

Pemodelan Multi-Layer Multihop Routing Protocol Pada Jaringan Wireless Sensor Network

Reza Wardhana

Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Mulawarman
Jl. Panajam Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia

E-Mail : rezawardhana@fkti.unmul.ac.id

ABSTRAK

Beberapa tahun terakhir penelitian tentang pembagian tingkatan berdasarkan jarak untuk menghemat penggunaan energi dalam transmisi data routing protocol banyak dilakukan. Dalam beberapa penelitian pembagian berdasarkan jarak ini terbukti menghemat energi cukup efisien. Dalam penelitian ini, peneliti mencoba membagi node berdasarkan jarak antara node ke basestation dan mengklasifikasikan nya kedalam tingkatan yang disebut oleh peneliti sebagai Multi-Layer. Selain itu peneliti menggunakan metode multihop sebagai metode routing yang di pilih untuk diterapkan dalam jaringan sensor nirkabel. Dalam simulasi yang peneliti lakukan menggunakan software Matlab, peneliti mampu menghemat penggunaan energi leader node sebesar 12,2% dibanding penelitian sebelumnya, dan energi total jaringan sebesar 2,9%.

Kata Kunci – routing protocol, wireless sensor network, multihop, multi layer, kuat signal,

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi informasi, kebutuhan untuk melakukan pertukaran dan penambangan data semakin meningkat. Salah satu perangkat saat ini banyak digunakan untuk melakukan penambangan data adalah perangkat kecil seperti *Wireless Sensor Network* (WSN). Perangkat kecil seperti WSN saat ini menjadi perangkat yang banyak digunakan karena installasinya yang mudah dan bisa diterapkan dalam banyak kondisi, seperti militer, deteksi kebakaran hutan, kesehatan, pemantauan rumah, parkir cerdas, dll (Sreeja, Jayakumar, & Saratha Devi, 2018).

Kehandalan yang dibawa perangkat kecil seperti WSN bukan tanpa keterbatasan, keterbatasan utama yang banyak menjadi topik pembahasan oleh peneliti saat ini adalah penggunaan energi yang lebih efisien untuk menghemat penggunaan sumber daya baterai yang dimiliki sebuah perangkat WSN. Salah satu yang menjadi perhatian banyak peneliti untuk menghemat penggunaan energi dalam perangkat WSN adalah perutean untuk transmisi data antar perangkat. Shigh el al dalam (Singh, Singh, & Singh, 2010) mengklasifikasikan *routing protocol* WSN berdasarkan arsitektur nya yaitu *location-based protocol*, *data-centric protocol*, *hierarchical protocol*, *mobility-based protocol*, *multipath-based protocol*, *heterogeneity-based protocol*, *QOS-based protocol*. Dari beberapa klasifikasi yang ada diatas *hierarchical protocol* adalah protocol yang paling cocok untuk melakukan penghematan energi karena mampu memberikan *topology control* yang baik untuk mengurangi *overhead* transmisi dan sebagai pengembangan agregasi yang tujuan akhirnya sejalan dengan yang dibutuhkan jaringan WSN yaitu efisiensi energi (Zheng & Jamalipour, 2008).

Hierarchical protocol memiliki beberapa topologi yang membedakan proses transmisi data

antar node ke *basestation*, diantaranya ada multihop, *cluster*, dan *hybrid*. Menurut Wardhana et al dalam penelitiannya (Wardhana, Nugroho, & Widyawan, 2017) menunjukkan bahwa multihop memiliki *lifetime* jaringan yang lebih panjang jika dibandingkan *cluster* dan *hybrid*, namun memiliki permasalahan lain terhadap beban transmisi yang terlalu besar yang dibebankan kepada node terdekat dengan *basestation*. Dalam penelitian ini peneliti mencoba menawarkan pemodelan terbaru untuk *routing protocol* multihop dengan fokus untuk menanggulangi beban transmisi pada node terdekat dengan basestation. Pada akhir penelitian ini peneliti membandingkan hasil akhir pemodelan tersebut dengan menggunakan simulator dari aplikasi Matlab untuk memperoleh persentase dari simulator yang dilakukan.

