

**PENGUKURAN KINERJA PROTOKOL ROUTING
HIERARCHICAL LOW ENERGY ADAPTIVE CLUSTERING
HIERARCHY PADA WIRELESS SENSOR NETWORK**

**PERFORMANCE MEASUREMENT OF LOW ENERGY
ADAPTIVE CLUSTERING ROUTING HIERARCHICAL
PROTOCOL IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

Vivi Margaret Johan¹, Veronica Windha M.², Sandra O.B.³,
Harlianto Tanudjaja⁴, Lukas⁵

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

Jl. Jendral Sudirman 51, Jakarta Selatan 12930

¹vmj.peace.16@gmail.com, ²veronica.may@atmajaya.ac.id ³sandra.oct@atmajaya.ac.id,
⁴harlianto@atmajaya.ac.id, ⁵lukas@atmajaya.ac.id

Abstrak

Teknologi *Wireless sensor network* (WSN) berkembang dengan cepat. Hal ini disebabkan karena teknologi WSN memiliki beberapa keunggulan, seperti praktis, memiliki hasil yang akurat, dan biaya operasional yang rendah. Akan tetapi, keterbatasan energi pada *node sensor* menyebabkan kinerja WSN menjadi kurang maksimal. Keterbatasan energi ini dapat diatasi dengan penggunaan protokol *routing* yang hemat energi. *Hierarchical Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (H-LEACH) merupakan salah satu protokol *routing* hemat energi. Protokol *routing* ini merupakan pengembangan dari protokol *routing Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH). Pembentukan *cluster master* menjadi prinsip utama H-LEACH dalam mengirimkan data ke *base station* (BS). Tujuan pembentukan *master cluster* ialah mengurangi tingkat konsumsi energi *cluster head* ketika mengirimkan data ke BS. Pengukuran kinerja protokol H-LEACH dilakukan melalui simulasi menggunakan program *Network Simulator* (NS) versi 2.35. Hasil simulasi protokol *routing* H-LEACH pada WSN menunjukkan adanya pengaruh yang cukup signifikan antara jumlah *cluster master* dengan tingkat konsumsi energi dan *throughput* yang berhasil diterima *node* tujuan.

Kata kunci: H-LEACH, konsumsi energi, NS, *throughput*, WSN

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) technology has grown by leaps and bounds. The growth is due to the technology advantages such as practicality, accuracy, and low operation cost. However, the limited energy of the node sensor reduces the WNS performance. This energy limitation can be overcome by using the energy efficient routing protocol, such as *Hierarchical Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (H-LEACH). This routing protocol is an enhancement of the *Low Energy Adaptive routing protocols Clustering Hierarchy* (LEACH). The formation of the cluster master is a fundamental principle of H-LEACH in sending data to the base station (BS). The aim is to reduce the formation of the cluster-master level energy consumption when the cluster head sends the data to the BS. The measurement of H-LEACH protocol performance is done by a simulation performed by using the program *Network Simulator* (NS) 2.35 version. The simulation results of H-LEACH routing protocol in WSN showed a significant effect of the number of cluster-master on the energy consumption level and the amount of throughput sent successfully.

Keywords : *energy consumption, H-LEACH, NS, throughput, WSN*

Tanggal Terima Naskah : 19 November 2014

Tanggal Persetujuan Naskah : 19 Desember 2014

1. PENDAHULUAN

Teknologi *Wireless Sensor Network* (WSN) berkembang dengan cepat. Hal ini disebabkan karena teknologi WSN memiliki beberapa keunggulan, seperti praktis, memiliki hasil yang akurat, dan biaya operasional yang rendah. Akan tetapi, keterbatasan energi pada *node sensor* menyebabkan kinerja WSN menjadi kurang maksimal. Keterbatasan energi ini disebabkan oleh penggunaan baterai sebagai *supply node sensor*. Penggantian baterai pada *node sensor* tidak mungkin dilakukan mengingat *node sensor* diletakkan secara acak dalam jaringan dan dalam kondisi tertentu sulit untuk diketahui letak dari *node sensor* tersebut. Oleh sebab itu, diperlukan solusi lain untuk mengatasi keterbatasan energi pada WSN, yaitu dengan memilih protokol *routing* yang hemat energi.

