

JARINGAN SENSOR NIRKABEL ARSITEKTUR TITIK TUNGGAL SEBAGAI WAHANA PENERAPAN SISTEM KENDALI TERSEBAR

Abdul Haris Junus Ontowirjo¹⁾, Wirawan²⁾

^{1,2)}Laboratorium Komunikasi Multimedia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus Sukolilo, Surabaya 60111

e-mail: ¹⁾aharisjo@elect-eng.its.ac.id, ²⁾wirawan@ee.its.ac.id

Abstrak

Dalam makalah ini dijabarkan model sistem kendali tersebar dengan melibatkan tundaan waktu pada titik sensor, titik aktuator, dan titik kontroler. Sumber-sumber tundaan waktu potensial dalam jaringan sensor nirkabel juga dibahas dan dijabarkan. Sebagai sistem terselip, titik sensor pada jaringan sensor nirkabel memiliki sistem operasi dan sistem komunikasi. Sistem operasi tentunya memiliki strategi penjadwalan dan paradigma pemrograman tertentu dan sistem komunikasi tentunya menerapkan protokol tertentu. Sistem operasi dan sistem komunikasi dalam jaringan sensor nirkabel dalam makalah ini ditinjau dalam kerangka sumbangannya terhadap tundaan waktu. Implementasi dirancang dalam bentuk perangkat keras dengan mempertimbangkan model dan karakteristik tundaan waktu. Arsitektur yang dipilih adalah arsitektur titik tunggal sebagai bentuk paling sederhana suatu jaringan sensor nirkabel. Arsitektur titik tunggal ini diharapkan dapat menjadi wahana bagi pengembangan strategi-strategi kendali tersebar yang menggunakan jaringan sensor nirkabel dan dapat dijadikan pijakan bagi pengembangan strategi kendali berbagai bentuk arsitektur lain.

Kata kunci: titik kontroler, titik sensor, titik aktuator, arsitektur titik tunggal, jaringan sensor nirkabel

1. PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini, perhatian pada sistem-sistem kendali tersebar meningkat. Perhatian tertuju terutama pada kinerja waktu nyata yang khas pada sistem kendali tersebar ini. Di lain pihak secara bersamaan perkembangan teknologi telah membawa kita pada era nirkabel. Teori-teori kendali tersebar yang merupakan perpaduan antara teori kendali dan teori telekomunikasi (atau tepatnya komunikasi data atau lebih spesifik lagi jaringan komputer), memungkinkan dikembangkannya suatu sistem tersebar menggunakan komunikasi nirkabel baik pada simpal maju maupun pada simpal umpan balik dan menciptakan sistem simpal tertutup nirkabel. Tujuan dari pengembangan sistem kendali tersebar nirkabel ini adalah untuk mencapai suatu sistem kendali simpal tertutup berkinerja tinggi yang mampu mengendalikan proses tak stabil menjadi stabil dan untuk mengembangkan suatu sistem yang dapat digunakan mengeksplorasi keterbatasan dan kemampuan sistem kendali nirkabel. Pendorong berkembangnya sistem kendali tersebar yang menggunakan jaringan komunikasi nirkabel adalah pengurangan pengkawatan dan kemungkinan memusatkan pengendali pada satu tempat. Terlebih lagi adanya kebutuhan untuk mengendalikan proses-proses bermobilitas tinggi seperti kendaraan tanpa awak untuk eksplorasi daerah-daerah berbahaya, pesawat terbang atau helikopter tanpa awak untuk keperluan mengintaian dan penginderaan jarak jauh (remote sensing). Dengan semua keperluan ini maka strategi pengendalian yang spesifik pada pengendalian nirkabel berkembang.

Atas dasar bidangnya, arah penelitian di bidang sistem kendali tersebar nirkabel berarah pada dua (Ploplys, *et al*, 2004). Salah satu arah penelitian adalah pengembangan protokol untuk jaringan komunikasi sementara arah lainnya adalah perancangan dan telaah pengendali jaringan. Pengembangan protokol untuk jaringan komunikasi sistem kendali tersebar nirkabel memerlukan latar belakang komunikasi digital yang dikaitkan kebutuhan sistem kendali. Sedangkan pengembangan rancangan dan telaah pengendali membutuhkan latar belakang teori kendali dengan mengaitkan aspek-aspek komunikasi dalam modelnya.

