

IMPLEMENTASI PROTOKOL ROUTING HEED PADA WIRELESS SENSOR NETWORK DENGAN PERANGKAT BERBASIS MODUL KOMUNIKASI NRF24L01

Giservin Tifira Zain¹, Rakhmadhany Primananda^{*2}, Agung Setia Budi³

^{1,2,3}Universitas Brawijaya, Malang

Email: ¹giservin2000@student.ub.ac.id, ²rakhmadhany@ub.ac.id, ³agungsetiabudi@ub.ac.id

*Penulis Korespondensi

(Naskah masuk: 22 Desember 2022, diterima untuk diterbitkan: 27 Desember 2022)

Abstrak

Wireless sensor network (WSN) merupakan sistem yang terdiri dari node sensor otonom yang terdistribusi pada suatu area untuk melakukan fungsi tertentu. Konsumsi energi sangat perlu diperhatikan dalam jalannya sistem WSN maka dari itu diimplementasikan protokol routing yang dapat meningkatkan efisiensi energi salah satunya adalah protokol cluster-based. Protokol Hybrid Energy-Efficient Distributed (HEED) merupakan cluster-based routing dengan komunikasi multi-hop pada cluster head-nya. Tujuan dari protokol HEED adalah untuk membentuk cluster yang terdistribusi dengan baik dalam jaringan. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan protokol HEED pada perangkat real dengan berbasis modul nRF24L01 untuk melihat bagaimana kinerja yang dihasilkan. Implementasi dilakukan pada jaringan dengan skala kecil dimana node sensor hanya berjumlah 8 dengan jarak antar node yang tidak jauh sehingga setiap node masih dapat menjangkau semua node pada jaringan. Dengan adanya keterbatasan nRF24L01, pembentukan cluster memakan banyak waktu dan energi karena dibutuhkan perhitungan cost node dan sinkronisasi waktu antar node. Kemudian waktu pemilihan cluster head kembali setelah jalannya operasi jaringan perlu dipertimbangkan agar tidak mengganggu fungsionalitas sistem. Pergantian cluster head baru sering terjadi ketika waktu sudah lama berjalan pada jaringan dan itu bervariasi tergantung pada energi baterai. Pada pengujian dengan energi baterai 6000 mWh, didapatkan lifetime HEED adalah 150 jam 32 menit 41 detik yang merupakan 94% peningkatan dari lifetime protokol static clustering. Namun pada jaringan skala kecil dengan perangkat berbasis nRF24L01 ini, lifetime HEED masih berada 28.5% di bawah LEACH.

Kata kunci: *wireless sensor network, protokol routing, HEED, nRF24L01, cluster, energi*

THE IMPLEMENTATION OF HEED ROUTING PROTOCOL ON WIRELESS SENSOR NETWORK WITH NRF24L01 COMMUNICATION MODULE-BASED DEVICE

Abstract

Wireless sensor network (WSN) is a system consisting of autonomous sensor nodes distributed in an area to perform certain functions. Energy consumption really needs to be considered in the WSN system, therefore a routing protocol that can improve energy efficiency is implemented, one of which is a cluster-based protocol. The Hybrid Energy-Efficient Distributed (HEED) protocol is a cluster-based routing with multi-hop communication on its cluster head. The purpose of the HEED protocol is to form well-distributed clusters in the network. This study aims to implement the HEED protocol on real devices based on the nRF24L01 module to see how the performance generated is. The implementation is carried out on a small-scale network where the sensor nodes only amount to 8 and the distance between is not far away making each node still reach all nodes on the network. With the limitations of the nRF24L01, cluster formation is quite time-consuming and energy-consuming due to the need for calculating node costs and synchronizing time between nodes. Then the timing to select the cluster head again after network operation needs to be considered so as not to interfere with the system's functionality. The selection of different cluster heads often occurs only when time has been running on the network for a long time and that time varies depending on battery energy. In testing with a battery energy of 6000 mWh, the lifetime of HEED was found to be 150 hours 32 minutes 41 seconds which is a 94% increase from the lifetime of the static clustering protocol. However, on a small-scale network with this nRF24L01-based device, the lifetime of HEED is still 28.5% below LEACH.

Keywords: *wireless sensor network, routing protocol, HEED, nRF24L01, cluster, energy*

1. PENDAHULUAN

Wireless Sensor Network (WSN) atau jaringan sensor nirkabel merupakan jaringan yang memiliki banyak node sensor berdaya rendah yang ditempatkan pada area tertentu dengan setidaknya memiliki satu base station. Setiap sensor memonitor kondisi fisik atau lingkungan seperti suhu dan kelembaban, kemudian mengirimkan data yang dikumpulkan kembali ke base station. Pada WSN, posisi node tidak ditentukan sebelumnya yang memungkinkan terbentuk organisasi jaringan yang otonom (Daanoune, et al., 2020). Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam jalannya WSN, terutama pada konsumsi energi. Tanpa adanya teknik yang energy-efficient, sumber energi baterai pada node akan habis dalam waktu yang singkat. Hal ini mengakibatkan lifetime WSN menjadi sangat pendek dan dapat tidak memenuhi kebutuhan sistem WSN ketika ditempatkan pada remote area.

Untuk mengatasi masalah-masalah yang ada pada WSN termasuk konsumsi energi, para peneliti telah mendesain bermacam-macam protokol routing. Penelitian berjudul "Energy Efficient Flat and Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey" (Patil & Kohir, 2016) menjabarkan beberapa jenis protokol routing untuk mencari teknik yang energy-efficient. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hierarchical based routing lebih efisien dibanding flat based routing dalam hal konsumsi energi terutama pada jaringan yang besar, menjadikan lifetime WSN meningkat.

Protokol routing hierarchical based dapat diklasifikasikan jenisnya berdasarkan cara routing beroperasi yaitu: cluster-based, chain-based, tree-based, dan grid-based. Dari jenis-jenis hierarchical routing tersebut, cluster-based routing dapat dikatakan jenis routing yang populer. Cluster-based routing mengelompokkan node-nodenya menjadi beberapa cluster. Node sensor dalam satu kelompok cluster melakukan pengiriman data ke cluster head-nya, yang digunakan untuk komunikasi higher-level mengurangi traffic overhead (Patil & Kohir, 2016).

