

## DESAIN TOPOLOGI KOMUNIKASI WIRELESS SENSOR NETWORK (WSN) PADA APLIKASI SISTEM STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM) JEMBATAN

Evy Nur Amalina<sup>1</sup>, Eko Setijadi<sup>2</sup>, Suwadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Teknik Informatika, Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo, Sidoarjo

E-mail: [evynuramalina@gmail.com](mailto:evynuramalina@gmail.com)

<sup>2,3</sup>Departemen Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya,

Email: [ekosetijadi@ee.its.ac.id](mailto:ekosetijadi@ee.its.ac.id), [suwadi@ee.its.ac.id](mailto:suwadi@ee.its.ac.id)

### ABSTRAK

Sistem SHM (*Structural Health Monitoring*) berbasis WSN (*Wireless Sensor Network*) memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan berbasis kabel. Namun, WSN memiliki kekurangan yaitu kapasitas dan daya baterai WSN kecil. Mendesain topologi yang sesuai dengan lingkungan merupakan salah satu cara untuk menghemat energi. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan simulatort NS-2 berdasarkan karakteristik Xbee Pro v1.xCx dengan dua asumsi. Asumsi yang pertama adalah dimana sepuluh node sensor akan bergantian mengirimkan paket data menuju sink secara bergantian. Sedangkan asumsi yang kedua adalah jika terdapat sebuah kendaraan yang melintasi jembatan dari kiri ke kanan sehingga node sensor akan mengirimkan paket data menuju sink mengikuti gerakan kendaraan. Pada topologi *star* asumsi pertama didapatkan nilai dari parameter kinerja jaringan seperti *packet loss*, *delay end-to-end* rata-rata, *throughput*, energi *end-to-end* rata-rata yang dihasilkan masing-masing adalah 89,99%, 6,597 ms, 0,89 kbps dan 5,512 Joule. Sedangkan pada asumsi yang kedua masing-masing adalah 90,02%, 6,75 ms, 1,60 kbps dan 0,318 Joule. Pada topologi *mesh* asumsi pertama didapatkan nilai dari parameter kinerja jaringan seperti *packet loss*, *delay end-to-end* rata-rata, *throughput*, energi *end-to-end* rata-rata yang dihasilkan masing-masing adalah 0,0027%, 23,0265 ms, 8,00 kbps dan 222,38 Joule. Sedangkan pada asumsi kedua masing-masing adalah 0,55%, 34,43 ms, 15,98 kbps dan 6,01 Joule. Pada topologi *half tree* asumsi pertama didapatkan nilai dari parameter kinerja jaringan seperti *packet loss*, *delay end-to-end* rata-rata, *throughput*, energi *end-to-end* rata-rata yang dihasilkan masing-masing adalah 0,0027%, 23,0273 ms, 8,00 kbps dan 219,71 Joule. Sedangkan asumsi kedua masing-masing adalah 4,43%, 33,48 ms, 15,35 kbps dan 6,23 Joule. Berdasarkan parameter kinerja jaringan, maka topologi *mesh* dan *half tree* dapat diimplemen-tasikan pada sistem SHM jembatan.

**Kata Kunci** : efisiensi energi, SHM, topologi, WSN

### PENDAHULUAN

Bangunan, jembatan, dan waduk merupakan contoh dari infrastruktur teknik sipil yang kompleks. Ketika terjadi kerusakan atau kondisi abnormal, maka infrastruktur tersebut tidak mudah untuk diantisipasi. Dampak dari kerusakan tersebut yang perlu diwaspadai adalah

timbulnya korban jiwa. Terdapat beberapa peristiwa kerusakan infrastruktur jembatan yang menimbulkan korban diantaranya adalah peristiwa yang terjadi di Nepal pada tanggal 25 Desember 2007. Pada hari itu, jembatan gantung Chhinchu Suspension Bridge yang panjangnya mencapai 187 meter mengalami kelebihan beban sehingga mengakibatkan 13 orang tewas dan 32 orang terluka [1]. Sedangkan pada tanggal 26 November 2011 di Indonesia, Jembatan Kutai Kertanegara yang panjangnya 710 meter terputus dan mengakibatkan 24 orang tewas, 39 orang terluka serta 12 orang lainnya hilang [2].