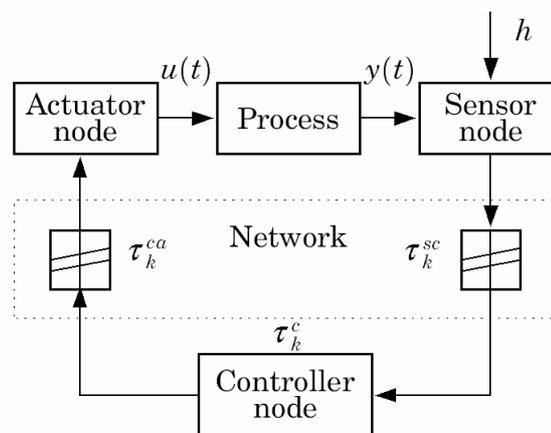
Perkembangan lain yang cukup menonjol dalam teknologi nirkabel ini adalah jaringan sensor nirkabel dan aktuator nirkabel. Penelitian di bidang ini telah mencapai taraf penggunaan tidak hanya sebagai akuisisi data tapi juga pada fungsi aktuasi sehingga memungkinkan diterapkan strategi kendali. Dengan pemikiran di atas, makalah ini menjabarkan perancangan dan implementasi wahana bagi penerapan berbagai strategi kendali pada jaringan sensor nirkabel.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Telah banyak penelitian di bidang sistem kendali tersebar atau sistem kendali jaringan dan telah banyak pula penelitian tentang jaringan sensor nirkabel. Dari itu semua, penelitian ini harus memadukan ke dua bidang ini. Walaupun telah banyak penelitian berupa implementasi sistem kendali tersebar atau sistem kendali jaringan dalam jaringan sensor nirkabel tapi beberapa aspek harus dilakukan sesuatu yang khas.

a. Sistem Kendali Tersebar

Sistem kendali tersebar tipikal dapat dimodelkan dengan Gambar 1. Titik aktuator dan titik sensor dihubungkan ke suatu jaringan komunikasi data. Titik sensor menerima data dari proses dan mengirim pesan ke titik kontroler sedangkan titik aktuator menerima perintah dari titik pengendali dan mengirim sinyal ke proses. Pengendali terhubung ke jaringan dan berkomunikasi dengan sensor dan aktuator dengan cara mengirim semacam pesan ke jaringan. Mengirim sebuah pesan ke jaringan membutuhkan waktu. Bergantung pada jenis dan kebijakan prioritas dalam jaringan, waktu transfer ini memiliki sifat berbeda. Waktu transfer dapat saja, untuk keadaan-keadaan tertentu, mendekati konstan, tapi pada banyak keadaan lain, bervariasi secara acak. Panjang tundaan waktu karena transfer ini dapat saja bergantung pada tingkat kesibukan jaringan, strategi prioritas yang diterapkan, dan gangguan elektromagnetik, (Ray, 1997). Beberapa penataan perangkat lunak dan perangkat keras dapat diterapkan menurut metoda sinkronisasi antara titik sensor, titik aktuator, dan titik kontroler. Penataan perangkat keras dan perangkat lunak di atas dapat digolongkan menjadi dua kategori. Salah satu kategori adalah bila suatu titik dipicu kejadian dan kategori lainnya adalah bila suatu titik dipicu waktu. Istilah dipicu kejadian memiliki makna bahwa suatu titik memulai aktivitas pada saat suatu kejadian tertentu terjadi, misalnya bila titik itu menerima informasi dari titik lain dalam jaringan, sedangkan istilah dipicu waktu adalah bila suatu titik memulai aktivitas pada saat yang telah ditentukan, seperti bila titik itu memulai aktivitas secara periodik. Ada tiga tundaan dalam sistem, lihat Gambar 1.