Terdapat salah satu protokol yang berjenis cluster-based routing yaitu Hybrid Energy-Efficient Distributed (HEED) yang bertujuan untuk mendistribusikan konsumsi energi sehingga memperpanjang lifetime dari jaringan. Protokol HEED merupakan cluster-based routing dengan komunikasi multi-hop pada cluster head-nya. Tujuan dari protokol HEED adalah untuk membentuk cluster yang terdistribusi dengan baik dalam jaringan. Pembentukan cluster didasarkan pada residual energy yang dimiliki setiap node dalam jaringan dan diperhatikan cost komunikasi antar node sensor untuk keseimbangan load pada cluster (Younis & Fahmy, 2004).

Penelitian-penelitian terkait protokol HEED sampai saat ini masih menggunakan simulasi jaringan. Untuk mengetahui bagaimana protokol HEED beroperasi dan bagaimana efisiensi energi

yang dihasilkan pada perangkat keras WSN, penelitian ini akan mengimplementasikan protokol HEED pada perangkat keras yang menggunakan nRF24L01 sebagai modul komunikasi dan menggunakan Arduino sebagai pemroses utama. Protokol HEED yang diimplementasikan pada perangkat keras ini akan menyesuaikan kebutuhan penelitian namun tetap didasarkan pada prinsip kerja protokol tersebut. Implementasi pada penelitian ini dilakukan pada jaringan dengan skala kecil dimana jumlah node adalah 8 node dengan jarak antar node yang tidak jauh sehingga masih dapat menjangkau setiap node dalam jaringan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Hybrid Energy-Efficient Distributed Routing Protocol (HEED)

Hybrid Energy-Efficient Distributed Routing Protocol (HEED) adalah protokol routing *cluster-based multi-hop* yang bertujuan untuk membuat *cluster* yang terdistribusi dengan baik sehingga mengarah ke pendistribusian konsumsi energi secara merata menjadikan *lifetime* jaringan bertambah panjang (Younis & Fahmy, 2004). HEED memperhatikan kedua konektivitas *intra-cluster* yang menghubungkan anggota *cluster* dengan *cluster head* juga konektivitas *inter-cluster* yang menghubungkan sesama *cluster head*. Dalam konektivitas *inter-cluster* dapat digunakan skema routing tertentu untuk mengarahkan pengiriman data sampai ke *base station*.

Dengan memungkinkannya komunikasi *multi-hop cluster head* ke *base station* menghasilkan skalabilitas yang lebih dibandingkan LEACH. Sesama *cluster head* dapat berkomunikasi, mengarahkan datanya dari *cluster* ke *cluster* sampai ke *base station*. HEED meningkatkan *lifetime* jaringan dengan mendistribusikan konsumsi energi. Pada HEED, *cluster head* ditentukan dengan basis dua faktor yaitu *residual energy* dan *cost* antar node sensor untuk membentuk konektivitas *intra-cluster* yang terdistribusi. Pertama akan ditentukan probabilitas node sensor menjadi *cluster head* (CH_{prob}) yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (1)$$

C_{prob} adalah probabilitas node dalam jaringan menjadi *cluster head*, jika makin kecil maka kemungkinan node-node menjadi *cluster head* lebih sedikit. $E_{residual}$ adalah energi node sensor saat itu sedangkan E_{max} adalah energi maksimal dari node sensor. Dengan probabilitas ini, node ditentukan untuk menjadi bagian dari rangkaian *cluster head* yang mungkin, S_{ch} . Pada himpunan S_{ch} , *cluster head* masih berstatus *tentative* atau sementara. Kemudian untuk menyelesaikan pemilihan, pada himpunan S_{ch} dipilih untuk dijadikan status node *cluster head* yang *tentative* menjadi *cluster head* yang *final* sesuai

dengan *cost* yang dapat berbeda sesuai dengan tujuan perancang jaringan atau operator jaringan, salah satunya adalah *cost* dapat didasarkan pada kedekatan antar node-node (Wahyudi, 2018). Kemudian untuk node menentukan menjadi anggota pada *cluster head* mana juga dapat didasarkan pada *cost* tersebut.

2.2. nRF24L01

nRF24L01 adalah *single chip transceiver* berfrekuensi 2.4GHz yang didesain untuk aplikasi *wireless* dengan daya yang sangat rendah. Dengan mikrokontroler, modul komunikasi radio nRF24L01 dapat terapkan menjadi sebuah *wireless system*. Modul nRF24L01 terkonfigurasi dan beroperasi pada *Serial Peripheral Interface* (SPI). *Data rate* pada nRF24L01 dapat dikonfigurasi sampai 2Mbps. *Data rate* yang tinggi dikombinasikan dengan dua *power saving mode* membuat nRF24L01 sangat cocok untuk desain sistem yang sangat menghemat energi. Dalam penggunaan daya pada modul ini terdapat konsumsi arus 11.3 mA dalam mode TX pada daya *output* 0dBm, 13.5 mA dalam mode RX pada *data rate* 2Mbps, 900 nA saat *power down*, dan 26 μ A disaat *standby* (Nordic Semiconductor, 2010).

2.3. Arduino

Arduino adalah platform elektronik *open-source* berdasarkan perangkat keras dan perangkat lunak yang mudah digunakan. *Board* Arduino dapat membaca *input* seperti merangsang sensor, menekan tombol, atau membuat pesan Twitter dan mengubahnya menjadi output seperti mengaktifkan motor, menyalakan LED, menerbitkan sesuatu secara *online*. Untuk menjadikan *board* dapat melakukan sesuatu, dikirimkan set instruksi ke mikrokontroler yang ada pada *board* dengan menggunakan *Arduino programming language* dan *Arduino Software (IDE)* (Arduino, 2018). Arduino akan menjadi *hardware* pemroses komponen-komponen WSN. Untuk node sensor digunakan *board* Arduino Pro Mini untuk konsumsi energi yang rendah dan untuk base station digunakan *board* Arduino UNO.