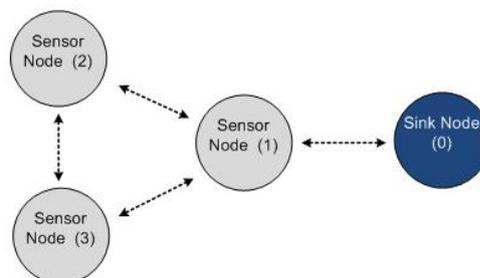
Salah satu protokol *routing* yang dapat meminimalkan konsumsi energi adalah *Hierarchical Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (H-LEACH), yang merupakan pengembangan dari protokol *routing Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH). H-LEACH mengelompokkan semua *Cluster Head* (CH) dan memilih salah satu CH, yang kemudian bertindak sebagai *Master Cluster Head* (MCH), untuk meneruskan data ke *Base Station* (BS) [1]. Pengelompokan CH dapat mengurangi penggunaan energi yang pada umumnya terkuras akibat banyaknya jumlah *node* yang meneruskan data ke BS. Dalam penelitian ini dilakukan pengukuran kinerja dari protokol *routing* H-LEACH dengan indikator kinerja yang diukur adalah konsumsi energi dan *throughput*.

2. KONSEP DASAR

2.1 *Wireless Sensor Network*

Wireless Sensor Network (WSN) adalah sebuah jaringan yang menghubungkan perangkat-perangkat, seperti *node sensor*, *router*, dan *sink node* [2]. Perangkat ini terhubung secara *ad-hoc* dan mendukung komunikasi *multi-hop* [2]. Tugas utama dari WSN adalah mendeteksi dan mengumpulkan data dari tempat tertentu, memproses, dan mengirimkan data tersebut ke *sink node*, yang merupakan tujuan akhir dari WSN [3].

Arsitektur dasar dari WSN dapat dilihat pada Gambar 1.

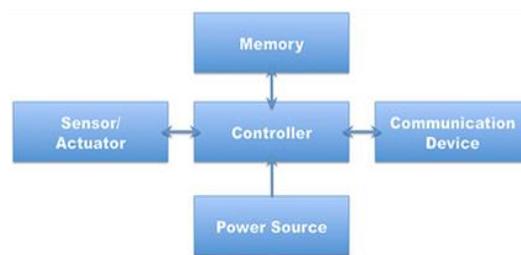


Gambar 1. Arsitektur dasar WSN

Salah satu perangkat dari WSN adalah *node sensor*. *Node sensor* WSN dapat melakukan beberapa tugas, seperti komputasi data, menyimpan data, dan penginderaan atau aktuasi data. Sebuah *node sensor* terdiri atas lima komponen, yaitu sebagai berikut [4]:

1. *Controller*
Controller berfungsi untuk memproses seluruh data yang relevan. Pada WSN, *controller* yang digunakan adalah mikrokontroler
2. Memori
Memori digunakan untuk menyimpan program dan data menengah.
3. *Sensor* dan aktuator
Sensor dan aktuator merupakan perwujudan unit antarmuka secara fisik. Perangkat ini mengamati atau mengatur parameter fisik dari lingkungan.
4. Perangkat komunikasi
Perangkat komunikasi mengirim dan menerima informasi melalui kanal nirkabel.
5. *Supply* daya
Supply daya berfungsi sebagai sumber energi bagi *node sensor*.