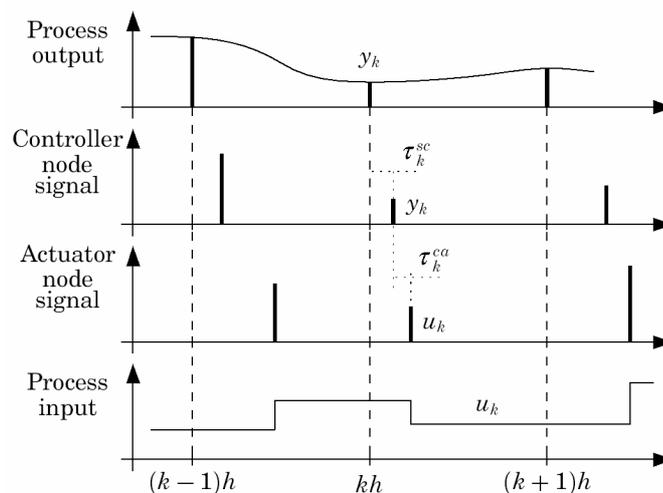
Gambar 1: Model Sistem Kendali Tersebar (Nilsson, 1998)

- tundaan komunikasi sensor dan kontroler, τ_k^{sc} .
- tundaan komputasi dalam kontroler, τ_k^c .
- tundaan komunikasi kontroler dan aktuator, τ_k^{ca} .

Subskrip k menandakan semua tundaan ini bergantung pada waktu.

Tundaan kendali, yang merupakan waktu dari saat ketika sinyal pengukuran dicuplik hingga saat sinyal hasil olahan digunakan oleh aktuator adalah penjumlahan semua tundaan ini, yaitu $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^c + \tau_k^{ca}$. Hal yang penting untuk diperhatikan dalam sistem kendali ini adalah bahwa tundaan-tundaan tersebut berubah secara acak. Hal ini membuat sistem menjadi berubah waktu (time-varying) dan semua teorema untuk telaah dan perancangan sistem-sistem tidak berubah dengan waktu (time-invariant) tidak dapat digunakan secara langsung. Salah satu cara untuk mengatasi perubahan terhadap waktu ini adalah dengan memperkenalkan penyangga yang memiliki pewaktu pada bagian masukan titik kontroler dan titik aktuator. Bila penyangga-penyangga ini dibuat cukup besar, lebih besar dari tundaan waktu terburuk (berarti nilainya tertinggi), tundaan dalam transfer data antara kedua titik menjadi deterministik (tidak acak). Cara ini diusulkan misalnya dalam (Luck dan Ray, 1990). Keberadaan penyangga dalam simpal berarti terkadang digunakan informasi masa lalu selain yang kita perlukan. Hal ini membuat penurunan kinerja (degradasi performansi) bila dibandingkan dengan penataan perangkat lunak dan perangkat keras yang didasarkan pada skema dipicu kejadian (Nilsson, 1998).

Dari perspektif kendali waktu diskrit, adalah alami mencuplik keluaran proses dengan selang pencuplikan seragam, katakanlah h . Selain itu, adalah hal yang alami untuk membuat tundaan kendali sekecil mungkin. Alasan dari itu adalah bahwa tundaan-tundaan waktu meningkatkan keteringgalan fasa, yang sering menurunkan stabilitas dan kinerja sistem. Dorongan ini membuat orang berpikir untuk menata sistem dengan titik kontroler yang dipicu kejadian dan titik aktuator yang juga dipicu kejadian. Ini berarti bahwa perhitungan sinyal kendali terjadi pada saat informasi tiba dari titik sensor dan pengiriman ke titik aktuator terjadi begitu sinyal dari aktuator tiba. Diagram waktu sistem demikian digambarkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Diagram waktu sistem kendali tersebar (Nilsson, 1996)

b. Jaringan Sensor Nirkabel

Setiap titik sensor pada jaringan sensor nirkabel merupakan suatu sistem terselip yang pada dasarnya adalah sistem komputer lengkap. Suatu sistem komputer lengkap berarti memiliki komponen-komponen satuan pengolah pusat (*CPU - central processing unit*), satuan memori (*memory unit*), dan bagian masukan keluaran (*I/O unit*). Di samping itu karena setiap titik juga merupakan satu titik komunikasi nirkabel dengan protokol tertentu. Dengan demikian setiap titik sensor dapat kita pandang sebagai sistem dua sisi, sisi komputasi, dan sisi komunikasi. Sisi komputasi diwakili oleh sistem operasi yang digunakannya, sedangkan sisi komunikasi diwakili oleh protokol yang terlibat terutama, bila mengacu pada model acuan 7 lapis OSI, lapisan kendali akses medium (*MAC Medium Access Control*).