2.4. INA219

INA219 merupakan modul sensor arus digital dengan *interface* komunikasi I2C. Modul ini dapat melakukan pembacaan arus, tegangan, dan daya digital yang diperlukan untuk pengambilan keputusan yang akurat dalam *precisely-controlled system* (Texas Instrument, 2015). Sensor dapat membaca arus hingga 400mA dengan resolusi 0.1mA. Modul sensor INA219 akan digunakan untuk mengukur konsumsi energi setiap node.

2.5. Teknik Pengumpulan Data

Data didapatkan dari pengujian sistem untuk menjalankan protokol HEED. Diperlukan data untuk menjawab masalah pada penelitian, maka pengujian sistem disesuaikan untuk hal tersebut. Pengujian sistem pada saat proses clustering protokol HEED ataupun pengujian sistem disaat beroperasi secara full. Data yang dikumpulkan berupa hasil deteksi arus dengan sensor INA219 dan juga data dari real-time clock DS3231 untuk membantu pengukuran. Dengan sensor arus tersebut dapat terlihat masing-masing konsumsi energi setiap node. Data-data yang dihasilkan akan dikumpulkan untuk dianalisis.

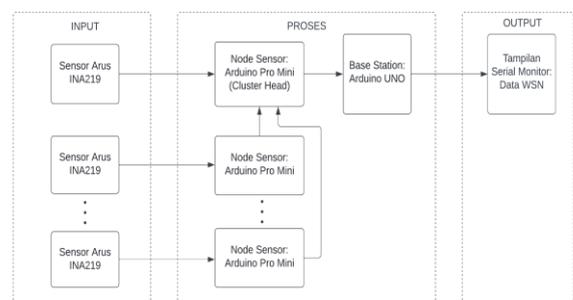
2.6. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan terhadap data sensor arus INA219 terhadap node yang telah didapatkan dari hasil pengujian sistem. Seperti pengujian yang dimaksudkan untuk mengumpulkan data yang akan menjawab masalah penelitian, analisis data akan menjadikan data-data tersebut menjadi suatu hasil penelitian. Analisis hasil yang dilakukan berhubungan dengan pemakaian energi pada implementasi protokol HEED dan dengan mengolah data sensor arus setiap node menjadi konsumsi energi pada jaringan. Dari data tersebut dapat dihasilkan kinerja pada saat proses clustering dan saat beroperasi full juga persentase perbandingan lifetime jaringan pada protokol HEED jika dibandingkan dengan metode static clustering.

3. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

3.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan dilakukan untuk kedua jenis perangkat keras, yaitu *base station* dengan Arduino UNO dan modul nRF24L01-nya. Kemudian pada semua node sensor dengan menggunakan Arduino Pro Mini, modul nRF24L01, dan juga sensor INA219. Pada blok diagram sistem terdapat input, proses dan output. Blok diagram tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



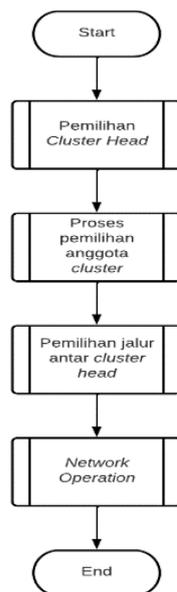
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Pada bagian input terdapat sensor arus INA219 yang terpasang pada setiap node dan akan meng-*input* arus untuk masing-masing node. Kemudian pada bagian proses terdapat komunikasi jaringan

dari WSN itu sendiri. Setiap node sensor yang mempunyai mikrokontroler Arduino Pro Mini akan saling berkomunikasi, jika node tersebut adalah *cluster head*, maka ia akan menerima data sensor arus pada setiap node anggota clusternya melalui media *wireless* dengan modul radio nRF24L01. Setelah itu, dengan modul nRF24L01 juga node *cluster head* akan mengirimkan data arus yang telah terkumpul ke *base station* Arduino UNO secara *wireless*. Pada bagian output, setiap data yang diterima *base station* Arduino UNO yang terhubung pada komputer akan ditampilkan pada serial monitor.

3.2. Perancangan Perangkat Lunak

Dilakukan perancangan protokol HEED yang disesuaikan dengan modul nRF24L01 ditujukan untuk berjalan pada jaringan node sensor. Diagram alir program protokol HEED tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Protokol HEED

Secara umum terdapat dua tahap dari protokol HEED yaitu proses *clustering* untuk membentuk cluster pada setiap node kemudian operasi jaringan dimana komunikasi data pada WSN berjalan.

3.2.1. Perancangan Proses *Clustering*

Pada tahap proses *clustering* sendiri, terdapat tiga tahap didalamnya yaitu pemilihan *cluster head*, penentuan anggota *cluster* atau membangun konektivitas *intra-cluster*, dan penentuan jalur antar *cluster head* atau membangun konektivitas *inter-cluster*.

Pemilihan *cluster head* pada protokol HEED memperhatikan dua parameter yaitu *residual energy* dan *cost* komunikasi. Diharapkan node yang terpilih menjadi *cluster head* adalah yang mempunyai *residual energy* tertinggi dan *cost* komunikasi

terendah kepada node lain dalam *range*-nya. Perhitungan *residual energy* didapatkan dari estimasi berdasarkan pembacaan aliran arus pada node, setelah itu *residual energy* akan digunakan untuk menghitung CHprob untuk penentuan *cluster head*. *Cost* komunikasi node juga akan menjadi dasar penentuan saat membentuk konektivitas *intra-cluster* dan *inter-cluster*.

Dalam protokol sHEED (*Simplified HEED*) (Pawlak, et al., 2010), *cost* komunikasi ditentukan berdasarkan RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) pada sinyal dari node-node. Makin kuat RSSI dari node menandakan node tersebut berada di jarak yang dekat. Namun terdapat keterbatasan pada modul radio nRF24L01 dimana tidak dimiliki fitur yang menyediakan pembacaan RSSI. Maka sebagai gantinya pada node bermodul nRF24L01 akan diakali dengan menggunakan *delay* transmisi pada setiap node yang ada dalam jaringan.

