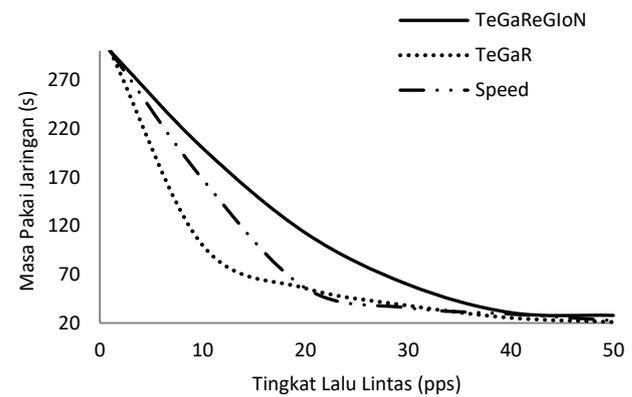
Gambar 3. Penerimaan paket pada semua jenis lalu lintas.



Gambar 5. Penyeimbangan beban.



Gambar 4. Rasio pengiriman data pada semua tipe lalu lintas.



Gambar 6. Periode ketika node pertama mati (s).

Gambar 3 menunjukkan penerimaan paket dari setiap skema untuk semua jenis lalu lintas. Secara keseluruhan, TeGaReGioN mencapai *throughput* tertinggi dibandingkan skema lain. Semua skema mengalami peningkatan *throughput* ketika jumlah data yang mengalir dalam jaringan makin besar. Namun, makin tinggi lalu lintas, makin tinggi pula angka kehilangan paket, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Sebagai contoh, TeGaReGioN mencapai puncak penerimaan paket (16,5 Mb) pada 30 pps sebelum kecepatannya stabil (15,5 Mb) pada sisa lalu lintas. Sebaliknya, pada tren yang sama, pendekatan *original fitness* SPEED hanya mencapai hampir setengah *throughput* (sekitar 9-10 Mb) pada kemacetan menengah hingga tinggi.

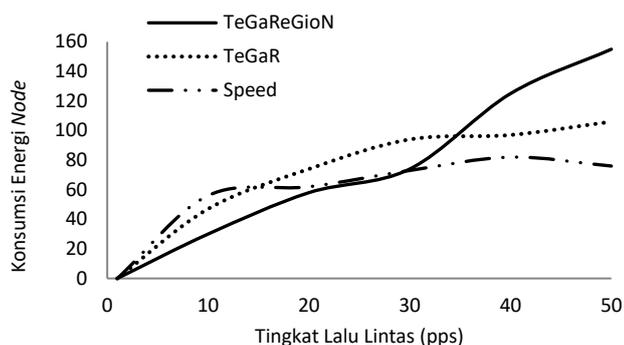
Meskipun penerimaan paket meningkat pada lalu lintas yang lebih tinggi (lihat Gambar 4), rasio pengiriman paket menurun secara signifikan seiring dengan lebih banyaknya paket yang dimasukkan ke dalam jaringan. Kemacetan menyebabkan banyak *node* gagal untuk merelai paket ke BS sebagai tujuan, sehingga banyak paket yang hilang selama transmisi data. Gambar 4 menunjukkan bahwa skema yang diusulkan, yang mengontrol perutean data di area tertutup, berhasil mencegah paket keluar dari jalurnya dan mengurangi biaya komunikasi. Oleh karena itu, lebih banyak paket dapat dikirim ke BS meskipun jaringan padat. Dalam kondisi padat, TeGaReGioN dapat mempertahankan rasio pengiriman sebesar 35%, sedangkan skema lain hanya mampu mempertahankan tidak lebih dari 20%. Pada simulasi lalu lintas yang tidak terlalu padat, TeGaReGioN mencapai rasio hampir 100%, tetapi dua skema lainnya hanya mencapai rasio paket sebesar 67%. Gambar 4 memvalidasi bahwa algoritma TeGaReGioN sensitif terhadap dinamika jaringan.