Sistem Operasi (TinyOS)

Sistem operasi jaringan sensor nirkabel memiliki sifat-sifat khas karena dirancang untuk perangkat keras dengan konsumsi daya rendah dan ukuran fisik kecil, syarat dengan operasi paralel, hirarki kendali terbatas dan dukungan paralelisme perangkat keras yang terbatas, keberagaman rancangan dan penggunaan, serta operasi yang kebal terhadap gangguan (*robust*).

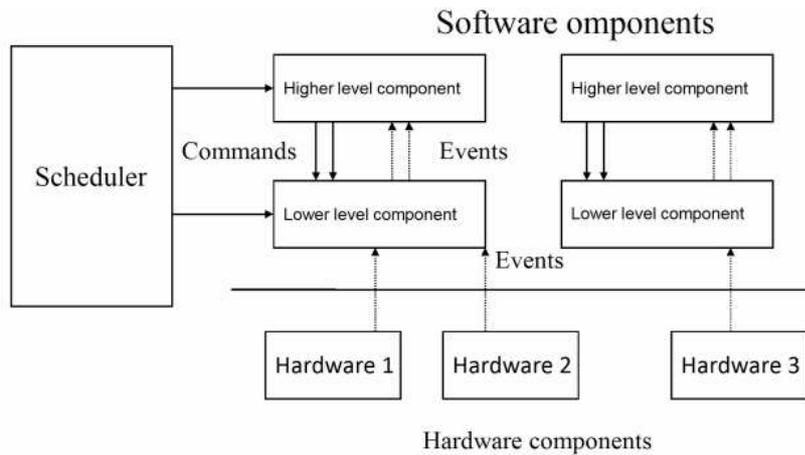
Pekerjaan utama tiap titik adalah mengalirkan informasi dari suatu tempat ke tempat lain dengan jumlah cukup dan sesedikit mungkin menerima perintah. Informasi bisa diterima secara simultan dari sensor-sensor pada suatu titik, diolah datanya, dan dikirim ke jaringan. Selain itu bisa saja data diterima dari titik-titik lain untuk diteruskan dalam *multi-hop routing*.

Berbeda dengan sistem terselip lain, di sini yang terlibat adalah kontroler berkemampuan terbatas. Pergantian antara memori dan prosesor dalam mengendalikan *system bus* berjalan lambat. Sensor dan aktuator dihubungkan dengan mikrokontroler serpihan tunggal bahkan melalui antar muka dalam bentuk yang paling dasar (*primitive*). Di lain pihak kejadian-kejadian level rendah yang terlibat besar jumlahnya. Hal ini mengakibatkan kebutuhan akan kemampuan penanganan operasi-operasi paralel yang intensif.

Setiap titik sensor dirancang untuk penggunaan tertentu dan bukanlah suatu sistem perangkat keras yang serba guna (*general purpose*). Jenis sensor dan aktuator serta semua komponen perangkat kerasnya juga sesuai dengan penggunaan tertentu. Dengan potensi penggunaannya yang luas, maka jumlah ragam jenis titik sensor pun besar. Dengan keadaan ini, adalah penting bagi suatu perangkat lunak untuk mudah dirakit dengan memilih komponen-komponen yang relevan saja.