Kelemahan dari metode ini adalah untuk mendapatkan rata-rata *delay* yang akurat dibutuhkan nilai yang didapat dari pengiriman yang banyak. Rata-rata *delay* dari 250 kali pengiriman baru dapat dikatakan akurat. Semakin banyak pengiriman yang dilakukan lebih dari itu, maka akan semakin akurat juga nilai rata-rata *delay* yang didapatkan. Tentunya hal ini akan berimbas pada konsumsi energi dan protokol HEED sendiri yang bertujuan untuk menghemat konsumsi energi. Maka akan dijadikan hal ini hanya dilakukan pada saat proses *clustering* pertama kali node sensor dinyalakan untuk menentukan posisi dengan syarat posisi node setelah itu tidak berpindah atau posisi statis. Dengan ini, akan diasumsikan bahwa makin rendah *delay* transmisi maka makin dekat juga jarak antar node.

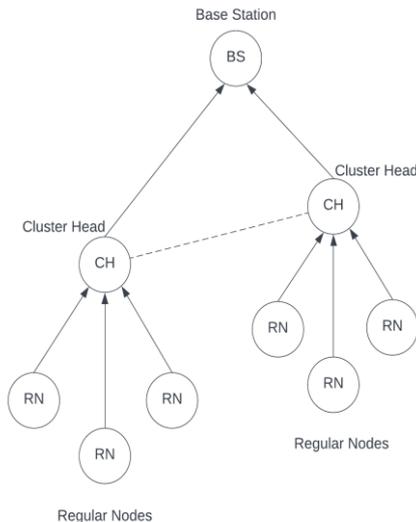
3.2.2. Perancangan Operasi Jaringan

Operasi jaringan terjadi setelah semua konektivitas *cluster* terbentuk dimana terjadinya pengiriman data node sensor atau komunikasi sampai ke *base station*. Adapun data akan didapat dari pembacaan arus sensor INA219. Dari pembacaan arus tersebut dilakukan proses pengolahan dan menjadikan data arus tersebut menjadi konsumsi energi untuk menghasilkan *residual energy* pada setiap node yang juga digunakan untuk pembentukan *cluster* di ronde selanjutnya. Kemudian data tersebut akan dikirimkan ke *base station* untuk diamati pada serial monitor sebagai pemakaian energi pada node sensor.

Alur operasi jaringan sisi node sensor mengikuti komunikasi pada perancangan topologi jaringan protokol HEED yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Node akan mengirimkan datanya ke *cluster head*. Kemudian *cluster head* menunggu sampai semua data *node* sensor yang diterima. Setelah semua data dari anggota diterima *cluster head*, *cluster head* akan mengirimkan datanya sesuai rute yang telah ditentukan pada tahap pembangunan

konektivitas *inter-cluster*. Jika melewati CH lain maka akan dikirimkan data yang telah diagregasi itu ke CH lain tersebut dan CH lain akan langsung mem-*forward* datanya ke *base station*. Sedangkan jika tidak melewati CH lain maka akan langsung dikirim ke *base station*.

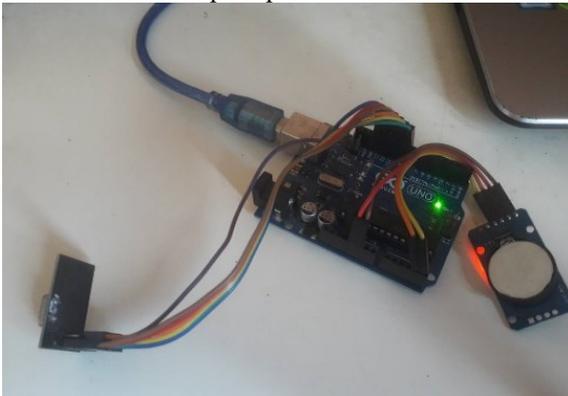


Gambar 3. Topologi Jaringan Protokol HEED

3.3. Implementasi Sistem

3.3.1 Implementasi Perangkat Keras

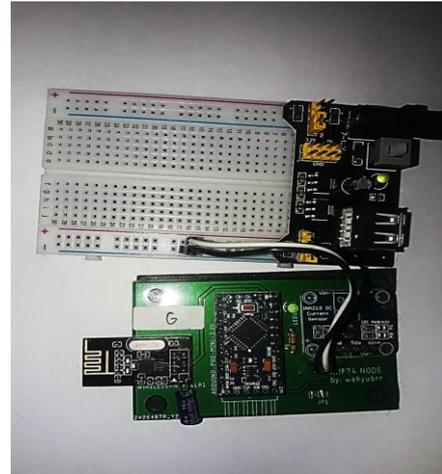
Pada *base station*, mikrokontroler Arduino UNO akan dihubungkan dengan modul nRF24L01 dan RTC DS323 seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Implementasi Perangkat Keras Base Station

Adapun pada implementasi setiap node sensor, mikrokontroler Arduino Nano terhubung dengan sensor arus INA219 dan modul nRF24L01 pada PCB seperti pada Gambar 5.

Sumber energi dihubungkan bukan pada baterai tetapi pada *power supply* untuk sumber tegangan yang lebih konstan agar pembacaan arus lebih baik. Dilakukan implementasi perangkat keras node tersebut berjumlah 8 node sensor yang kemudian dijadikan *cluster head* pada 2 node, dan 6 node sisanya akan menjadi anggota *cluster*.



Gambar 5. Implementasi Perangkat Keras Salah Satu Node

3.3.2. Implementasi Perangkat Lunak

Dalam implementasi program pada perangkat WSN, setiap node memerlukan programnya masing-masing. Dibedakan setiap ID pada node agar memudahkan identifikasi dan juga node akan diberi *address* masing-masing untuk berkomunikasi satu sama lain. Pada masing-masing program node terdapat perbedaan perihal pewaktuian atau *delay*. Hal ini ditujukan agar komunikasi pada semua node berhasil dilakukan dikarenakan pada modul nRF24L01, disaat pengiriman data dilakukan secara bersamaan, data tersebut akan bertabrakan sehingga menghasilkan gagalnya pengiriman. Terdapat juga masalah dimana ketika *timing* node penerima harusnya dalam posisi menerima tetapi masih sedang dalam posisi mengirim dan sebaliknya. Masalah tersebut jika terjadi pada modul nRF24L01 yang *half-duplex* mengakibatkan semua node akan gagal mengirim semua datanya atau sama sekali tidak ada node yang melakukan pengiriman. Hal ini sangat perlu diperhatikan terutama pada saat proses *clustering* HEED yang bergantung pada *broadcast* dan pesan node lain dalam membentuk *cluster*.