Kerusakan jembatan seperti contoh di atas dapat diantisipasi. Teknologi yang menjadi solusi pemantauan kerusakan ini muncul dengan nama teknologi Pemantauan Kesehatan Struktural atau biasa disebut Structural Health Monitoring (SHM). Berdasarkan komunikasinya, SHM pada jembatan dibedakan menjadi dua jenis yaitu teknologi SHM berbasis kabel dan nirkabel. Teknologi berbasis kabel ini memiliki keunggulan yaitu data yang dikirimkan oleh sensor sangat akurat dan tidak membutuhkan energi listrik tambahan saat sensor bekerja karena energi listrik telah disuplai dari pusat kontrol. Namun, teknologi berbasis kabel juga memiliki kekurangan yaitu dibutuhkan adanya instalasi kabel dimana instalasi merupakan pekerjaan yang dianggap rumit [4]. Untuk mengurangi biaya dari instalasi kabel dan banyaknya komponen yang digunakan, solusi yang paling tepat adalah menggunakan Wireless Sensor Network (WSN) dalam sistem SHM [5]. Wireless sensor network (WSN) atau Jaringan Sensor Nirkabel adalah suatu jaringan nirkabel yang terdiri dari beberapa sensor (sensor node) yang diletakkan ditempat-tempat yang berbeda untuk memantau kondisi suatu lingkungan. Sensor node – sensor node akan saling berkomunikasi dan bekerja sama untuk mengumpulkan data dari lingkungan sekitar, misalnya suhu, tekanan udara, kelembapan udara dan beberapa parameter lingkungan lainnya. Untuk keperluan ini suatu sensor node dilengkapi dengan peralatan sensor yang digunakan untuk mendeteksi lingkungan sekitar seperti peralatan sensing, pemrosesan data, penyimpanan data sementara atau memori dan peralatan komunikasi yang digunakan untuk berkomunikasi dengan sensor node yang lain dan sink atau node pengumpul. Sensor node juga dilengkapi dengan power supply atau baterai sebagai sumber energi. Namun, WSN memiliki kekurangan yaitu terdapat kendala dalam kapasitas dan kecilnya sumber energi listrik [5].

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan simulatort NS-2 berdasarkan karakteristik Xbee Pro v1.xCx dengan dua asumsi. Asumsi yang pertama adalah dimana sepuluh node sensor akan bergantian mengirimkan paket data menuju sink secara bergantian. Sedangkan asumsi yang kedua adalah jika terdapat sebuah kendaraan yang melintasi jembatan dari kiri ke kanan sehingga node sensor akan mengirimkan paket data menuju sink mengikuti gerakan kendaraan.

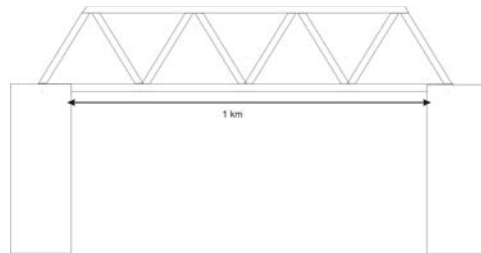
## TINJAUAN PUSTAKA

### A. *Wireless Sensor Network* (WSN)

*Wireless Sensor Network* (WSN) adalah jaringan nirkabel yang terdiri dari beberapa sensor dan memiliki kemampuan untuk mendeteksi keadaan lingkungan. Secara umum WSN terdiri dari dua komponen, yaitu *sensor node* dan *sink*. *Sensor node* merupakan kesatuan beberapa perangkat yang terdiri dari prosesor untuk pemrosesan data, memori untuk menyimpan data, sensor untuk pendeteksi kejadian, ADC (*Analog to Digital Conversion*) untuk mengkonversi pembacaan dari analog ke digital, transceiver sebagai pengirim dan penerima sinyal radio dari dan kepada node yang lain, dan baterai sebagai sumber energi [6]. *Sink* merupakan kesatuan perangkat yang mengumpulkan informasi dari *sensor node* sehingga informasi tersebut dapat diolah lebih lanjut dan didapatkan kondisi lingkungan yang dipantau.

### B. ZIGBEE (Standar IEEE 802.15.4)

ZigBee merupakan salah satu protokol dalam jaringan wireless yang didesain oleh ZigBee Alliance. Lapisannya berdasarkan standar IEEE 802.15.4 yang terdiri atas lapisan fisik, lapisan jaringan, lapisan aplikasi dan lapisan keamanan. ZigBee berbentuk minimalis dan pengoperasiannya yang mudah. Biasanya ZigBee digunakan dalam komunikasi jarak pendek yaitu sekitar 50 meter hingga 100 meter dengan kecepatan 250 kbps.



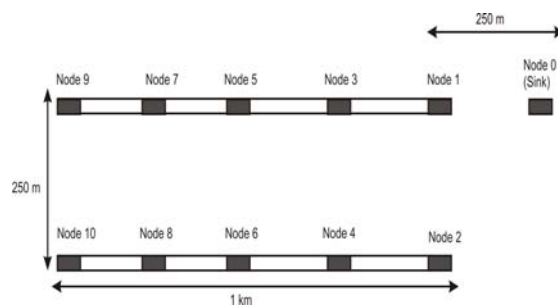
Gambar 1. Desain Jembatan tampak samping

### C. Topologi Jaringan

Ada beberapa topologi jaringan untuk mengkoordinasikan WSN, diantaranya adalah sebagai berikut:

#### 1. Topologi Star

Topologi ini merupakan topologi paling dasar, dimana setiap node mempertahankan satu jalur komunikasi langsung dengan sink / gateway.