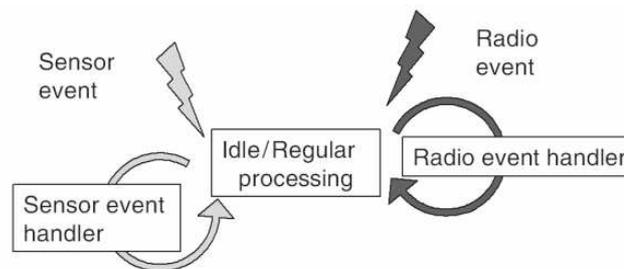
Jaringan sensor nirkabel ini mengandung titik yang amat banyak, diletakkan jauh dan sulit untuk dijangkau manusia sehingga harus beroperasi dari sebagian besar umurnya tanpa perawatan. Walaupun redundansi antar titik, untuk mengganti titik yang rusak, adalah suatu pilihan tapi harga komunikasi antar titik amatlah mahal (mengonsumsi daya yang besar) sehingga pilihan ini diabaikan. Pilihan yang paling mungkin adalah meningkatkan keandalan (reliabilitas) dan kekebalan (*robustness*) tiap titik.

TinyOS tidak menangani keserentakan (*concurrency*) dengan paralelisme pada perangkat keras dan tidak pula dengan mesin-mesin maya (*virtual machines*), tapi dengan mesin *multithreading (multithreading engine)* yang sangat efisien dan memiliki struktur penjadwalan (*scheduling*) dua tingkat (Hill, *et al*, 2000). Dengan penjadwalan ini diharapkan nilai peluang terjadi proses paralel pada tiap tingkat meningkat. Penjadwalan dua tingkat ini digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Penjadwalan 2 tingkat (Ontowirjo dan Wirawan, 2009)

Dengan struktur ini jumlah proses yang berkaitan dengan kejadian-kejadian pada tingkat perangkat keras, yang secara serta-merta menginterupsi tugas-tugas panjang, amat sedikit. Hal ini dicapai dengan apa yang disebut pemrograman berbasis kejadian (*event-based programming*) seperti terlihat pada Gambar 4.

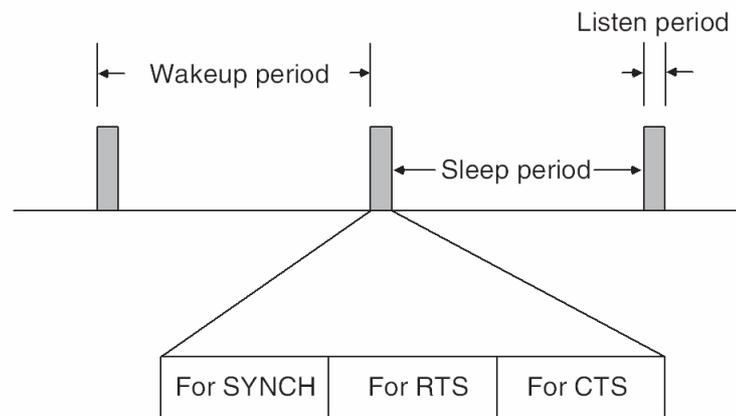


Gambar 4: Model pemrograman berbasis kejadian (Karl dan Willing, 2005)

Sistem Komunikasi (S-MAC)