Masing-masing node menggunakan satu *payload* untuk komunikasi pada jaringan dimana ukuran maksimal dari *payload* pada modul nRF24L01 adalah 32 *byte*. Maka satu *payload* tersebut harus diperhatikan data-data yang dimasukkan untuk dikirim agar tidak lebih dari 32 *byte*. Hal yang pertama akan dilakukan node-node adalah perhitungan *cost* dengan menghitung *cost delay* antar node satu sama lain. Karena keterbatasan modul nRF24L01 dalam mendapatkan *cost* untuk *clustering* HEED, dibuat masing-masing alur perhitungan *cost delay* yang berbeda. Seperti yang telah dijelaskan, *delay* transmisi yang didapatkan baru dapat dikatakan akurat jika dirata-ratakan setelah 250 kali pengiriman. Sehingga supaya semua node dapat mendapatkan setiap *cost* atau rata-rata *delay* transmisi ke setiap node, bagian program perhitungan *cost* pada 8 node dibuat sedemikian rupa agar memakan waktu yang paling sedikit dan berkemungkinan berhasil yang terbesar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Clustering

Pada pengujian diujikan node-node sensor dalam proses clustering protokol HEED sesuai perancangan sistem, yaitu perhitungan cost antar node dan juga pembentukan cluster pada jaringan.

4.1.1. Pengujian Perhitungan Cost Node

Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah setiap node dapat mendapatkan cost masing-masing dari perhitungan rata-rata delay pengiriman antar node beserta hasil pemakaian energinya.

Setiap node berhasil melakukan perhitungan cost masing-masing sesuai alur prosesnya dan dapat dilihat pada Gambar 6.

```

COMS
|
10:01:53.817 --> Test Kerja
10:03:34.906 --> Selesai Menghitung cost antar node pada Node ID I
10:03:34.906 --> Waktu Proses : 89.4649963 s
10:03:34.906 --> Energi terpakai saat Cost Exchange : 1.1987646 mWh
10:03:34.906 -->
10:03:34.906 --> Selesai Menghitung cost antar node pada Node ID E
10:03:34.906 --> Waktu Proses : 89.3880021 s
10:03:34.906 --> Energi terpakai saat Cost Exchange : 1.2296406 mWh
10:03:34.906 -->
10:03:34.953 --> Selesai Menghitung cost antar node pada Node ID A
10:03:34.953 --> Waktu Proses : 89.3460006 s
10:03:34.953 --> Energi terpakai saat Cost Exchange : 1.3722267 mWh
10:03:35.009 -->
10:03:35.047 --> Selesai Menghitung cost antar node pada Node ID D
10:03:35.047 --> Waktu Proses : 89.4745984 s
10:03:35.047 --> Energi terpakai saat Cost Exchange : 1.4473345 mWh
10:03:35.047 -->
10:03:35.141 --> Selesai Menghitung cost antar node pada Node ID G
10:03:35.141 --> Waktu Proses : 89.5339965 s
10:03:35.141 --> Energi terpakai saat Cost Exchange : 1.2724599 mWh
10:03:35.141 -->
    
```

Gambar 6. Hasil Pengujian Perhitungan Cost Antar Node

Setiap waktu proses perhitungan cost pada node kurang lebih selama 89 sampai 90 sekon, sedangkan untuk pemakaian energi proses tersebut pada node bervariasi dari 1.2 mWh sampai 1.4 mWh. Pemakaian energi dan waktu proses perhitungan cost pada setiap node dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Perhitungan Cost

Node ID	Waktu Proses (s)	Pemakaian Energi (mWh)
A	89.346	1.3722267
B	89.416	1.2951593
C	89.432	1.2490694
D	89.475	1.4473345
E	89.385	1.2296406
G	89.534	1.2724599
I	89.465	1.1987646
J	89.532	1.2457289

Proses perhitungan cost antar node cukup memakan energi dan waktu jika ditujukan hanya untuk proses clustering. Itulah sebabnya proses ini dijalankan hanya sekali saat melakukan proses clustering pertama kali pada awal hidupnya jaringan.

4.1.2. Pengujian Pembentukan Cluster

Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah node-node dalam jaringan dapat membentuk suatu

cluster dan masing-masing node menjadi cluster head atau anggotanya sesuai dengan kriteria protokol HEED pada perancangan sistem. Selain itu juga untuk melihat konsumsi energi ketika pembentukan cluster.

Node-node dalam jaringan berhasil membentuk cluster sesuai perancangan clustering protokol HEED pada nRF24L01 seperti pada Gambar 7.

```

COMS
|
16:18:22.623 -->
16:18:49.981 --> Terbentuk Cluster dengan CH node : C
16:18:49.981 --> Mempunyai cost : 3.7274284
16:18:49.981 --> Dengan anggota node : A, B, D,
16:18:49.981 --> Masing-masing cost node adalah : 4.0285711, 4.0262856, 4.0908570,
16:18:49.981 -->
16:18:50.450 --> Terbentuk Cluster dengan CH node : E
16:18:50.450 --> Mempunyai cost : 3.7834286
16:18:50.450 --> Dengan anggota node : G, I, J,
16:18:50.450 --> Masing-masing cost node adalah : 4.0560002, 4.0251431, 4.0474286,
    
```

Gambar 7. Hasil Pengujian Pembentukan Cluster

Terbentuk dua cluster dengan terpilihnya cluster head pada node dengan cost terkecil dalam jaringan. Pemakaian energi proses clustering setiap node dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsumsi Energi Clustering

Node ID	Total energi clustering (mWh)
A	1.5474628
B	1.6846029
C	1.7782180
D	1.7361671
E	1.7022318
G	1.5281186
I	1.4762977
J	1.5570379

Total pemakaian energi tersebut merupakan proses clustering awal yang termasuk didalamnya proses perhitungan cost antar node. Adapun rata-rata waktu proses clustering pada kedua cluster yang terbentuk masing-masing adalah 144.98 sekon dan 145.59 sekon, jika dikurangi waktu proses perhitungan cost yaitu 89 sekon, maka kurang lebih clustering memakan waktu sebanyak 56 sekon. Didapat rata-rata pemakaian energi pada proses clustering dalam jaringan yaitu 1.626 mWh dan juga rata-rata waktu proses clustering sampai selesai yaitu 145.28 sekon.