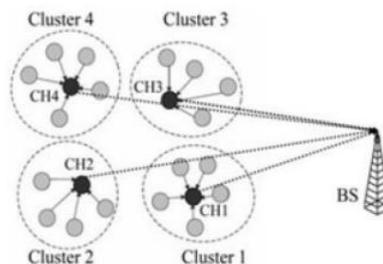
Kelima komponen dari *node sensor* harus beroperasi untuk menyeimbangkan kelebihan serta kekurangannya masing-masing, sekaligus mengkonsumsi energi seminimal mungkin namun tetap menjalankan fungsinya masing-masing. Struktur dari *node sensor* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur *node sensor*

2.2 Protokol *Routing* LEACH

LEACH merupakan protokol *routing* berbasis *cluster* yang menggunakan CH untuk mengumpulkan data dari *node sensor* yang ada di dalam *cluster* tersebut dan mengirimkan data tersebut ke *sink node* setelah proses agregasi data. Untuk membuat seluruh *node sensor* pada jaringan mengkonsumsi energi secara merata dan memperpanjang umur jaringan, protokol LEACH mengubah CH secara acak. Model konseptual dari protokol LEACH dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Model konseptual LEACH

Secara umum, operasi protokol *routing* LEACH dikelompokkan ke dalam dua fase, yaitu fase *setup* dan fase *steady state* [5].

2.2.1 Fase *setup*

Fase ini merupakan fase awal yang dilalui oleh protokol *routing* LEACH. Terdapat tiga operasi utama yang dilakukan di fase *setup*, yaitu:

1. Mengatur jaringan ke dalam pembentukan *cluster*.
2. Mengirimkan pesan ADV kepada *node* selain CH.
3. Mengatur jadwal transmisi data.

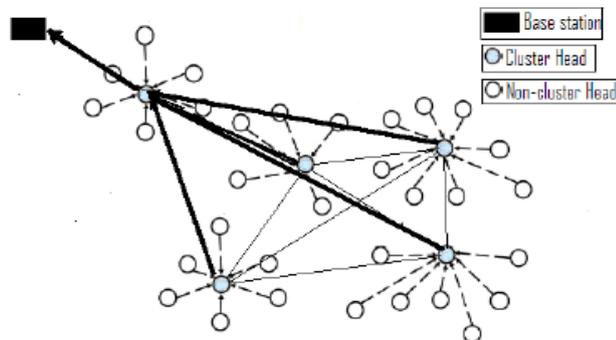
2.2.2 Fase *steady state*

Setelah melalui fase *setup*, protokol LEACH memasuki fase *steady state* yang menjalankan ketiga operasi berikut:

1. Proses agregasi data.
2. Kompresi.
3. Pengiriman data ke *sink node*.

2.3 Protokol *Routing* H-LEACH

H-LEACH merupakan salah satu *routing* hasil pengembangan dari LEACH. H-LEACH mengelompokkan semua CH dan memilih salah satu CH, yang kemudian bertindak sebagai *Master Cluster Head* (MCH), untuk meneruskan data ke BS. Model konseptual H-LEACH dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Model konseptual H-LEACH

Pemilihan CH dilakukan dengan membandingkan energi masing-masing *node* pada satu *cluster* yang sama. *Node* yang memiliki energi terbesar kemudian dipilih menjadi CH oleh *cluster* tersebut. Pemilihan ini menggunakan algoritma yang sama dengan protokol LEACH. Perbedaan antara LEACH dengan H-LEACH ialah adanya pemilihan MCH setelah pemilihan CH untuk tiap *cluster*. Pemilihan MCH dilakukan dengan mengelompokkan terlebih dahulu seluruh CH ke dalam *cluster* yang sama, kemudian dilakukan perbandingan energi untuk tiap CH di dalam *cluster* tersebut. Sama seperti pemilihan CH pada *cluster* yang berisi *common node*, MCH yang dipilih oleh *cluster* yang berisi *node* CH merupakan CH dengan energi paling besar. Jika energi MCH telah habis, proses diulang kembali dari awal, yaitu mulai dari pembentukan *cluster*, pemilihan CH, dan pemilihan MCH. CH dengan sisa energi paling besar yang akan menjadi MCH berikutnya.