Gambar 2. Desain Jembatan tampak atas

## 2. Topologi Mesh

Topologi ini merupakan jalur komunikasi dimana masing-masing node dapat berkomunikasi dengan yang lainnya. Dalam sebuah jaringan mesh, node mempertahankan jalur komunikasi untuk kembali ke *gateway*, sehingga jika salah satu node router *down*, secara otomatis router data akan dilewatkan melalui jalur yang berbeda.

## 3. Topologi Half Tree

Topologi *half tree* merupakan pembelahan topologi *tree*. Topologi *tree* dibelah cabangnya sehingga pada topologi *half tree* adalah hasil dari pembelahan cabang *tree*.

# DESAIN SISTEM

Pada makalah ini, sistem didesain dengan mendekati kenyataan. Desain sistem diasumsikan bahwa panjang sebuah jembatan yang akan diamati 1 km atau 1000 meter. Panjang ini adalah panjang yang melebihi panjang jembatan Kutai Kertanegara. Pada simulasi, node akan disebar 11 node yang dipisahkan dengan jarak 250 meter antar node seperti pada gambar 2. Node 0 adalah sebagai *sink* atau pengumpul sedangkan node 1 hingga 10 merupakan *sensor node*. *Sensor node* akan mengirimkan data dengan jadwal yang telah diatur dengan skenario pertama dan kedua. Skenario pertama adalah skenario dimana kesepuluh node yaitu node 1 hingga 10 mengirim paket data secara bergantian masing-masing selama 6 menit. Skenario yang kedua adalah jika terdapat kendaraan melintasi jembatan dengan kecepatan 80 km/jam, maka node-node yang memiliki koordinat yang sama dengan kendaraan akan mengirimkan paket data menuju node 0 selama 9 detik.

### A. Parameter Simulasi

Parameter yang digunakan dalam adalah parameter dengan menggunakan data sheet dari XBee Pro versi v1.xCx [6] dan disesuaikan dengan NS-2. Parameter simulasi tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai
Jenis Kanal	Wireless Channel
Model Propagasi	TwoRayGround
Jenis Layer Fisik dan MAC	802.15.4
Model Antena	OmniAntenna
Maksimal Paket Dalam Antrian	150
Waktu Simulasi	24 detik
Jenis Baterai yang digunakan	Energizer 9 V 1,5 mA

## B. Parameter Kinerja Simulasi

Berikut ini adalah parameter kinerja simulasi dimana dengan parameter ini akan diambil kesimpulan topologi mana yang terbaik dan dapat digunakan dalam aplikasi Sistem Pemantauan Jembatan.

## C. Packet Loss

Packet loss adalah banyaknya paket yang hilang selama komunikasi berlangsung. Packet loss terjadi ketika satu atau lebih paket data yang melewati suatu jaringan dan gagal mencapai node tujuan.

$$PL = P_S - P_R \quad (1)$$

Keterangan :

PL = *Packet loss* (paket)

P<sub>s</sub> = Banyak paket yang dikirim (paket)

P<sub>r</sub> = Banyak paket yang diterima (paket)

## D. Throughput

*Throughput* adalah laju rata-rata dari paket data yang berhasil dikirim melalui kanal komunikasi. *Throughput* juga dapat didefinisikan sebagai jumlah paket data yang diterima setiap detik. *Throughput* menunjukkan kapasitas kanal dari konektivitas suatu jaringan.

$$\text{Throughput} = \frac{P_r}{t} \quad (2)$$

Keterangan :

P<sub>r</sub> = Banyak paket yang diterima (paket)

t = Waktu pengambilan sample (ms)

## E. Delay

*Delay* / waktu tunda (*delay time*) yaitu selang waktu yang dibutuhkan oleh suatu paket data saat data mulai dikirim dan keluar dari proses antrian sampai mencapai titik tujuan. *Delay* ini sudah termasuk *delay* transmisi, *delay* propagasi dan *delay* proses.

$$\text{Delay} = t_r - t_s \quad (3)$$

Keterangan :

t<sub>r</sub> = Waktu penerimaan paket (ms)

t<sub>s</sub> = Waktu pengiriman paket (ms)

## F. Konsumsi Energi

Konsumsi energi adalah banyaknya energi yang dikeluarkan untuk pengiriman, penerimaan, dan paket yang di-*drop*.

$$\text{Energi} = E_0 - E_t \quad (4)$$

Keterangan :