2. TINJAUAN PUSAKA

Routing protocol memiliki fungsi utama sebagai pencarian rute terbaik dalam sebuah perangkat yang terhubung secara heterogeny dari sebuah node ke node lain atau ke *end device*. Perbedaan antara routing protocol pada jaringan besar dengan jaringan WSN adalah sebuah routing protocol WSN memiliki fokus pada penghematan energi node yang umumnya menggunakan energi baterai yang terbatas. Salah satu penelitian awal yang memberikan pembaruan ini adalah yang dilakukan oleh W. R. Heinzelman et al dalam (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2000) dengan memperkenalkan routing protocol LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*). LEACH bertujuan untuk penghematan energi dalam sebuah node nirkabel dan menghindari node dari pembuangan energi untuk hal yang tidak perlu. Node yang dikelompokkan kedalam *cluster* kemudian memilih *cluster head* (CH) secara acak dan bergantian, *cluster head* ini yang nantinya akan menyampaikan data yang telah

ditambang dari node lain termasuk dirinya sendiri untuk ditransmisikan ke *base station*.

Setelah LEACH menjadi sangat populer muncul sebuah *routing protocol* dengan struktur hirarki namun memiliki konsep multihop. Routing protocol ini diperkenalkan oleh Lindsey et al pada (Lindsey & Raghavendra, 2002) dengan nama PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*). *Routing protocol* ini memiliki konsen untuk mengatasi permasalahan pada LEACH yaitu tentang pemborosan jaringan lifetime pada jaringan keseluruhan jaringan WSN yang terbentuk. Pegasis memang terbukti memberikan lifetime jaringan menjadi lebih efisien, namun beban yang besar diberikan kepada *leader* yang ditunjuk sebagai pengantar data ke *basestation*, node ini menjadi korban yang dimatikan lebih dulu untuk bisa membawa seluruh data dari jaringan.

Mengatasi permasalahan PEGASIS klasik diatas, muncul gagasan baru dari Kumar et al dalam (Kumar & Khunteta, 2018) dengan memperkenalkan EE-Pegasis. Routing protocol ini mengatasi permasalahan pemborosan pada leader node pada pegasis dengan membuat leader node lebih banyak secara merata sehingga beban tidak sepenuhnya hanya dibebankan kepada satu node. Metode ini terbukti mampu mengatasi permasalahan pemborosan yang terjadi pada leader node, namun beluk sepenuhnya efektif karena node yang dipilih sebagai leader bisa jadi berada pada jarak yang jauh yang menyebabkan node mengeluarkan energi berlebih untuk bisa mentranmisikan datanya.

Mishra et al pada (Mishra, Rahman, Bharadwaj, & Sharma, 2016) memiliki pemikiran yang berbeda untuk mengatasi permasalahan pemborosan pada leader node Pegasis dengan menambahkan indikator RSSI sebagai salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan apakah sebuah node layak menjadi leader atau tidak, sehingga sebuah node tidak akan dipilih menjadi leader jika nilai RSSI nya diatas ambang batas yang mengindikasikan bahwa node tersebut memiliki jarak yang jauh dari bs. Hal ini dilakukan secara periodic dalam setiap putaran agar rata penggunaan energi antar tiap node tetap bisa terjaga. Hal ini menjadi indikasi sumber pemborosan baru yang bisa membuat node mengeluarkan energy baru untuk melakukan setup setiap putarannya.

Penelitian lain yang juga memperhatikan jarak untuk setiap node adalah Distributed Pegasis (DPegasis) dalam (Kulshrestha & Mishra, 2018) yang memiliki gagasan untuk membagi setiap node kedalam satu pengelompokan yang mereka sebut *chain*. Pengelompokan ini mirip seperti pengelompokan clustering yang membedakan adalah setiap chain akhirnya akan saling terhubung dengan chain lain. Setiap chain menunjuk leader yang akan terhubung dengan chain lain. Mekanisme ini mampu membuat setiap node memperoleh efisiensi untuk lifetime setiap node, namun mengorbankan leader

pada chain terdekat dengan basestation yang dibebani beban transmisi data keseluruhan node seperti yang terjadi pada Pegasis klasik.