2.4 Model Disipasi Energi Radio

Pada WSN, terdapat dua tipe *energy cost* yang dikeluarkan oleh jaringan, yaitu *fixed cost* dan *variable cost*. Konsumsi energi yang bersifat *fixed cost* disebabkan piranti elektronik yang digunakan untuk mengirimkan dan menerima data, sedangkan konsumsi energi yang bersifat *variable cost* disebabkan oleh jarak dalam transmisi dan penerimaan data.

Nilai *variable cost* dapat dicari dengan dua model propagasi, yaitu *free space* dan *two-way ground*. Model propagasi *free space* digunakan ketika jarak transmisi lebih kecil dari jarak *crossover*. Model propagasi *two-way ground* digunakan ketika jarak transmisi lebih besar dari jarak *crossover*. Jarak *crossover* dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$d_c = (4\pi h_t h_r) / \lambda \dots\dots\dots(1)$$

dengan: d_c adalah jarak *crossover* dalam meter,
 h_t adalah tinggi antena pengirim dalam meter,
 h_r adalah tinggi antena penerima dalam meter,
 λ adalah panjang gelombang sinyal *carrier* dalam meter

Daya yang digunakan untuk menerima pesan pada model propagasi *free space* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \dots\dots\dots(2)$$

dengan: P_r adalah daya yang digunakan untuk menerima informasi dalam Watt,
 G_t adalah *gain* antena pengirim,
 G_r adalah *gain* antena penerima,
 λ adalah panjang gelombang sinyal *carrier* dalam meter
 L adalah faktor *loss* sistem
 d adalah jarak antar-*node* dalam meter

Daya yang digunakan untuk menerima pesan pada model propagasi *two-way ground* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \dots\dots\dots(3)$$

dengan: P_r adalah daya yang digunakan untuk menerima informasi dalam Watt,
 G_t adalah *gain* antena pengirim,
 G_r adalah *gain* antena penerima,
 h_t adalah tinggi antena pengirim dalam meter,
 h_r adalah tinggi antena penerima dalam meter,
 λ adalah panjang gelombang sinyal *carrier* dalam meter
 L adalah faktor *loss* sistem
 d adalah jarak antar-*node* dalam meter

3. PERANCANGAN SIMULASI

3.1 Perangkat Simulasi

Perangkat simulasi yang digunakan dalam pengukuran kinerja ini adalah *Network Simulator (NS)* versi 2.35 berbasis Ubuntu. NS merupakan perangkat simulasi yang dibangun dengan menggunakan dua bahasa pemrograman, yaitu Otcl/Tcl dan C++. Bahasa C++ sangat cepat untuk dijalankan tetapi lambat untuk diubah sehingga cocok

digunakan untuk implementasi protokol secara lengkap. Bahasa Otcl memiliki kecepatan yang lebih lambat dibandingkan dengan C++ ketika dijalankan, namun lebih cepat untuk diubah sehingga cocok untuk konfigurasi simulasi.

Skrip simulasi dibuat dalam bahasa Tcl dan disimpan dengan ekstensi .tcl. Skrip simulasi disimpan pada *folder* HLEACH yang terletak di *Documents*. Skrip ini dijalankan dengan mengetikkan nama *file* pada Terminal. *Output* simulasi berupa *trace file* dengan ekstensi tr. *Trace file* berisi kronologi kejadian selama simulasi berlangsung.

3.2 Parameter Simulasi

Parameter yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter simulasi

Parameter	Nilai
Area simulasi	1000m x 1000m
Waktu simulasi	10 s
Posisi BS	(100,100)
Energi awal tiap <i>node</i>	10 joule
Ukuran paket minimum	30 bytes

3.3 Skenario Simulasi

Skenario yang disimulasikan pada pengukuran kinerja ini adalah membuat variasi jumlah *cluster* dan *master cluster*. Tujuan dari skenario ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah *cluster* dan *master cluster* terhadap kinerja protokol *routing* H-LEACH pada WSN. Jumlah *node* yang digunakan adalah 100 dengan variasi jumlah *cluster* dan variasi *master cluster*.