$E_0$  = Energi awal sebelum pengiriman paket (Joule)

$E_t$  = Energi akhir setelah penerimaan paket (Joule)

## HASIL DAN ANALISA DATA

Simulasi yang dilakukan adalah membandingkan topologi *star*, *mesh* dan *half tree* berdasarkan karakteristik WSN yang menggunakan XBee Pro v1.xCx sebagai komunikasi antar node dan direncanakan akan diimplementasikan pada Sistem Pemantauan Jembatan. Skenario yang dilakukan adalah node yang telah disebar pada jembatan yang panjangnya 1 km akan mengirimkan data dengan sistem penjadwalan yang telah dibuat tetap dan node tidak akan mengirimkan data secara bersamaan.

Pada asumsi yang pertama, kesepuluh node mengirimkan paket data menuju node 0 atau *sink* masing-masing selama 6 menit. Pada topologi *star*, kesepuluh node mengirimkan paket data langsung menuju node 0. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Tabel II. Pada tabel tersebut *packet loss* yang terjadi hingga mencapai hampir 90%. Topologi *star* menghasilkan *packet loss* yang sangat besar yaitu dari 36.007 paket yang dibangkitkan, hanya 3.601 paket yang dapat diterima. Hal ini berdampak pada nilai *throughput* sehingga memiliki nilai *throughput* 0,89 kbps. Kemudian, nilai *delay end-to-end* rata-rata yang terjadi adalah 6,597 ms.

Parameter energi *end-to-end* pada topologi *star* asumsi pertama pada masing-masing node ditunjukkan pada Gambar 3. Pada gambar tersebut, node 5, node 6, node 7, node 8, node 9, dan node 10, energi *end-to-end* masing-masing node tersebut adalah nol. Hal ini disebabkan ketika node-node tersebut mengirimkan paket data secara langsung menuju node 0, karena jarak yang melebihi jangkauan XBee maka tidak paket tersebut tidak dikirimkan. Sedangkan pada node 2, node 3, dan node 4, masing-masing memiliki nilai energi *end-to-end* 13,41 Joule, 12,14 Joule dan 12,3 Joule untuk aktifitas “mendengar”. Node 1 memiliki nilai energi *end-to-end* 4,64 Joule untuk aktifitas pengiriman paket data menuju node 0. Sedangkan node 0 memiliki nilai energi *end-to-end* 12,53 Joule untuk aktifitas menerima paket data dan “mendengar”. Berdasarkan Gambar 3 didapatkan energi *end-to-end* rata-rata komunikasi adalah 5,512 Joule.

Pada topologi *mesh*, node-node akan mengirimkan paket data menuju node 0. Jika pada topologi *star* terdapat paket yang di-*drop* karena melebihi jangkauan XBee, pada topologi ini paket akan diteruskan oleh node tetangganya. Routing yang terjadi tampak pada Gambar 4.

Hasil topologi *mesh* terdapat pada Tabel III, paket yang hilang hanya 1 paket dari 36.007 paket yang telah dibangkitkan. Presentase *packet loss* senilai 0,0027% mengakibatkan nilai *throughput* yang dihasilkan 8,00 kbps. *Delay end-to-end* rata-rata yang dihasilkan adalah 23,0265 ms.

Parameter energi *end-to-end* pada topologi *mesh* asumsi pertama pada masing-masing node ditunjukkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut, masing-masing node mengalami aktifitas. Misalnya node 10 dan node 9 mengalami aktifitas mengirim paket data dan “mendengar”. Node 8, node 7, node 6, node 5, node 4, node 3, node 2, dan node 1 mengalami aktifitas mengirim dan meneruskan paket data serta “mendengar”. Sedangkan node 0 mengalami aktifitas menerima paket data dan “mendengar”.

Terlihat pada Gambar 5, masing-masing node memiliki nilai energi *end-to-end* yaitu untuk node 0 bernilai 147,56 Joule, node 1 bernilai 179,3 Joule, node 2 bernilai 266 Joule, node 3 bernilai 279,13 Joule, node 4 bernilai 346,63 Joule, node 5 bernilai 217,96 Joule, node 6 bernilai 266,13 Joule, node 7 bernilai 156,78 Joule, node 8 bernilai 185,7 Joule, node 9 bernilai 84,42 Joule dan node 10 bernilai 94 Joule. Energi *end-to-end* paling besar adalah node 4. Hal ini karena node 4 berada di tengah-tengah jaringan sehingga node 4 selain mengirimkan paket data menuju node 0 juga akan meneruskan data dari node 6, node 8 dan node 10, kemudian melakukan aktifitas “mendengar” tetangganya seperti node 1, node 2, node 3, node 5 dan node 6. Berdasarkan Gambar 5, didapatkan nilai energi *end-to-end* rata-rata sebesar 222,38 Joule.