Dalam penelitian ini peneliti mencoba melihat segala kekurangan dari beberapa optimalisasi yang dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya untuk bisa menghasilkan routing protocol yang lebih efisien dalam penggunaan energi antar setiap node. Peneliti mengajukan penggunaan indikator kuat signal RSSI untuk bisa memetakan jarak setiap node kepada basestation dan antara node ke node lain. Hal ini dilakukan agar node yang jauh dari basestation akan memilih node terdekat dan tidak membuang energi untuk melakukan transmisi data. Selain itu peneliti juga menggunakan penjadwalan TDMA untuk mengoptimalkan proses penjadwalan setiap putaran. Jarak antar node ke basestation akan membuat node dibagi menjadi dua level, dimana level pertama adalah level leader node dan level kedua adalah level member node.

3. RANCANGAN SISTEM

a. Pembagian Tingkatan

Skema awal yang akan ditawarkan pada penelitian ini adalah pembagian tingkatan. Skema ini diperlukan untuk setiap basestation mengetahui jarak antar setiap node. Node yang memiliki jarak lebih kurang dari 100m akan di masukan kedalam level pertama sedangkan node yang lebih dari 100m akan dimasukan dalam level selanjutnya. Seluruh node yang ada pada level pertama akan memiliki kemungkinan untuk menjadi leader node sedangkan yang berada pada node kedua akan menjadi member node dan hanya akan menjadi leader node jika salah satu anggota leader node mati dan putaran ulang dimulai dengan leader node baru. Skema penghitungan jarak antar node ke basestation atau antar node menggunakan metode RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*) seperti disampaikan dalam (Karl & Willig, 2006) :

$$P_{revd} = C \frac{P_{tx}}{d^a} \quad (1)$$

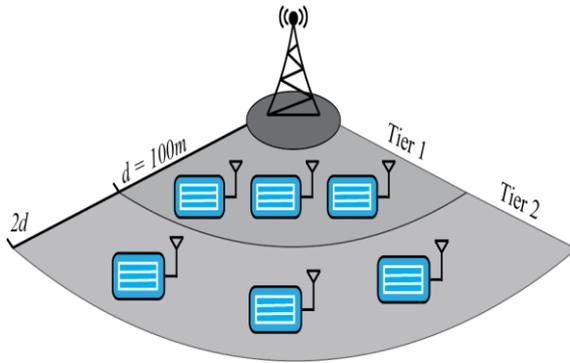
$$d = \sqrt[a]{\frac{CP_{tx}}{P_{revd}}} \quad (2)$$

dimana, d adalah jarak, a adalah *path loss coefficient* yang dalam penelitian ini bernilai 0, P_{tx} adalah power yang dikeluarkan *transmitter*, P_{revd} adalah power yang terima oleh *receiver*, dan C adalah kecepatan cahaya.

Perhitungan jarak dengan RSSI dilakukan dalam pada fase awal yang kemudian menghasilkan database sederhana yang kemudian menjadi acuan untuk pembentukan tingkatan dan jalur alur multihop yang terbentuk. Sekema ini diperlukan untuk mempermudah node mengenali

node terdekat dan menentukan jalur untuk bisa nementukan jalur data menuju basestation.

membentuk cluster yang sesuai dengan tingkatannya. Gambar 1 akan menunjukkan mekanisme pembagian tingkatan dengan parameter jarak yang jadi pembagi dalam penelitian ini adalah 100m dari *basestation*. Jumlah node akan diabaikan untuk mendapatkan kekesuaian dengan batas tingkatan pertama.



Gambar 1. Mekanisme Pembagian Tingkatan

Dari hasil ini maka akan di peroleh nilai interval antar kelas yang akan dinyatakan dengan formula dibawah ini :

$$T_1(d_{min}, \leq 100) = \begin{cases} n_i, d_{min} \in n \\ n_i, d_{min} | i_t, T_1^{d_{max}} \leq 100: \notin T_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$T_2(> 100, d_{max}) = \begin{cases} n_i, d_{min} | i_t, T_2^{d_{min}} > 100: \notin T_1 \\ n_i, d_{max} \in n \end{cases} \quad (4)$$

dimana, i_t adalah interval antar tingkatan, d_{max} adalah jarak terjauh dan d_{min} adalah nilai terdekat, sedangkan 100 adalah batas maximum dari tingkatan pertama dalam satuan meter.