Variasi jumlah *cluster* dalam simulasi ini adalah 4, 5, 8, dan 10 *cluster*. Variasi tersebut digunakan untuk menentukan kombinasi *master cluster*. Bila jumlah *cluster* yang digunakan semakin sedikit, maka jumlah *master cluster* pun akan semakin terbatas bahkan tidak mungkin untuk dibentuk. Jumlah *cluster* terbanyak adalah 10 agar tingkat konsumsi energi tidak terlalu tinggi, dan jumlah *cluster* paling sedikit adalah 4 karena *master cluster* dengan 2 variasi masih dapat dibentuk pada jumlah *cluster* sebanyak 4.

Simulasi dengan variasi jumlah *cluster* dilakukan tanpa pemilihan *master cluster* terlebih dahulu untuk melihat jumlah *cluster* optimal. Simulasi dengan variasi jumlah *master cluster* hanya dilakukan pada variasi jumlah *cluster* yang optimal. Variasi jumlah *master cluster* yang disimulasikan adalah 1, 2, dan 3 *master cluster*. Jumlah *master cluster* terbanyak adalah 3 agar tingkat konsumsi energi tidak terlalu tinggi, seperti halnya dalam pembentukan *cluster*.

Beberapa kondisi yang diterapkan dalam simulasi ini ialah seluruh *node* bersifat homogen. Setiap *node sensor* memiliki kemampuan untuk mentransmisikan data ke *node sensor* lainnya maupun ke BS, seluruh *node* adalah stasioner, dan sebuah *node* hanya boleh berada di dalam satu *cluster* namun dapat berpindah *cluster* pada putaran berikutnya.

3.4 Indikator Kinerja

Indikator kinerja yang diukur adalah:

1. Konsumsi energi

Konsumsi energi yang diamati pada simulasi adalah total energi yang digunakan oleh seluruh *node sensor* dalam jaringan. Konsumsi energi diamati dalam setiap kurun waktu tertentu.

2. *Throughput*

Throughput merupakan banyaknya data yang sukses diterima oleh BS per satuan waktu.

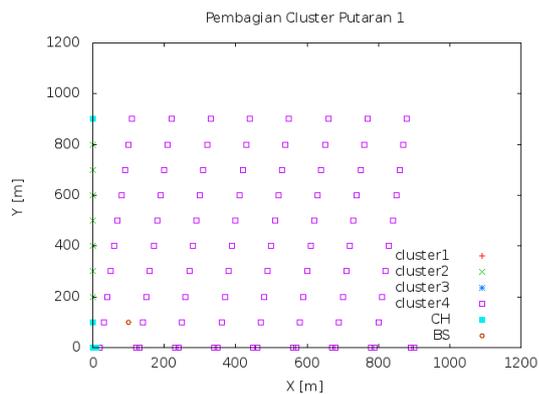
4. PENGUKURAN KINERJA

Pengukuran kinerja pada protokol *routing* H-LEACH dilakukan berdasarkan skenario dan indikator kinerja pada subbab sebelumnya. Indikator kerja yang diukur adalah konsumsi energi dan *throughput*.

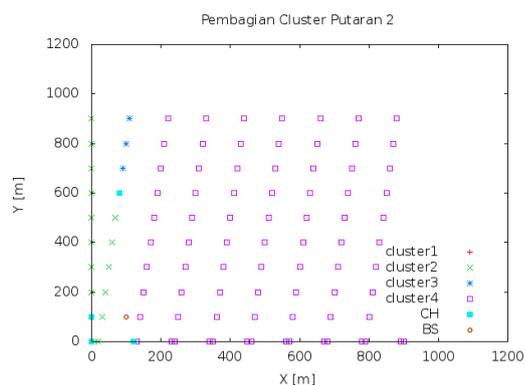
4.1 Posisi *Node* dan Pembentukan *Cluster*

Posisi *node sensor* tersebar merata dalam area seluas (1000 x 1000) m². Sebuah *node sensor* hanya tergabung dalam satu *cluster*, namun dapat berpindah *cluster* pada putaran berikutnya.