Pada topologi seperti pada Gambar 6, sebuah node yaitu node 1 ditunjuk sebagai *coordinator*. *Coordinator* bertugas sebagai muara dari dua jalur komunikasi dan menyampaikan paket data dari node ke sink. Pada Gambar 6, ketika node 9 akan mengirimkan paket data menuju node 0, maka paket data akan diteruskan oleh node 7, node 5, node 3, node 1, kemudian diterima oleh node 0. Sedangkan jika node 10 akan mengirimkan paket data menuju node 0, maka paket data akan diteruskan oleh node 8, node 6, node 4, node 2, node 1, kemudian diterima oleh node 0. Hasil dari simulasi pengiriman paket data dengan skenario asumsi pertama menggunakan topologi half tree ditampilkan pada Tabel IV.

Berdasarkan Tabel IV, tampak bahwa terdapat 1 paket data yang hilang dari 36.007 paket yang dibangkitkan. Kehilangan 1 paket ini menyebabkan presentase *packet loss* memiliki nilai 0,0027% sehingga nilai *throughput* yang dihasilkan 8,00 kbps. Sedangkan nilai *delay end-to-end* rata-rata yang terjadi adalah 23,0273 ms.

Parameter energi *end-to-end* pada topologi *half tree* asumsi pertama pada masing-masing node ditunjukkan pada Gambar 7. Pada gambar tersebut, masing-masing node mengalami aktifitas. Misalnya, node 9 dan node 10 mengalami aktifitas mengirimkan data dan “mendengar”. Node 1, node 2, node 3, node 4, node 5, node 6, node 7, dan node 8 mengalami aktifitas mengirimkan dan meneruskan paket data, serta “mendengar”. Sedangkan node 0 mengalami aktifitas menerima paket data dan “mendengar”.

Terlihat pada Gambar 7, masing-masing node memiliki nilai energi *end-to-end* yaitu untuk node 0 bernilai 201,2 Joule, node 1 bernilai 219,52 Joule, node 2 bernilai 267,74

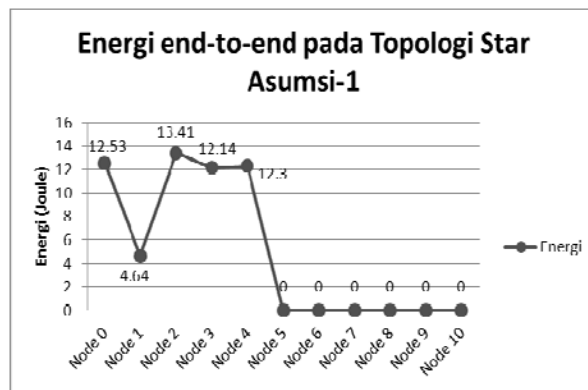
Joule, node 3 bernilai 344,53 Joule, node 4 bernilai 344,53 Joule, node 5 bernilai 142,88 Joule, node 6 bernilai 206,67 Joule, node 7 bernilai 135,86 Joule, node 8 bernilai 135,86 Joule, node 9 bernilai 67,25 Joule dan node 10 bernilai 67,25 Joule. Energi *end-to-end* paling besar adalah node 3 dan node 4. Hal ini karena node 3 dan node 4 berada di tengah-tengah jaringan sehingga node 3 dan node 4 selain mengirimkan paket data menuju node 0 juga akan meneruskan data dari node 6, node 8 dan node 10, kemudian melakukan aktifitas “mendengar” tetangganya seperti node 1, node 2, node 3, node 5 dan node 6. Berdasarkan Gambar 7, didapatkan nilai energi *end-to-end* rata-rata sebesar 219,71 Joule.

Pada asumsi yang kedua, jika terdapat sebuah kendaraan melintasi jembatan dengan kecepatan 80 km/jam, maka jembatan tersebut membutuhkan 45 detik untuk melintasi jembatan. Node-node akan mengirimkan paket data menuju sink jika koordinatnya sama dengan koordinat kendaraan. Node akan mengirimkan paket data selama 9 detik. Misalkan koordinat kendaraan sama dengan node 9 dan node 10. Maka node 9 dan node 10 akan mengirimkan paket data menuju node 0 atau *sink*.

Pada Tabel V terlihat bahwa topologi star pada asumsi-2 ini mengalami 812 paket yang hilang dari 902 paket yang dibangkitkan sehingga presentase packet loss adalah 90,02 %. Hal ini mengakibatkan nilai throughput memiliki nilai 1,60 kbps. Kemudian nilai delay *end-to-end* rata-ratanya adalah 6,75 ms.