Gambar 5 menunjukkan pentingnya algoritma perutean untuk membedakan rute. Dibandingkan dengan SPEED, kedua

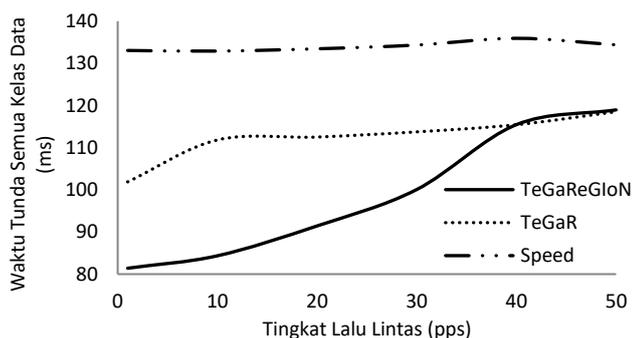
skema yang diusulkan dan skema asli berupaya untuk menyeimbangkan beban jaringan dengan melibatkan hampir dua kali lipat lebih banyak *node* untuk berpartisipasi dalam pengiriman data. Pada simulasi, SPEED melibatkan sekitar 90 *node* dan dua skema yang lain menggunakan sekitar 150 hingga 200 *node*. Dengan meningkatkan jumlah *node* dalam perutean, algoritma ini memaksimalkan pemanfaatan jaringan untuk mencapai efisiensi. Hal ini tidak terjadi pada SPEED karena SPEED tidak mengaktifkan diferensiasi lalu lintas dan tidak akan mengubah jalur perutean kecuali jika SPEED tidak dapat mempertahankan kecepatan paket yang dibutuhkan.

Gambar 6 menunjukkan masa pakai rata-rata, yaitu ketika *node* pertama kehabisan energi. Makin lama waktu *node* aktif sebelum mengalami kegagalan, makin sedikit terjadinya kerusakan rute yang menurunkan kinerja jaringan. Keuntungan penggunaan *routing region* dibandingkan dengan algoritma *non-routing region* adalah kemampuannya menghemat baterai *node* dalam merelai paket. Sebagai contoh, ketika lalu lintas tidak terlalu padat, TeGaReGioN menggandakan masa pakai rute, sedangkan ketika jaringan lebih padat masa pakai menurun. Selain itu, pada 20 pps, skema yang diusulkan dapat memperpanjang masa pakai *node* pertama hingga 112 detik, sementara skema lain hanya dapat memperpanjang selama sekitar 56 detik. Sementara itu, skema lain hanya mampu mempertahankannya sekitar 56 s. Pada kemacetan yang parah, semua skema secara signifikan memiliki masa pakai yang rendah karena banyak *node* yang terlalu cepat gagal.

Efisiensi skema yang diusulkan dibuktikan dengan lebih sedikitnya kegagalan *node* selama simulasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Ketika energi *node* di wilayah tersebut turun, nilai perhitungan QoS menurun. Kemudian, TeGaReGioN melakukan pendekatan wilayah yang dapat diatur sendiri yang secara dinamis meningkatkan radius area



Gambar 7. Konsumsi energi untuk komunikasi data.



Gambar 8. Rata-rata waktu tunda untuk semua lalu lintas.

perutean atau sebaliknya. *Routing region* yang diperluas dapat meningkatkan tingkat partisipasi *node* dalam pengiriman paket. Perluasan tersebut dapat menyeimbangkan beban jaringan dan membantu banyak *node* menghemat energi. Sebaliknya, algoritma *original fitness* tanpa pendekatan *routing region* mungkin mengalami *packet detouring (broadcast storm)*, peningkatan biaya komunikasi, dan *overhead*. Oleh karena itu, meskipun *node* yang terpakai pada skema yang diusulkan lebih sedikit, *throughput* dan rasio pengiriman datanya lebih tinggi.

Keunggulan mekanisme *routing region* ditunjukkan pada Gambar 8. TeGaReGioN memperpendek waktu tunda paket pada semua kategori data. Skema yang diusulkan dapat menurunkan waktu tunda kurang lebih sekitar 20% dibandingkan dengan skema *original fitness* dan hampir 50% dibandingkan dengan SPEED. Oleh karena itu, tingkatnya menjadi sama antara TeGaReGioN dan skema lainnya, yang menggunakan pendekatan *fitness* ketika lalu lintas terlalu macet. Gambar 8 menunjukkan bahwa dengan mengontrol *routing region* paket, skema yang diusulkan dapat menghindari *packet detour* dan memperpendek *en-route data* dari sumber ke BS.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menyelidiki analisis *packet detour* yang disebabkan oleh transmisi data yang tidak terarah. Penelitian ini memperkenalkan pendekatan perutean untuk mengatasi masalah relai paket yang tidak terarah karena area perutean yang tidak tepat, yang dapat memengaruhi kinerja jaringan secara keseluruhan. Skema yang diusulkan, TeGaReGioN, melakukan mekanisme *routing region* untuk mengontrol area perutean guna mencapai optimalisasi rute. Mekanisme ini kemudian dikombinasikan dengan metode *fitness* untuk mendukung lalu lintas heterogen pada kebutuhan QoS yang berbeda. Skema yang diusulkan menggunakan algoritma adaptif mandiri berdasarkan perhitungan BS terhadap parameter lapisan jaringan untuk secara dinamis menyesuaikan