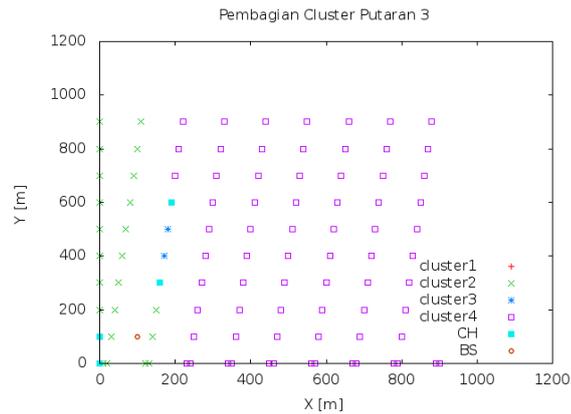
Hasil simulasi berupa pembentukan *cluster* dengan jumlah CH sebanyak 4 ditunjukkan pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7. Gambar 5 menunjukkan pembentukan *cluster* pada putaran pertama. Gambar 6 menunjukkan pembentukan *cluster* pada putaran kedua, dan Gambar 7 menunjukkan pembentukan *cluster* pada putaran ketiga.



Gambar 5. Pembentukan *cluster* putaran pertama



Gambar 6. Pembentukan *cluster* putaran kedua



Gambar 7. Pembentukan *cluster* putaran ketiga

Pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7 terlihat bahwa *node* dapat berpindah *cluster* pada putaran yang berbeda.

4.2 Pengukuran Konsumsi Energi

Pada penelitian ini, konsumsi energi yang diukur adalah total energi yang digunakan dalam jaringan. Total energi yang digunakan dalam jaringan dapat dihitung dengan mengurangkan total sisa energi pada akhir simulasi dari total energi awal. Sisa energi *node sensor* tercantum di dalam *trace file*. Total energi yang dikonsumsi dalam jaringan berdasarkan jumlah *cluster* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran konsumsi energi

Jumlah Cluster	Konsumsi Energi [J]
4	291.556
5	289.939
8	286.904
10	284.451

Pada Tabel 2 terlihat bahwa jumlah *cluster* ideal, yaitu jumlah *cluster* yang mengonsumsi energi paling sedikit di antara tiga variasi jumlah *cluster* lainnya adalah 10 *cluster*. Namun, jumlah MCH pada simulasi ini yang menjadi titik fokus penelitian. Dalam penelitian ini dipilih jumlah *cluster* sebanyak 10 dan 8, yang merupakan jumlah *cluster* dengan jumlah konsumsi energi paling sedikit, dan membuat kombinasi jumlah MCH untuk keduanya.

Total konsumsi energi yang dikonsumsi untuk masing-masing kombinasi jumlah MCH ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

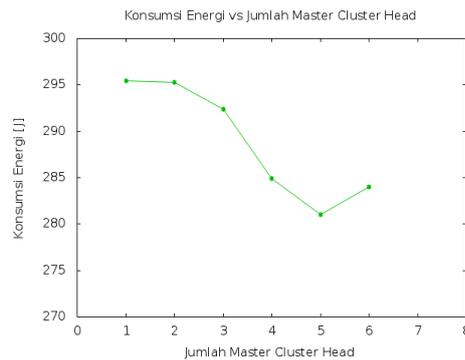
Tabel 3. Hasil pengukuran konsumsi energi 10 *cluster*

Jumlah MCH	Konsumsi Energi [J]
1	295.477
2	295.255
3	292.351
4	284.941
5	281.056
6	283.994