Nilai batas bawah tingkatan pertama ($T_1^{d_{min}}$) adalah node n dengan jarak terdekat (d_{min}) adalah nilai terendah dari keseluruhan node dan nilai batas jarak terjauh (d_{max}) adalah 100. Sedangkan nilai batas bawah tingkatan kedua ($T_2^{d_{min}}$) adalah node n dengan jarak terdekat (d_{min}) adalah 100 hingga jarak terjauh (d_{max}) adalah nilai tertinggi dari keseluruhan node.

b. Perhitungan Kuat Signal

Dengan indikator *signal strength* tanpa memperhitungkan waktu tempuh, d_{ij} akan diindikasikan sebagai jarak antara n_i dan n_j . Algoritme RSSI akan dipilih dalam penelitian ini karena kebutuhan akan penelitian ini hanya untuk mengetahui jarak antar dua node n . Selain itu algoritme lain seperti TOA dan TDOA dinilai cukup

rumit dan akan meningkatkan biaya yang akan dikeluarkan oleh sebuah node WSN. Persamaan yang akan digunakan untuk menghitung RSSSI adalah persamaan umum yang sudah banyak digunakan oleh peneliti sebelumnya. Persamaan ini telah dibahas pada bagian sebelumnya dan telah di konfersi kedalam perhitungan dalam perhitungan jarak seperti terlihat pada formula (1) dan (2).

Untuk mencari *packet loss* salah satu rumus yang telah banyak digunakan oleh peneliti sebelumnya adalah rumus yang dikemukakan oleh T.S. Rappaport dalam (Rappaport, 1996) yang akan digunakan dalam penelitian ini :

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10 \log\left(\frac{d_0}{d_{ij}}\right) \quad (5)$$

dimana, PL adalah *path loss* yang ingin dicari dalam satuan dB , dan $PL(d_0)$ adalah nilai asumsi *path loss* saat d_0 . $PL(d_0)$ dalam penelitian ini memiliki nilai default 0 dengan asumsi *path loss* dalam $d_0=1m$ adalah 0 (tidak ada nilai). a adalah nilai *path loss exponent*, nilai ini telah dikemukakan sebelumnya oleh T.S. Rappaport dalam bukunya yang telah menjadi acuan utama penentuan nilai *path loss* hingga saat ini. Dalam penelitian ini nilai *path loss exponent* yang digunakan adalah *free space path loss* dengan nilai *exponent* adalah 2.

c. Pembatasan Power Trasmisi

Dalam penelitian ini, kuat signal tidak hanya dicari untuk mencari jarak, juga akan dilakukan pembatasan untuk menghemat daya yang akan dikeluarkan oleh radio transmission (TX). Nilai P_{rx} dalam penelitian ini akan menggunakan nilai terendah dari sensitifitas *radio receiver*. Nilai P_{rx} yang ditentukan adalah sebesar -80 dB. Untuk mendapatkan power transmission (P_{tx}) yang optimal bisa menggunakan persamaan dibawah ini :

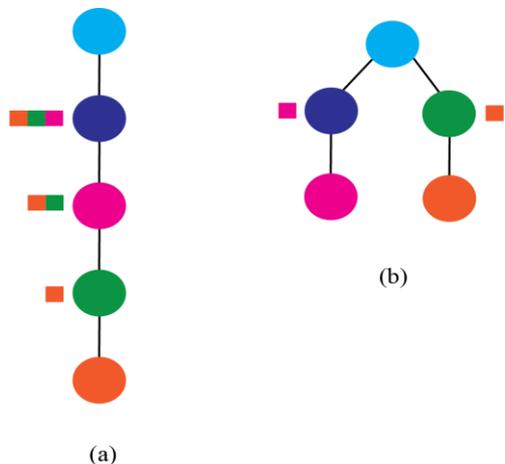
$$P_{tx}(dBm) = P_{rx} - PL(dB) - G, \\ -25 \geq P_{tx} \leq 0(dBm) \quad (6)$$

dimana, P_{tx} adalah power transmission yang ingin dicapai, dimana nilai ini tidak lebih kecil dari -25dBm dan tidak lebih besar dari 0dBm. Sedangkan G adalah nilai *antenna gain* yang dalam penelitian ini nilainya adalah 0 yang mengacu pada gain pada *isotropic antenna*. Nilai *antenna gain* ini telah ditentukan sebelumnya oleh William et al dalam (William & D. Cowan, 1971) yang menjadi rujukan oleh banyak peletian lain.