4.2. Pengujian Operasi Jaringan dan Reclustering

Pengujian operasi jaringan ini bertujuan untuk melihat apakah komunikasi pada cluster untuk mengirimkan data dapat dilakukan dan apakah cluster head dapat mengagregasikan data anggotanya kemudian berhasil mengirim ke base station beserta konsumsi energinya selama 5 menit. Sedangkan pada pengujian reclustering bertujuan untuk melihat bagaimana node-node pada jaringan melakukan pembentukan cluster kembali setelah keluar dari operasi jaringan sebelumnya beserta jumlah konsumsi energinya.

Pengujian operasi jaringan dilakukan selama 5 menit, dari 5 menit tersebut komunikasi pada

jaringan berhasil dilakukan pada *cluster* yang terbentuk. Hasil operasi jaringan saat awal masuk sampai 5 menit berjalan dapat dilihat pada Gambar 8.

```

COM5
16:18:50.450 -->
16:18:52.039 --> Node CH ID : C
16:18:52.039 --> Total Energi CH : 1.8227358 mWh
16:18:52.086 --> Node Anggota : A
16:18:52.086 --> Total Energi : 1.5474620 mWh
16:18:52.086 --> Node Anggota : B
16:18:52.086 --> Total Energi : 1.6946029 mWh
16:18:52.086 --> Node Anggota : D
16:18:52.086 --> Total Energi : 1.7361671 mWh
16:18:52.086 --> Paket ke #1
16:18:52.086 --> Di-forward melalui node Cluster Head E
16:18:52.086 -->
16:18:52.086 --> 00.00.2022 - 00:07:43 --
16:18:52.507 --> Node CH ID : E
16:18:52.507 --> Total Energi CH : 1.7448079 mWh
16:18:52.507 --> Node Anggota : G
16:18:52.554 --> Total Energi : 1.5281186 mWh
16:18:52.554 --> Node Anggota : I
16:18:52.554 --> Total Energi : 1.4762977 mWh
16:18:52.554 --> Node Anggota : J
16:18:52.554 --> Total Energi : 1.5570359 mWh
16:18:52.554 --> Paket ke #1
16:18:52.554 --> Langsung dikirim ke Base Station

COM5
16:23:47.037 --> 01.01.2000 - 00:12:38 --
16:23:47.037 --> Node CH ID : C
16:23:47.037 --> Total Energi CH : 0.1603469 mWh
16:23:47.037 --> Node Anggota : B
16:23:47.037 --> Total Energi : 4.1775264 mWh
16:23:47.037 --> Node Anggota : D
16:23:47.037 --> Total Energi : 4.3214421 mWh
16:23:47.037 --> Node Anggota : A
16:23:47.037 --> Total Energi : 3.8775188 mWh
16:23:47.037 --> Paket ke #147
16:23:47.037 --> Di-forward melalui node Cluster Head E
16:23:47.037 -->
16:23:47.037 --> 01.01.2000 - 00:12:38 --
16:23:47.318 --> Node CH ID : E
16:23:47.318 --> Total Energi CH : 7.5879325 mWh
16:23:47.318 --> Node Anggota : I
16:23:47.318 --> Total Energi : 3.2089495 mWh
16:23:47.318 --> Node Anggota : G
16:23:47.318 --> Total Energi : 3.3310561 mWh
16:23:47.318 --> Node Anggota : J
16:23:47.318 --> Total Energi : 3.0215241 mWh
16:23:47.318 --> Paket ke #146
16:23:47.318 --> Langsung dikirim ke Base Station
16:23:47.318 -->
16:23:47.318 --> 01.01.2000 - 00:12:38 --
    
```

Gambar 8. Hasil Pengujian Operasi Jaringan

Pengujian operasi jaringan dilakukan selama 5 menit, dari 5 menit tersebut komunikasi pada jaringan berhasil dilakukan pada *cluster* yang terbentuk sesuai dengan topologi jaringan protokol HEED. Pemakaian energi pada operasi jaringan selama sekitar 5 menit atau lebih tepatnya 4 menit 55 detik dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsumsi Energi Operasi Jaringan Sekitar 5 Menit

Node ID	Total energi (mWh)
A	2.3300560
B	2.4929235
C (CH)	6.3376111
D	2.5852750
E (CH)	5.8431246
G	1.8029375
I	1.7326518
J	1.4644882

Pemakaian energi setiap node bervariasi tergantung arus yang dihasilkan Arduino masing-masing. Terlihat bahwa *cluster head* mempunyai total pemakaian energi yang lebih tinggi diatas total energi node-node anggota.