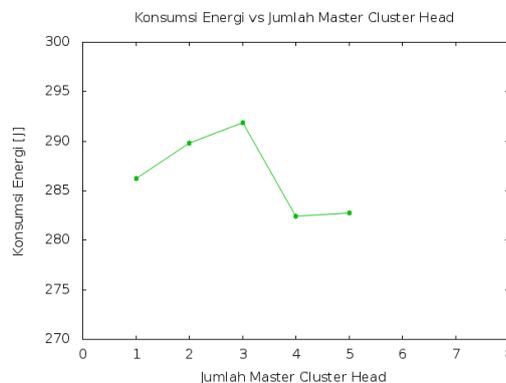
Tabel 4. Hasil pengukuran konsumsi energi 8 *cluster*

Jumlah MCH	Konsumsi Energi [J]
1	286.214
2	289.82
3	291.917
4	282.423
5	282.802

Tabel 3 menunjukkan bahwa 5 MCH adalah jumlah MCH yang mengonsumsi energi paling sedikit di antara kedua kombinasi MCH lainnya. Hal yang berbeda ditunjukkan oleh Tabel 4. Pada Tabel 4 terlihat bahwa jumlah MCH optimal adalah 4. Namun, hal yang menarik ialah kedua jumlah MCH optimal merupakan setengah dari jumlah CH masing-masing. Hal ini terjadi karena kemungkinan CH untuk menjadi MCH lebih kecil ketika jumlah MCH lebih kecil dari setengah jumlah CH. Semakin kecil kemungkinan *node* CH menjadi MCH, maka akan sangat mungkin pada pemilihan MCH, tidak ada MCH yang terpilih sehingga CH mengirimkan data secara langsung ke BS. Hal yang sama juga terjadi ketika jumlah MCH lebih besar dari setengah jumlah CH. Semakin besar kemungkinan *node* CH menjadi CH, maka semakin banyak CH yang mengirimkan data secara langsung ke BS dan proses pengiriman data kembali meyerupai LEACH. Perbandingan total energi yang dikonsumsi dengan jumlah MCH untuk tiap kombinasi *cluster* juga dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

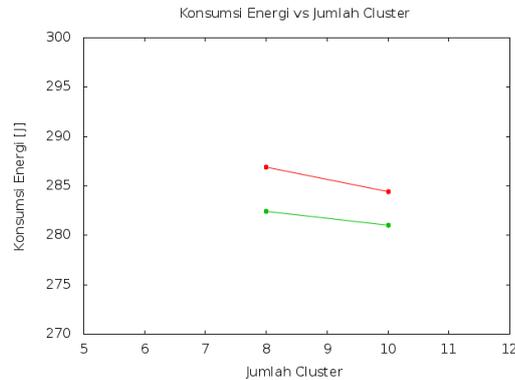


Gambar 8. Perbandingan total konsumsi energi terhadap jumlah MCH dengan jumlah *cluster* sebanyak 10



Gambar 9. Perbandingan total konsumsi energi terhadap jumlah MCH dengan jumlah *cluster* sebanyak 8

Kedua gambar tersebut menunjukkan bahwa jumlah MCH yang paling hemat energi adalah setengah dari jumlah CH. Selanjutnya dibuat perbandingan tingkat konsumsi energi untuk semua *cluster* apabila CH mengirimkan data langsung ke BS (LEACH) dan CH mengirimkan data ke BS melalui MCH (H-LEACH). Jumlah MCH yang digunakan untuk perbandingan ini adalah jumlah MCH yang memiliki tingkat konsumsi energi terendah dalam *cluster* yang sama. Perbandingan keduanya ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan total konsumsi energi terhadap jumlah *cluster* pada LEACH dan H-LEACH

Gambar 10 menunjukkan bahwa protokol *routing* H-LEACH memiliki tingkat konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan protokol *routing* LEACH pada jumlah *cluster* yang sama. Hal ini disebabkan karena hanya ada beberapa *node* yang bertugas mengirimkan data ke BS, yaitu MCH, pada H-LEACH dan pada LEACH, seluruh CH yang bertugas mengirimkan data langsung ke BS. Tingkat konsumsi energi terbesar terjadi pada proses pengiriman data menuju BS dan semakin sedikit *node* yang bertugas untuk melakukan pengiriman data, maka energi yang dikonsumsi di dalam jaringan akan semakin rendah.