d. Penjadwalan

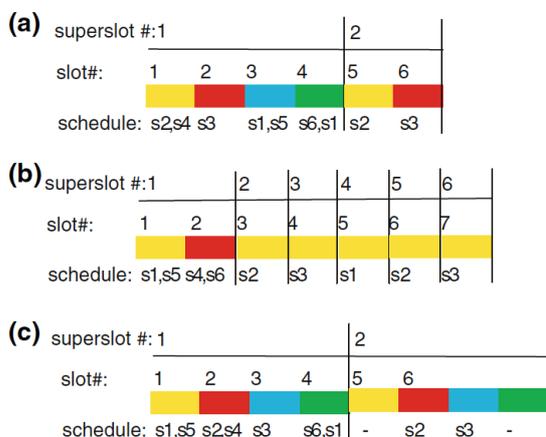
Skema TDMA (*Time Division Multiple Akses*) yang banyak digunakan dalam *routing protocol* WSN juga akan digunakan dalam model *routing* yang ditawarkan ini. Metode TDMA lebih disukai oleh para peneliti dibanding CSMA/CA karna dinilai lebih efisien dari penggunaan biaya. Namun penerapan TDMA dalam multihop memiliki konsekuensi lain, seperti yang di sampaikan oleh Sasaki et al dalam

(Sasaki, Furuta, Ukai, & Ishizaki, 2016), dalam multihop skala besar TDMA dinilai tidak mampu untuk menangani masalah optimalisasi kombinatorial yang menjadi beban dalam penjadwalan waktu singkat yang disediakan oleh TDMA. Untuk itu dalam penelitian ini peneliti tidak menggunakan node heterogen dalam satu cabang pohon, melainkan memecah pohon multihop tersebut kedalam beberapa cabang seperti terlihat pada ilustrasi dalam gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi TDMA, (a) Heterogen satu pohon, (b) Heterogen multi pohon.

Dari ilustrasi diatas, penjadwalan TDMA mampu menjangkau node dalam skala besar. Penjadwalan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ergen et al dalam (Ergen & Varaiya, 2010) dan diperoleh mekanisme penjadwalan seperti terlihat dalam ilustrasi dalam Gambar 3.



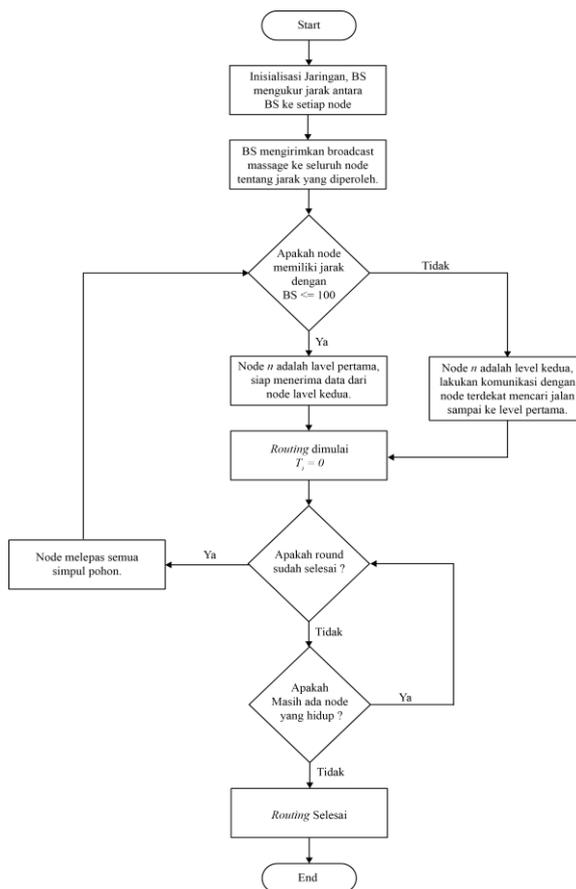
Gambar 3. Penjadwalan TDMA dengan multi pohon

Dari kedua gambar diatas, terlihat bahwa akan ada sedikit penyesuaian pada jadwal yang diberikan kepada node n . setiap node n dalam pohon yang menjadi node tumpangan (terhubung secara *multihop* dengan node lain), akan membuka slot untuk menjadi penerima data terlebih dahulu sebelum mengirimkan

data kepada node tumpangan di atasnya hingga sampai pada node yang menjadi leader di level pertama. Hal ini dibutuhkan untuk menjembatani kebutuhan pengiriman data node dengan skema TDMA. Penyesuaian TDMA dalam penelitian ini bisa di rumuskan seperti dibawah ini.

$$T_n = \frac{T}{\frac{slot}{n}(R^{\frac{n_{max}}{n}})} \quad (7)$$

dimana, T_n adalah TDMA untuk setiap node n , sedangkan *slot* adalah nilai putaran setiap node. n_{max} adalah nilai n dengan anggota terbesar. R adalah *round* yang ditentukan secara periodik berjalan dalam satu waktu.