area perutean guna mencapai efisiensi energi sekaligus memenuhi kualitas data. Hasilnya menunjukkan bahwa adaptasi mandiri *routing region* memiliki toleransi yang lebih besar terhadap perubahan kondisi jaringan dan mengurangi kebutuhan intervensi manusia untuk mempertahankan kinerja QoS dalam lingkungan dinamis. Simulasi menunjukkan bahwa skema yang diusulkan mengungguli skema *original fitness* dan SPEED dalam hal konsumsi energi, waktu tunda transmisi, *throughput*, dan keandalan (rasio pengiriman paket) pada tingkat kemacetan yang berbeda.

Berdasarkan skema yang diusulkan, diperlukan pendekatan yang efisien dan pintar yang menawarkan adaptasi lancar (tidak tajam/mendadak) dalam meningkatkan kinerja QoS dengan menyesuaikan *routing region* sesuai dengan situasi dinamika jaringan saat ini. Pendekatan adaptasi berikutnya harus memenuhi *trade-off* antara efisiensi dan keakuratan penyesuaian wilayah rute. Dengan demikian, peningkatan *throughput* dan penurunan waktu tunda dengan konsumsi energi yang lebih rendah dapat dicapai.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Muhammad Nur Rizal; metodologi, Muhammad Nur Rizal; perangkat lunak, Muhammad Nur Rizal; validasi, Muhammad Nur Rizal dan Pari Delir Haghghi; analisis formal, Muhammad Nur Rizal; investigasi, Pari Delir Haghghi; sumber daya, Muhammad Nur Rizal dan Pari Delir Haghghi; penulisan—penyusunan draf asli, Muhammad Nur Rizal; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Pari Delir Haghghi; visualisasi, Muhammad Nur Rizal; supervisi, Pari Delir Haghghi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Pemerintah Indonesia yang memberikan beasiswa kepada penulis pertama sebagai dosen di Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Hastono Bayu atas nasehat dan sarannya yang sangat berharga.

REFERENSI

- [1] P. Dutta dkk., "Design of a wireless sensor network platform for detecting rare, random, and ephemeral events," dalam *IPSN 2005 4th Int. Symp. Inf. Process. Sens. Netw.*, 2005, hal. 497–502, doi: 10.1109/IPSN.2005.1440983.
- [2] L. Gu dkk., "Lightweight detection and classification for wireless sensor networks in realistic environments," dalam *SenSys '05, Proc. 3rd Int. Conf. Embed. Networked Sens. Syst.*, 2005, hal. 205–217, doi: 10.1145/1098918.1098941.
- [3] A.P. Singh dkk., "Evolution of wireless sensor network design from technology centric to user centric: An architectural perspective," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 16, no. 8, hal. 1–24, Agu. 2020, doi: 10.1177/1550147720949138.
- [4] J.-S. Pan dkk., "A lightweight intelligent intrusion detection model for wireless sensor networks," *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2021, hal. 1–15, Mei 2021, doi: 10.1155/2021/5540895.
- [5] A.-S.K. Pathan, G. Heo, dan C.S. Hong, "A secure lightweight approach of node membership verification in dense HDSN," dalam *MILCOM 2007 - IEEE Mil. Commun. Conf.*, 2007, hal. 1–6, doi: 10.1109/MILCOM.2007.4455133.
- [6] L. Ge dan T. Jiang, "A privacy protection method of lightweight nodes in blockchain," *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2021, hal. 1–17, Jul. 2021, doi: 10.1155/2021/2067137.
- [7] N.P. Apriyanto, E. Firmansyah, dan L.M. Putranto, "Piezoelectric energy harvester for IoT sensor devices," *Int. J. Inf. Technol. Elect. Eng.*, vol. 5, no. 4, hal. 124–129, Des. 2021, doi: 10.22146/ijtee.67120.