4.3 Pengukuran *Throughput*

Total *throughput* yang diukur pada penelitian ini adalah total data dalam *bytes* yang berhasil diterima oleh BS berdasarkan kombinasi jumlah *cluster*, jumlah MCH, dan total energi yang dikonsumsi. Tabel 8 menunjukkan total *throughput* berdasarkan kombinasi jumlah *cluster* dan Tabel 9 serta Tabel 10 menunjukkan total *throughput* berdasarkan kombinasi jumlah *cluster* dan Tabel 9 serta Tabel 10 menunjukkan total *throughput* berdasarkan kombinasi jumlah MCH.

Tabel 5. Hasil pengukuran *throughput* berdasarkan jumlah *cluster*

Jumlah <i>Cluster</i>	Konsumsi Energi [J]	Total <i>Throughput</i> [MB]
4	291.556	127597
5	289.939	128598
8	286.904	26677.3
10	284.451	28636.1

Tabel 6. Hasil pengukuran *throughput* berdasarkan jumlah MCH dengan 10 *cluster*

Jumlah MCH	Konsumsi Energi [J]	Total <i>Throughput</i> [MB]
1	295.477	18977
2	295.255	19805.4
3	292.351	21014.9
4	284.941	21637
5	281.056	23433.4
6	283.994	22821.2

Tabel 7. Hasil pengukuran *throughput* berdasarkan jumlah MCH dengan 8 *cluster*

Jumlah MCH	Konsumsi Energi [J]	Total <i>Throughput</i> [MB]
1	286.214	18443
2	289.82	18355.3
3	291.917	20136.6
4	282.423	22324.8
5	282.802	21552.4

Tabel 5 menunjukkan bahwa jumlah *cluster* optimal, yaitu 10, memiliki total *throughput* paling tinggi di antara jumlah *cluster* lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah *cluster* optimal memiliki *throughput* paling tinggi.

Untuk pengukuran *throughput* berdasarkan variasi jumlah MCH, pengukuran dilakukan berdasarkan jumlah MCH menggunakan variasi jumlah *cluster* yang memiliki konsumsi energi terendah. Tabel 6 menunjukkan bahwa jumlah MCH optimal memiliki total *throughput* tertinggi dibandingkan dengan variasi jumlah MCH lainnya. Hal serupa juga terjadi pada Tabel 7. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah MCH sebanyak setengah dari jumlah CH adalah jumlah MCH yang memiliki efisiensi tertinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan skenario simulasi yang dijalankan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa jumlah MCH optimal adalah setengah dari jumlah CH. Hal ini didukung oleh hasil pengukuran konsumsi energi serta *throughput* yang merupakan indikator kinerja dari simulasi ini.

REFERENSI

- [1]. Richard, W. G. 2009. Extending Leach Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. Thesis. Kampala: Faculty of Computing and Information Technology Makerere University.
- [2]. Fajar, M. 2012. "Pengantar Jaringan Sensor Nirkabel". <http://mfajar.wordpress.com/category/kuliah-kuliah/wireless-sensor-network> (diakses 12 Maret 2014).
- [3]. Villalba, L. J. G. et al. 2009. "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks". *Sensors*, Vol. 9, Number 11. <http://www.mdpi.com/journal/sensors> (diakses 6 Februari 2014).

- [4]. Villegas, M. A. E., Tang, S. Y., Qian, Y. Tanpatahun. Wireless Sensor Network Communication Architecture for Wide-Area Large Scale Soil Moisture Estimation and Wetlands Monitoring. Puerto Rico: University of Puerto Rico at Mayagüez.
- [5]. Gnanambigai, J., Rengarajan, N., Anbukkarasi, K. 2012. Leach and Its Descendant Protocols: A Survey. International Journal of Communication and Computer Technologies, 1(3): 15-21.