Tabel 2. Hasil Simulasi Topologi Star Asumsi-1

Parameter	Nilai
Packet loss	32.406 paket (89,99%)
Delay <i>end-to-end</i> rata-rata	6,597 ms
Throughput	0,89 kbps
Energi <i>end-to-end</i> rata-rata	5,512 Joule



Gambar 3. Energi *end-to-end* masing-masing node pada topologi star asumsi-1

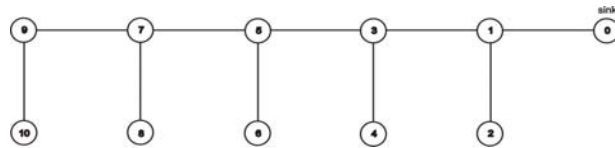


Tabel 3. Hasil Simulasi Topologi Mesh Asumsi-1

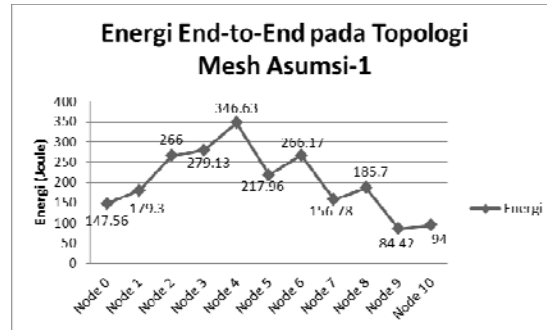
Parameter	Nilai
Packet loss	1 paket (0,0027%)
Delay end-to-end rata-rata	23,0265 ms
Throughput	8,00 kbps
Energi end-to-end rata-rata	222,38 Joule

Tabel 4. Hasil Simulasi Topologi Half Tree Asumsi-1

Parameter	Nilai
Packet loss	1 paket (0,0027%)
Delay end-to-end rata-rata	23,0273 ms
Throughput	8,00 kbps
Energi end-to-end rata-rata	219,71 Joule

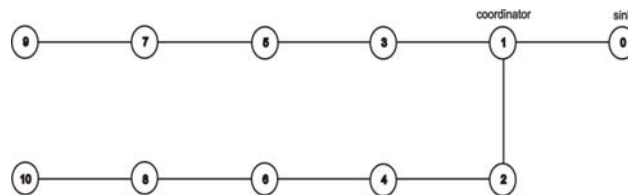


Gambar 4. Komunikasi node dengan routing static pada topologi mesh



Gambar 5. Energi end-to-end masing-masing node pada topologi Mesh asumsi-1

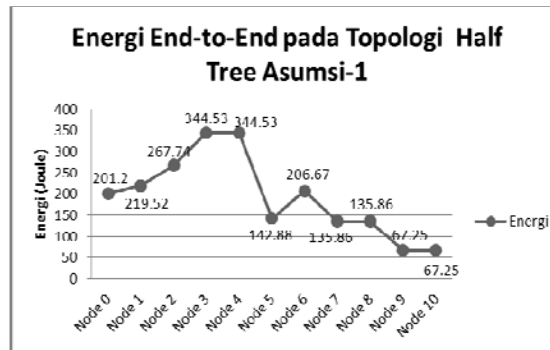
Parameter energi end-to-end pada topologi star asumsi kedua pada masing-masing node ditunjukkan pada Gambar 8. Pada gambar tersebut, node 5, node 6, node 7, node 8, node 9, dan node 10, energi end-to-end masing-masing node tersebut adalah nol. Sedangkan pada node 2, node 3, dan node 4, masing-masing memiliki nilai energi end-to-end 0,337 Joule, 0,308 Joule dan 0,308 Joule untuk aktifitas “mendengar”. Node 1 memiliki nilai energi end-to-end 0,11 Joule untuk aktifitas



Gambar 6. Topologi half tree

Tabel 5. Hasil Simulasi Topologi Star Asumsi-2

Parameter	Nilai
Packet loss	812 paket (90,02%)
Delay end-to-end rata-rata	6,75 ms
Throughput	1,60 kbps
Energi end-to-end rata-rata	0,138 Joule



Gambar 7. Energi end-to-end masing-masing node pada topologi half tree asumsi-1

Pengiriman paket data menuju node 0. Sedangkan node 0 memiliki nilai energi end-to-end 0,315 Joule untuk aktifitas menerima paket data dan “mendengar”. Berdasarkan Gambar 8 tersebut didapatkan energi end-to-end rata-rata komunikasi adalah 0,138 Joule.