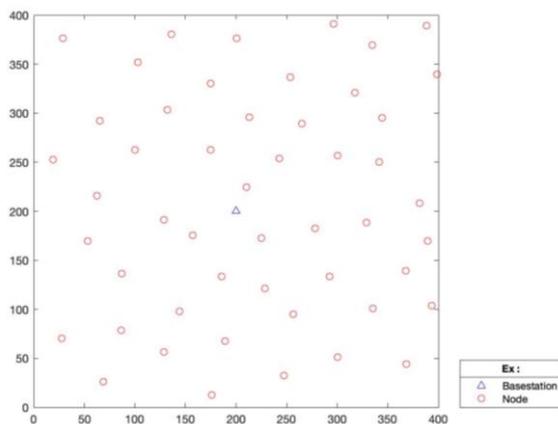
Gambar 4. Flowchart Proses Routing

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses simulasi dilakukan pada bidang dua dimensi dengan ukuran 400 m x 400 m. Jaringan WSN yang digunakan terdiri dari 50 node yang tersebar secara acak pada sumbu (x,y) dan satu *basestation* yang berada pada titik $(200, 200)$. Setiap node diasumsikan memiliki kemampuan yang sama dan sumber daya energi awal yang sama. Sedangkan *BS* diasumsikan memiliki sumber daya energi yang tidak terbatas. Tabel 1 akan menunjukkan parameter simulasi, dan Gambar 6 akan menunjukkan sebaran node dan *BS* yang akan menjadi topologi awal dalam penelitian ini.

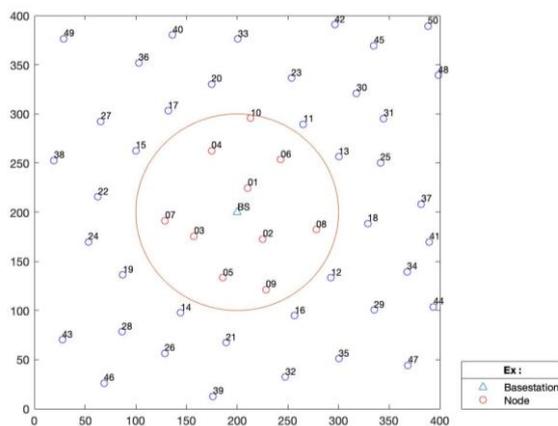
Tabel 6. Distribusi node dan BS

Parameter	Nilai
Area Simulasi	400m x 400m
Base station	1
Node	50
Path Loss Model	Free Space
Path Loss Exponent	2
Battery	2xAA Battery @800mAh
Full Energi TX (FE_{TX})	25 mA
Energi Kalibrasi (E_{calibe})	$6.4/10 FE_{TX}$
Energi TX (E_{TX})	$12.1 - 21.7$ mA
Energi RX (E_{RX})	$9/10 E_{TX}$
Energi Idle Mode (E_{idle})	$2/10 E_{TX}$
Energi LED Mode (E_{LED})	3.3 mA
Energi Sleep Mode (E_{sleep})	2.58 mA
Banyak Putaran	~



Gambar 5. Sebaran Node n dan BS

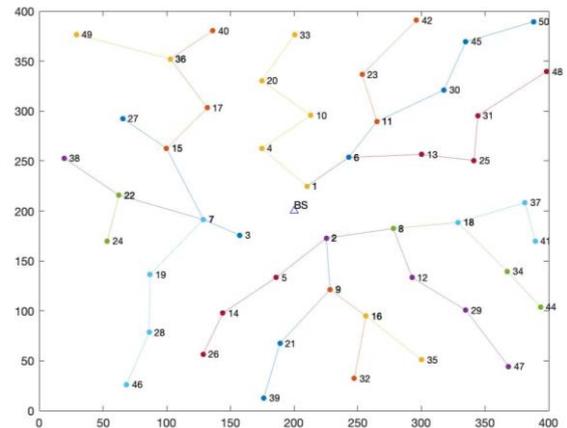
Untuk mengukur energi terpakai, pemodelan yang digunakan adalah dari penelitian sebelumnya yang disampaikan oleh Kerisotis et al dalam (Kerasiotis, Prayati, Antonopoulos, Koulamas, & Papadopoulos, 2010). Dari penelitian tersebut didapatkan hasil penggunaan energi yang digunakan dalam segala kondisi yang sesuai dengan penelitian ini.