Perhatian pada bagian komunikasi ditujukan ke protokol sublapisan kendali akses medium atau MAC (*Medium Access Control Protocol*) karena inilah yang mengendalikan radio. Keadaan suatu titik yang berhubungan dengan komunikasi adalah mengirim paket data, menerima paket data, diam dan mendengar (*idle/listening*), dan tidur (*sleep*). Di antara keadaan ini yang perlu diminimasi adalah keadaan diam/mendengar dan yang perlu ditingkatkan panjang waktunya adalah keadaan tidur karena keadaan ini yang paling sedikit memerlukan energi. Masalah efisiensi energi merupakan tujuan tunggal yang paling penting dalam perancangan suatu protokol kendali akses medium. Faktor-faktor potensial terkait dengan permasalahan energi ini (penyebab pemborosan energi) adalah tumbukan atau kolisi (*collision*), *overhearing*, *overhead*, dan keadaan istirahat (*idle listening*) (Ye, et al, 2004). Tumbukan menimbulkan terbuangnya energi dengan percuma untuk menerima pada titik penerima, terbuangnya energi percuma untuk mengirim pada titik pengirim dan kemungkinan untuk terbuangnya energi pada pengiriman-pengiriman kembali (*retansmission*). Tumbukan ini biasanya diatasi dengan penentuan tetap (*fix assignment*) yaitu TDMA (*Time Division Multiple Access*), atau penentuan berdasarkan permintaan (*demand assignment*) (Ye, et al, 2004). Tumbukan ini merupakan penyumbang signifikan dalam masalah tundaan waktu dan kehilangan data. Protokol tetap menetapkan batas maksimum baik waktu maupun jumlah pengiriman kembali sehingga bila ini dilewati akan terjadi kehilangan data. *Overhearing* terjadi karena medium nirkabel adalah suatu medium *broadcast*, sehingga pada pengiriman dari suatu titik ke satu titik yang lain (*unicast*), ada titik-titik yang tidak seharusnya mendengar (menerima data) tetap mendengar. Menerima data adalah salah satu proses komunikasi yang menguras energi. Pada kasus jaringan dengan kepadatan titik yang tinggi, energi yang terbuang akibat *overhearing* ini meningkat. Fenomena ini berpengaruh terhadap waktu pemrosesan di dalam setiap titik akibat titik mengerjakan pekerjaan-pekerjaan yang tidak seharusnya dikerjakan dan mengganggu proses di dalamnya bila ada proses yang sedang berlangsung. Pada pengiriman pesan atau data, suatu protokol mengemasnya dalam suatu bingkai (*frame*) atau paket yang mengandung informasi-informasi lain selain data itu sendiri untuk keperluan kendali dan identifikasi. Hal ini yang disebut *protocol overhead*. Selain menimbulkan beban bagi jaringan yang berakibat meningkatkan kebutuhan energi juga meningkatkan besarnya tundaan waktu dan besarnya nilai peluang kehilangan data akibat semakin panjangnya data dalam suatu paket.

Salah satu rancangan protokol kendali akses medium yang cukup populer, yaitu Sensor-MAC atau S-MAC [(Ye, et al, 2004), (Ye, et al, 2002)], mengatasi hal-hal di atas dengan suatu mekanisme tertentu. S-MAC menerapkan suatu skema bangun dari tidur yang periodik, yaitu, setiap titik berganti keadaan antara keadaan mendengar dengan perioda waktu tertentu (tetap) dan keadaan tidur juga dengan perioda waktu tertentu (tetap) sesuai jadwal tertentu, seperti diperagakan dalam Gambar 5.



Gambar 5: Skema bangun periodik (Karl dan Willing, 2005)

Protokol S-MAC melakukan penyesuaian jadwal-jadwal di setiap titik sehingga perioda mendengar semua titik mulai pada saat yang sama.

Perioda mendengar suatu titik, dibagi menjadi 3 fasa:

- Fasa SYNCH. Suatu titik menerima paket-paket SYNCH dari titik-titik sekitar. Tabel jadwal titik-titik sekitar tercermin dalam paket-paket ini.
- Fasa RTS. Dalam fasa ini suatu titik mendengar paket-paket RTS dari titik-titik sekitar. Dalam S-MAC, mekanisme jabat-tangan (*handshake*) terjadi melalui pertukaran paket RTS dan CTS.
- Fasa CTS. Dalam fasa ini suatu titik mengirimkan paket CTS bila paket RTS diterima pada fasa sebelumnya. Mekanisme di atas selain mengatur waktu untuk proses komputasi juga komunikasi, proses ini adalah penyumbang potensial dalam menimbulkan tundaan waktu dan peluang kehilangan data.

3. METODA PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian yang menyediakan wahana bagi penelitian-penelitian lain yang berhubungan dengan penerapan strategi kendali di wahana jaringan sensor nirkabel. Sebagaimana biasanya memulai segala sesuatu haruslah dari hal yang paling sederhana. Dalam menerapkan berbagai strategi kendali dalam wahana jaringan sensor nirkabel pun perlu dimulai dari arsitektur yang sederhana. Arsitektur jaringan sensor nirkabel yang paling sederhana adalah arsitektur titik tunggal atau arsitektur satu titik (*single node architecture*). Arsitektur ini terdiri dari satu titik sensor-aktuator.