Setelah operasi jaringan berlangsung selama 5 menit, proses *reclustering* dilakukan. Dengan energi baterai 6000 mWh setara 2 baterai AA pada node, *reclustering* berhasil dilakukan dan *cluster head* yang terpilih dari node sama seperti *cluster head* sebelumnya. Hal tersebut disebabkan karena pada waktu awal, energi sisa yang dimiliki node masih besar sehingga terpilih lagi node dengan *cost* terkecil seperti pada Gambar 9.

```

COM5
16:24:45.042 --> Reclustering Berhasil
16:24:45.042 --> Terbentuk Cluster dengan CH node : C
16:24:45.042 --> Mempunyai cost : 3.7274284
16:24:45.088 --> Dengan anggota node : A, B, D,
16:24:45.088 --> Masing-masing cost node adalah : 4.0285711, 4.0262856, 4.0908570,
16:24:45.088 -->
16:24:45.508 --> Terbentuk Cluster dengan CH node : E
16:24:45.508 --> Mempunyai cost : 3.7834286
16:24:45.554 --> Dengan anggota node : G, I, J,
16:24:45.554 --> Masing-masing cost node adalah : 4.0560002, 4.0251431, 4.0474286,
    
```

Gambar 9. Hasil Pengujian Reclustering

Rata-rata waktu node-node melakukan proses *reclustering* adalah 54 sekon. Jika *reclustering* dilakukan dan yang terpilih menjadi *cluster head* tetap node *cluster head* yang sama sebelumnya, maka 54 sekon tidak terpakai untuk komunikasi jaringan padahal *cluster head*-nya sama dan hal tersebut dapat mengganggu fungsionalitas sistem WSN. Kemudian pemakaian energi *reclustering* setiap node dibanding dengan pemakaian energi operasi jaringan dengan lama waktu *reclustering* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Konsumsi Energi Reclustering

Node ID	Total energi selama 54 s (mWh)	Total energi reclustering (mWh)
A	0.5947848	0.2573454
B	0.6129844	0.2847843
C (CH)	1.1268062	0.4810534
D	0.6459175	0.3198514
E (CH)	1.0324774	0.4342802
G	0.4830184	0.2763516
I	0.4466166	0.2900946
J	0.3572912	0.2951377

Dalam hal pemakaian energi, semua node memiliki pemakaian energi *reclustering* yang lebih kecil sehingga tidak terdapat masalah dan juga tidak memakan energi yang banyak saat dilakukannya *reclustering*. Disimpulkan bahwa hanya faktor terkait waktu lamanya proses *reclustering* menjadikan perlu dipertimbangkan kapan dilakukan hal tersebut sesuai kebutuhan sistem WSN.

Total energi baterai berpengaruh dalam proses *reclustering*, jika makin kecil maka energi sisa dibandingkan dengan energi maksimal nilainya menurun lebih cepat menjadikan *cluster head* akan berganti node lebih cepat juga dan sebaliknya. Selain total energi, C_{prob} pada perhitungan CH_{prob} dan angka *random* juga menjadi faktor dalam bergantinya node yang terpilih menjadi *cluster head*, jika C_{prob} makin kecil maka kemungkinan pergantian *cluster head* makin besar. Perhitungan waktu *reclustering* sampai *cluster head* berganti pada

energi baterai 6000 mWh dengan C_{prob} 5% dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan Waktu *Reclustering* Energi Baterai 6000 mWh

Waktu	Energi sisa (mWh)		Random number	Pergantian cluster head
	Node C	Node E		
5 menit	5991.8	5992.4	0.8119	Tidak
8 menit	5987.8	5988.7	0.7745	Tidak
16 menit	5977.5	5979.2	0.0859	Tidak
20 menit	5972.4	5974.5	0.9109	Tidak
32 menit	5956.9	5960.2	0.6216	Tidak
80 menit	5895	5903.2	0.3905	Tidak
100 menit	5869.2	5879.4	0.3934	Ya

Terlihat pada waktu 100 menit pemakaian energi *cluster head*, pada *reclustering* baru terjadi pergantian *cluster head*. Namun hal ini disebabkan oleh *random number* yang nilainya tepat, jika *random number* nilainya jauh dari angka tersebut maka bisa saja masih belum terjadi pergantian *cluster head*.

Meski C_{prob} telah diberi nilai yang kecil, *reclustering* masih sangat bergantung kepada *random number* dalam menentukan *tentative cluster head*. Artinya, penentuan waktu agar pergantian *cluster head* pada protokol HEED terjadi tidak dapat ditentukan secara pasti.

4.3. Pengujian Konsumsi Energi

Pengujian operasi jaringan ini bertujuan untuk membandingkan konsumsi energi pada perangkat berbasis modul komunikasi nRF24L01 dengan protokol *static clustering* dan dengan protokol HEED dan juga dikalkulasikan perkiraan *lifetime* jaringan berdasarkan data konsumsi energi kedua protokol tersebut.

Dari pemakaian energi jaringan perangkat nRF24L01 didapatkan pemakaian energi pada seluruh node dalam waktu 1 jam yang kemudian digunakan untuk menghitung perkiraan *lifetime* jaringan dengan rumus pada Persamaan (2).

$$\text{Perkiraan lifetime} = \frac{\text{Total energi baterai}}{\text{Pemakaian energi 1 jam}} \quad (2)$$

Dengan total energi baterai 6000 mWh, informasi konsumsi energi dan perkiraan *lifetime* pada protokol *static clustering* nRF24L01 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perkiraan *Lifetime Static Clustering*

Node ID	Pemakaian energi 1 jam (mWh)	Perkiraan <i>lifetime</i> node sensor
A	25.31	237 jam 3 menit
B	26.77	224 jam 7 menit
C (CH)	77.32	77 jam 36 menit
D	29.49	203 jam 28 menit
E (CH)	77.14	77 jam 46 menit
G	20.15	297 jam 43 menit
I	20.11	298 jam 18 menit
J	16.65	360 jam 25 menit

Lifetime jaringan diambil dari waktu ketika adanya node yang mati pertama kali. Node dengan *lifetime* paling kecil pada protokol *static clustering* adalah node C yang merupakan *cluster head*, yaitu 77.59965539 jam atau 77 jam 36 menit. Maka *lifetime* dari node sensor C tersebut menjadi *lifetime* jaringan *static clustering*.