Gambar 6. Pembagian Level

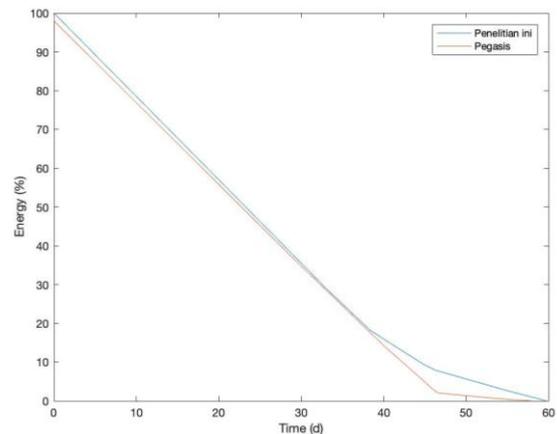
Dari kondisi pada Gambar 5 inialisasi awal dilakukan, dan diperoleh pembagian tingkatan seperti

terlihat pada Gambar 6. Setelah kondisi terinisialisasi seperti terlihat pada Gambar 6 maka routing dimulai.



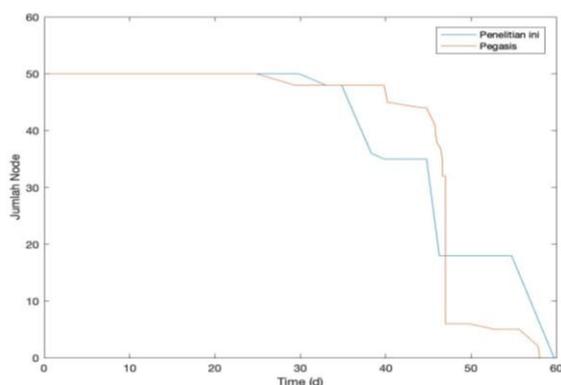
Gambar 7. Routing Putaran Pertama

Dari node dengan 100m terdekat yang menjadi level 1 terlihat ada 10 node yang menjadi anggotanya, sedangkan 40 node sisanya berada di luar ruang lingkup level pertama dan menjadi level ke 2. Dari pembagian ini terlihat routing yang berjalan dengan round pertama membentuk tiga rumpun pohon dengan n_1 , n_2 , dan n_3 menjadi leader dari setiap simpul pohon yang terbentuk. Dari setup awal yang dilakukan untuk pembentukan simpul hingga round selesai dilakukan, terlihat penggunaan energi setiap node bervariasi antara 47mA hingga 840mA perputaran tergantung posisi dan peran dari sebuah node.



Gambar 8. Grafik Perbandingan *Lifetime* Jaringan

Dari grafik pada Gambar 8, terlihat bahwa *routing protocol* yang diusulkan dalam penelitian ini mampu bertahan selama 59,7 hari, sedangkan *routing protocol multihop PEGASIS* mampu bertahan selama 58 hari. Dari hasil ini bisa dilihat bahwa *routing protocol* yang diusulkan mampu memperpanjang masa hidup *routing protocol* PEGASIS selama 1,7 hari, atau lebih baik 2,9% dari *routing protocol* populer PEGASIS. Hal ini menunjukkan ada perbaikan dari sisi lifetime jaringan secara keseluruhan pada penelitian ini jika dibandingkan dengan routing protocol Pegasis.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Node Hidup

Jika dibandingkan dari *lifetime* node, routing protocol yang diusulkan mengalami node mati pertama kali pada $T=2850900$ atau pada hari ke-32, sedangkan pegasis mengalami kematian pertama kali pada $T=2533732$ atau pada hari ke-29. Dalam penelitian ini terlihat bahwa penelitian yang diusulkan mampu menambah masa hidup node terdekat selama 2 hari.

5. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini terbukti bahwa pemodelan yang dilakukan menggunakan kuat signal untuk mengidentifikasi jarak dan membagi node menjadi tingkatan mampu memperbaiki permasalahan *lifetime* pada routing protocol PEGASIS. Hasil simulasi telah menunjukkan bahwa penelitian ini mampu meningkatkan 2,9% masa hidup dari jaringan. Karakteristik yang diberikan ini membuat *routing protocol* ini cocok untuk digunakan pada jaringan WSN heterogen yang menempatkan node pada jarak yang jauh dan medan yang sulit. Kekurangan dalam penelitian ini adalah energi terpakai untuk penambangan data yang diabaikan. Selain itu tingkatan yang dibagi berdasarkan jarak yang telah ditentukan dinilai kurang efektif terlihat dari topologi yang terbentuk masih saling bertumpuk dan kurang merata. Selain itu pada fase tengah routing node yang mati secara bersamaan dalam penelitian ini juga cenderung banyak. Penelitian selanjutnya bisa memperbaiki dari skema algoritma untuk mengatasi permasalahan agar diperoleh hasil yang lebih tepat dan efisien.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ergen, S. C., & Varaiya, P. (2010). TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 16(4), 985–997. <https://doi.org/10.1007/s11276-009-0183-0>
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 00(c), 1–10. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>

- Karl, H., & Willig, A. (2006). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. In *Jhon Wiley and Sons*. <https://doi.org/10.1002/0470095121>
- Kerasiotis, F., Prayati, A., Antonopoulos, C., Koulamas, C., & Papadopoulos, G. (2010). Battery lifetime prediction model for a WSN platform. *Proceedings - 4th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2010*, 525–530. <https://doi.org/10.1109/SENSORCOMM.2010.85>
- Kulshrestha, J., & Mishra, M. K. (2018). DPEGASIS: Distributed PEGASIS for chain construction by the nodes in the network or in a zone without having global network topology information. *IMPACT 2017 - International Conference on Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies*, 13–17. <https://doi.org/10.1109/MSPCT.2017.8363964>
- Kumar, V. K., & Khunteta, A. (2018). Energy efficient PEGASIS routing protocol for wireless sensor networks. *Proceedings - 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering, ICMETE 2018*, 91–95. <https://doi.org/10.1109/ICMETE.2018.00031>
- Lindsey, S., & Raghavendra, C. (2002). PEGASIS: Power efficient Gathering in sensor information systems. *Proceeding of IEEE Aerospace Conference*, 3, 1125–1130. <https://doi.org/10.1109/AERO.2002.1035242>
- Mishra, A. K., Rahman, R. U., Bharadwaj, R., & Sharma, R. (2016). An enhancement of PEGASIS protocol with improved network lifetime for Wireless Sensor Networks. *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference, PCITC 2015 - Proceedings*, 142–147. <https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438149>
- Rappaport, T. S. (1996). *Wireless Communication Principles & Practice* (1st Editio). New Jersey: Pearson.
- Sasaki, M., Furuta, T., Ukai, T., & Ishizaki, F. (2016). TDMA scheduling problem avoiding interference in multi-hop wireless sensor networks. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 10(3), 1–8. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2016jamdsm0047>
- Singh, S. K., Singh, M. P., & Singh, D. K. (2010). Routing protocols in wireless sensor networks - A Survey. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES)*, 1(2), 63–83. <https://doi.org/10.3390/s91108399>

- Sreeja, B. ., Jayakumar, L., & Saratha Devi, G. (2018). Wireless sensor network applications : A study. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 118(11), 385–390. <https://doi.org/10.12732/ijpam.v118i11.47>
- Wardhana, R., Nugroho, L. E., & Widyawan, W. (2017). *Pemodelan Multi Level Hierarchical Protocol Berdasarkan Kuat Signal Dan Topology Control Untuk Jaringan Sensor Nirkabel* (Universitas Gadjah Mada). Retrieved from http://lib.ugm.ac.id/ind/?page_id=248
- William, I. O., & D. Cowan, S. (1971). *The Truth About CB Antennas* (First Edit). Radio Publication, Wilton.
- Zheng, J., & Jamalipour, A. (2008). Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective. In J. Zheng & A. Jamalipour (Eds.), *A John Wiley & Sons, INC.* <https://doi.org/10.1002/9780470443521>