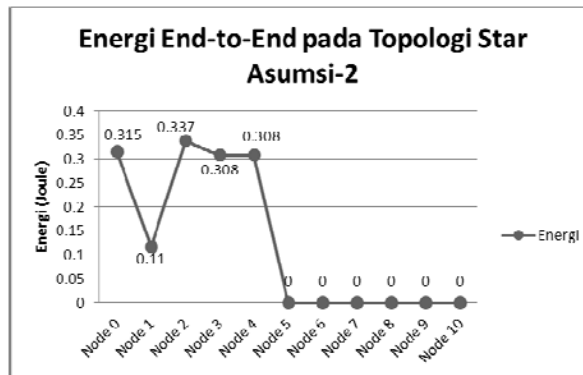
Pada topologi mesh, hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel VI. Dari tabel tersebut didapatkan presentase packet loss adalah 0,55%. Hal ini terjadi karena terdapat 5 paket yang hilang dari 902 paket yang dibangkitkan. Karena paket yang hilang hanya 5 paket, maka nilai throughput jaringan adalah 15,98 kbps. Sedangkan nilai delay end-to-end rata-rata pada topologi ini adalah 34,43 ms. Energi end-to-end pada masing-masing node pada topologi mesh ditunjukkan pada Gambar 9. Terlihat pada Gambar 9, masing-masing node memiliki nilai energi end-to-end yaitu untuk node 0 bernilai 3,78 Joule, node 1 bernilai 4,82 Joule, node 2 bernilai 6,87 Joule, node 3 bernilai 7,42 Joule, node 4 bernilai 8,96 Joule, node 5 bernilai 5,97 Joule, node 6 bernilai 7,2 Joule, node 7 bernilai 4,52 Joule, node 8 bernilai 5,29 Joule, node 9 bernilai 2,48 Joule dan node 10 bernilai 2,79 Joule. Energi end-to-end paling besar adalah node 4. Hal ini karena node 4 berada di tengah-tengah jaringan sehingga node 4 selain mengirimkan paket data menuju node 0 juga akan meneruskan data dari node 6, node 8 dan node 10, kemudian melakukan aktifitas “mendengar” tetangganya seperti node 1, node 2, node 3, node 5 dan node 6. Berdasarkan Gambar 9, didapatkan nilai energi end-to-end rata-rata sebesar 6,01 Joule.

Sedangkan untuk topologi half tree dengan asumsi kedua, hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel VII. Pada tabel tersebut terlihat bahwa terdapat paket yang hilang sebanyak 40 paket dari 902 paket yang telah dibangkitkan sehingga nilai presentase packet loss adalah

4,43 %. Hal ini mengakibatkan nilai throughput yang dihasilkan adalah 15,35 kbps. Sedangkan nilai delay end-to-end adalah 33,48 ms.

Terlihat pada Gambar 10, masing-masing node memiliki nilai energi end-to-end yaitu untuk node 0 bernilai 5,03 Joule, node 1 bernilai 5,66 Joule, node 2 bernilai 6,76 Joule, node 3 bernilai 9,15 Joule, node 4 bernilai 9,1 Joule, node 5 bernilai 6,05 Joule, node 6 bernilai 6,31 Joule, node 7 bernilai 4,77 Joule, node 8 bernilai 4,75 Joule, node 9 bernilai 2,39 Joule dan node 10 bernilai 2,39 Joule. Energi end-to-end paling besar adalah node 3 dan node 4. Hal ini karena node 3 dan node 4 berada di tengah-tengah jaringan sehingga node 3 dan node 4 selain mengirimkan paket data menuju node 0 juga akan meneruskan data dari node 6, node 8 dan node 10, kemudian melakukan aktifitas “mendengar” tetangganya seperti node 1, node 2, node 3, node 5 dan node 6. Berdasarkan Gambar 10, didapatkan nilai energi end-to-end rata-rata sebesar 6,23 Joule.

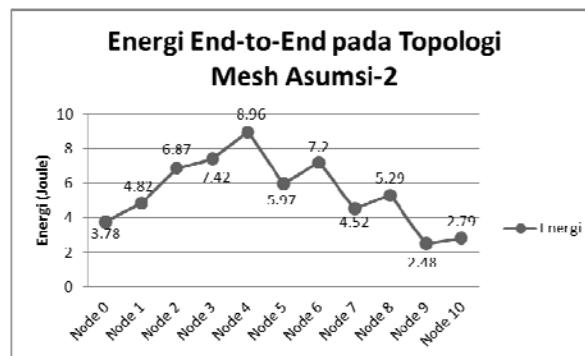
Berdasarkan parameter kinerja jaringan yang telah dijelaskan di atas, topologi mesh dan half tree dapat diimplementasikan pada Sistem SHM Jembatan sedangkan topologi star tidak dapat.