Kemudian pada protokol HEED, dari jalannya jaringan yang dilakukan *reclustering* setiap 90 menit dengan C_{prob} bernilai 5 persen, node yang paling pertama memakai energi sejumlah total energi baterai yaitu 6000 mWh berjalan selama 150.5446788 jam. Pemakaian energi dan energi sisa setiap node selama waktu tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Konsumsi dan Energi Sisa Protokol HEED

Node ID	Pemakaian energi (mWh)	Energi sisa (mWh)
A	5714.061842	285.9381577
B	6000	0
C	5815.061404	184.9385963
D	5505.886763	494.1132374
E	5742.933952	257.0660479
G	5497.977234	502.0227661
I	5644.609949	355.3900513
J	5550.986535	449.0134655

Untuk menghitung *lifetime* pada node sensor lainnya, maka dari data pemakaian energi tersebut dibagi dengan waktu yang telah ditempuhnya untuk mendapatkan rata-rata pemakaian energi pada waktu 1 jam, rumus tersebut dapat dilihat pada Persamaan (3).

$$\text{Rata - rata energi 1 jam} = \frac{\text{Konsumsi energi}}{\text{Waktu tempuh}} \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, rata-rata pemakaian energi 1 jam dan perkiraan *lifetime*-nya pada protokol HEED nRF24L01 dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perkiraan *Lifetime* HEED

Node ID	Rata-rata konsumsi energi 1 jam (mWh)	Perkiraan <i>lifetime</i> node sensor
A	37.95	158 jam 5 menit
B	39.85	150 jam 33 menit
C	38.63	155 jam 20 menit
D	36.57	164 jam 3 menit
E	38.15	157 jam 17 menit
G	36.52	164 jam 17 menit
I	37.49	160 jam 1 menit
J	36.87	162 jam 43 menit

Lifetime jaringan protokol HEED pada perangkat berbasis nRF24L01 diambil dari *lifetime* node pertama yang habis energi sisanya (node B), maka *lifetime* jaringan diperkirakan dengan waktu selama 150 jam 33 menit.

Dari *lifetime* jaringan kedua protokol tersebut, pada protokol HEED terdapat peningkatan sebesar 94% dari protokol *static clustering*. Pada penelitian berjudul "Implementasi Protokol LEACH pada Wireless Sensor Network dengan Perangkat

Berbasis nRF24L01” (Berlianto, et al., 2021) dilakukan perbandingan *lifetime* jaringan antar protokol LEACH dan *static clustering* pada perangkat WSN berbasis nRF24L01 yang menghasilkan pada protokol LEACH memiliki peningkatan *lifetime* sebesar 122.5% terhadap protokol *static clustering*. Implementasi pada penelitian tersebut juga dilakukan pada jaringan berskala kecil. Jika dibandingkan dengan *lifetime* protokol LEACH pada penelitian tersebut, *lifetime* jaringan protokol HEED masih berada dibawah protokol LEACH dengan selisih 28.5%.

5. KESIMPULAN

Dari keseluruhan hasil penelitian, ditarik kesimpulan bahwa implementasi protokol HEED dapat dilakukan pada perangkat berbasis nRF24L01 dengan memperhatikan keterbatasan dari modul itu sendiri. Proses *clustering* awal sudah termasuk dengan proses perhitungan *cost* yang merupakan pengakalan mengatasi keterbatasan nRF24L01 tersebut. Konsumsi energi dan waktu yang besar menjadikan perhitungan *cost* hanya dilakukan pada proses *clustering* awal jalannya jaringan. Terdapat peningkatan *lifetime* jaringan pada protokol HEED terhadap protokol *static clustering* sejumlah 94%. Namun jika dibandingkan dengan protokol LEACH pada jaringan skala kecil perangkat berbasis nRF24L01 ini, *lifetime* HEED berada 28.5% dibawah *lifetime* LEACH.

Beberapa saran untuk diperhatikan lebih lanjut pada penelitian yang berhubungan selanjutnya bahwa sumber tegangan listrik pada modul nRF24L01 sangat menjadi perhatian. Pastikan koneksi pada perangkat modul nRF24L01 kuat. Dibutuhkan kestabilan sumber tegangan yang baik untuk keberhasilan komunikasi. Koneksi terhadap sumber tegangan yang kurang baik akan sangat memengaruhi kegagalan komunikasi antar node. Selain itu disarankan menggunakan modul komunikasi lain yang lebih baik dari modul nRF24L01 agar melewati keterbatasan modul tersebut terutama dalam pengaplikasian protokol HEED. Hal tersebut akan lebih meningkatkan keoptimalan pengaplikasian protokol HEED pada perangkat WSN. Pengimplementasian protokol HEED mungkin dapat dilakukan pada jaringan dengan skala yang lebih besar untuk melihat apakah hasil efisiensi energi lebih baik dibandingkan dengan jaringan berskala kecil.

DAFTAR PUSTAKA

AGGARWAL, R., MITTAL, A. & KAUR, R., 2016. Hierarchical Routing Techniques for Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 9(7), pp. 101-112.

ARDUINO, 2018. *Getting Started with Arduino UNO*. [Online] Tersedia di: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno> [Diakses Maret 2022].

BERLIANTO, W., BUDI, A. S. & ICHSAN, M. H. H., 2021. Implementasi Protokol LEACH pada Wireless Sensor Network dengan Perangkat Berbasis nRF24L01. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 5(10), pp. 4680-4688.

DAANOUNE, I., BAGHDAD, A. & BALLOUK, A., 2020. An Enhanced Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(5), pp. 5462-5469.

NORDIC SEMICONDUCTOR, 2010. *nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver*. [Online] Tersedia di: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24L01_PS_v1.6.pdf [Diakses 10 Maret 2022].

PATIL, R. & KOHIR, D. V. V., 2016. Energy Efficient Flat and Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 11(6), pp. 24-32.

PAWLAK, R., WOJCIECHOWSKI, B. & NIKODEM, M., 2010. New Simplified HEED Algorithm for Wireless Sensor Networks. *International Conference on Computer Networks*, Volume 79, pp. 332-341.

TEXAS INSTRUMENT, 2015. *INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface*. [Online] Tersedia di: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf> [Diakses 18 Maret 2022].

WAHYUDI, M. A., 2018. Analisis Perbandingan Konsumsi Energi dan Masa Hidup Jaringan pada Protokol LEACH, HEED, dan PEGASIS di Wireless Sensor Network.

YOUNIS, O. & FAHMY, S., 2004. HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, 3(4), pp. 366-379.

Halaman ini sengaja dikosongkan