- [8] J.N. Al-Karaki dan A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wirelles Commun.*, vol. 11, no. 6, hal. 6–28, Des. 2004, doi: 10.1109/MWC.2004.1368893.
- [9] Z. Polkowski, J.P. Mishra, dan S.K. Mishra, "Prioritization of complex heterogeneous queries using evolutionary and computational approach," dalam *2021 13th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. (ECAI)*, 2021, hal. 1–5, doi: 10.1109/ECAI52376.2021.9515096.
- [10] S. Chaudhari, "A survey on multipath routing techniques in wireless sensor networks," *Int. J. Netw. Virtual Org.*, vol. 24, no. 3, hal. 267–328, Jun. 2021, doi: 10.1504/IJNVO.2021.115818.
- [11] Q. Usman dkk., "A reliable link-adaptive position-based routing protocol for flying ad hoc network," 2020, *arXiv.2010.06005*.
- [12] A. Rodrigues, A.B. Reis, dan S. Sargento, "GPSR-PPU: Greedy perimeter stateless routing with position prediction and uncertainty for FANETs," dalam *2020 IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Workshops (PerCom Workshops)*, 2020, hal. 1–6, doi: 10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156255.
- [13] Y. Yu, R. Govindan, dan D. Estrin, "Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," UCLA Computer Science Dept., Los Angeles, CA, AS, Tech. Rep. UCLA/CSD-TR-010023, Mei 2001.
- [14] F. Kuhn, R. Wattenhofer, dan A. Zollinger, "Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing," dalam *MobiHoc '03, Proc. 4th ACM Int. Symp. Mob. Ad Hoc Netw. Comput.*, 2003, hal. 267–278, doi: 10.1145/778415.778447.
- [15] Y. Xu, J. Heidemann, dan D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing," dalam *MobiCom '01, Proc. 7th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, 2001, hal. 70–84, doi: 10.1145/381677.381685.
- [16] W.-H. Liao, J.-P. Sheu, dan Y.-C. Tseng, "GRID: A fully location-aware routing protocol for mobile ad hoc networks," *Telecommun. Syst.*, vol. 18, no. 1–3, hal. 37–60, Sep. 2001, doi: 10.1023/A:1016735301732.
- [17] Y.-B. Ko dan N.H. Vaidya, "Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks," dalam *MobiCom '98, Proc. 4th Annu. ACM/IEEE Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, 1998, hal. 66–75, doi: 10.1145/288235.288252.
- [18] S. Basagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk, dan B.A. Woodward, "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)," dalam *MobiCom '98, Proc. 4th Annu. ACM/IEEE Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, 1998, hal. 76–84, doi: 10.1145/288235.288254.
- [19] X.H. Li, S.H. Hong, dan K.L. Fang, "Location-based self-adaptive routing algorithm for wireless sensor networks in home automation," *EURASIP – J. Embed. Syst.*, vol. 2011, hal. 1–15, Feb. 2011, doi: 10.1155/2011/484690.
- [20] M.N. Rizal, I. Gondal, P.D. Haghighi, dan B. Qiu, "Priority based expansion of neighborhood size for heterogeneous traffic routing in WSN," dalam *PE-WASUN '12, Proc. 9th ACM Symp. Perform. Eval. Wireless Ad Hoc Sens. Ubiquitous Netw.*, 2012, hal. 101–106, doi: 10.1145/2387027.2387045.
- [21] M.N. Rizal, "Quality of service routing for wireless sensor network," Tesis M.S., Monash University, Melbourne, Australia, 2014.
- [22] T. He, J.A. Stankovic, C. Lu, dan T. Abdelzaher, "SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks," dalam *23rd Int. Conf. Distrib. Comput. Syst.*, 2003, hal. 46–55, doi: 10.1109/ICDCS.2003.1203451.
- [23] M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, dan T.D. Hämäläinen, "Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications," dalam *PE-WASUN '06, Proc. 3rd ACM Int. Workshop Perform. Eval. Wireless Ad Hoc Sens. Ubiquitous Netw.*, 2006, hal. 48–57, doi: 10.1145/1163610.1163619.