Gambar 8. Energi end-to-end masing-masing node pada topologi star asumsi-2

Tabel 5. Hasil Simulasi Topologi Mesh Asumsi-2

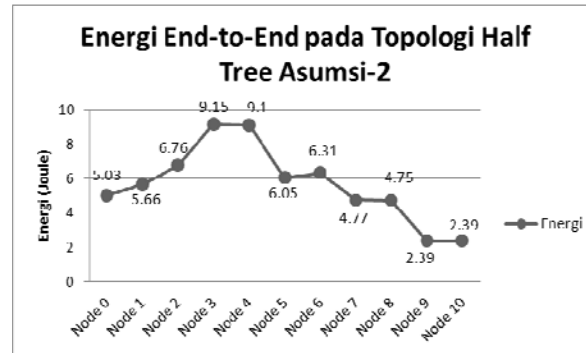
Parameter	Nilai
Packet loss	5 paket (0,55%)
Delay end-to-end rata-rata	34,43 ms
Throughput	15,98 kbps
Energi end-to-end rata-rata	6,01 Joule



Gambar 9. Energi end-to-end masing-masing node pada topologi mesh asumsi-2

Tabel 6. Hasil Simulasi Topologi Half Tree Asumsi-2

Parameter	Nilai
Packet loss	40 paket (4,43%)
Delay end-to-end rata-rata	33,48 ms
Throughput	15,35 kbps
Energi end-to-end rata-rata	6,23 Joule



Gambar 10. Energi end-to-end masing-masing node pada topologi half tree asumsi-2

Asumsi pertama adalah skenario dimana sepuluh node akan mengirimkan paket data selama 6 menit secara bergantian pada sink. Pada topologi star menghasilkan beberapa nilai dari parameter kinerja jaringan seperti packet loss, delay end-to-end rata-rata, throughput, dan energi end-to-end rata-rata masing-masing adalah 89,99%, 6,597 ms, 0,89 kbps dan 5,512 Joule. Topologi mesh memiliki nilai 0,0027%, 23,0265 ms, 8,00 kbps dan 222,38 Joule. Topologi half tree memiliki nilai 0,0027%, 23,0273 ms, 8,00 kbps dan 219,71 Joule.

Asumsi kedua adalah skenario dimana jika terdapat sebuah kendaraan melewati jembatan dari kiri ke kanan dengan kecepatan 80 km/jam sehingga sensor node – sensor node akan mengirimkan data ke sink dimulai saat koordinat kendaraan sama dengan koordinat sensor node hingga 9 detik. Pada topologi star menghasilkan beberapa nilai dari parameter kinerja jaringan seperti packet loss, delay end-to-end rata-rata, throughput, dan energi end-to-end rata-rata masing-masing adalah 90,02%, 6,75 ms, 1,60 kbps dan 0,318 Joule. Topologi mesh memiliki nilai 0,55%, 34,43 ms, 15,98 kbps dan 6,01 Joule. Topologi half tree memiliki nilai 4,43%, 33,48 ms, 15,35 kbps dan 6,23 Joule.

Berdasarkan hasil simulasi yang dijelaskan di atas, maka topologi yang dapat diterapkan pada SHM jembatan adalah topologi mesh dan half tree.

Untuk kemajuan penelitian selanjutnya, terdapat beberapa saran setelah penelitian ini dilakukan. Saran yang dapat disampaikan adalah penelitian selanjutnya dapat menggunakan karakteristik sensor-sensor yang lain seperti sensor strain gauge, sensor suhu, dan wind sensor, penelitian selanjutnya dapat menggunakan beacon mode untuk mengurangi terjadinya tabrakan paket data saat pengiriman secara bersamaan dan efisiensi energi karena

dalam penelitian ini hanya menggunakan non beacon mode, serta selanjutnya dapat menggunakan perangkat real dan dengan menguji topologi penelitian ini.

### **DAFTAR PUSTAKA**

S. Doebling, C. Farrar, and M. Prime, "A summary Review of Vibration Based Damage Identification Methods," Shock and Vibration Digest, vol. 30, pp. 91–105, 1998.

W. Dargie and C. Poellabauer, "Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice", John Wiley & Sons Ltd, 2010.

M.J. Chae, H.S. Yoo, J.Y. Kim, M.Y. Cho, "Development of a Wireless Sensor Network System for Suspension Bridge Health Monitoring", Elsevier Automation in Construction, vol.21, pp. 237-252, 2012.

[http://www.enn.com/top\\_stories/article/28124/print](http://www.enn.com/top_stories/article/28124/print), diunduh pada tanggal 11 Desember 2012.

[http://www.bbc.co.uk/indonesia/berita\\_indonesia/2012/01/120111puauditjembatan.shtml](http://www.bbc.co.uk/indonesia/berita_indonesia/2012/01/120111puauditjembatan.shtml), diunduh pada tanggal 11 Desember 2012

<http://armand10dma.blogspot.com/2011/08/fungsispesifikasi-teknologi-dan-cara.htm>, diunduh pada tanggal 11 Desember 2012.