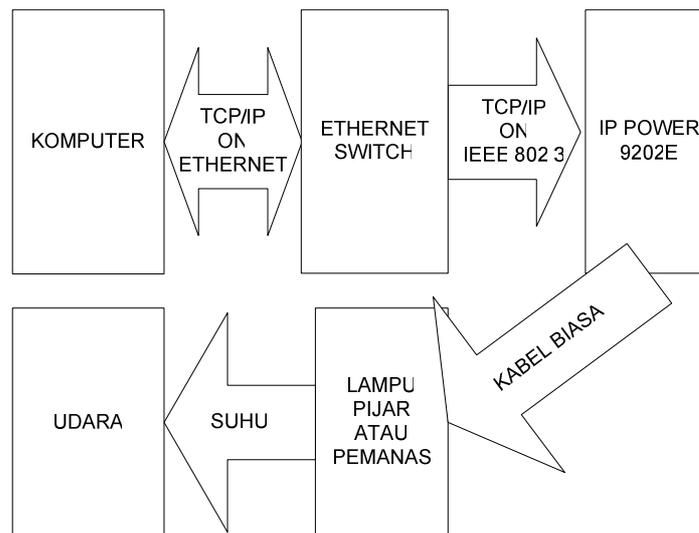
Proses penelitian mengikuti alur sederhana yang berawal dari pemeriksaan spesifikasi alat. Setelah peninjauan spesifikasi alat langsung masuk pada proses perancangan. Pada tahap ini semua kemungkinan kombinasi alat dipertimbangkan dan dicari konfigurasi yang paling baik yaitu yang paling luas penerapannya nanti dan paling luwes dalam menerima berbagai algoritma strategi kendali tersebar yang akan diterapkan. Dalam meninjau seluruh kemungkinan kombinasi alat di atas, tetap dipertahankan bahwa tujuan perancangan adalah arsitektur titik tunggal. Setelah proses pertimbangan semua konfigurasi yang mungkin barulah ditentukan satu konfigurasi tertentu dan dilakukan pengujian berbagai fungsi alat dan pengukuran berbagai variabel dan membandingkannya dengan spesifikasi. Pengujian ini bertujuan memastikan ketersediaan wahana bagi penerapan berbagai strategi kendali dengan batas-batas kemampuan perangkat keras tertentu.



Gambar 6: Proses perancangan

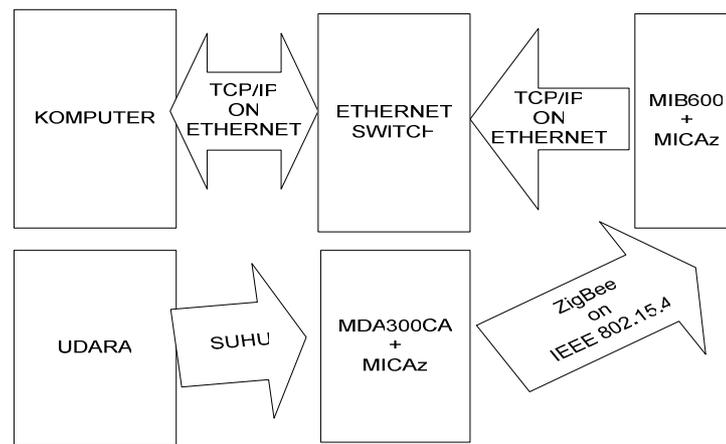
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dalam hal ini adalah tersedianya wahana bagi penerapan algoritma kendali tersebar pada jaringan sensor nirkabel arsitektur titik tunggal (*single node architecture*). Titik kontrol diimplementasikan dengan komputer yang menjalankan algoritma kendali tersebar. Implementasi algoritma tersebut bisa dalam berbagai perangkat lunak seperti bahasa C, C++, Java, atau yang populer di dunia riset dan akademik yaitu Mathworks MATLAB. Komunikasi komputer ke *switch* menggunakan lapisan fisik ethernet atau IEEE 802.3 yang di atasnya dilapisi oleh protokol TCP/IP karena komunikasi yang dikembangkan menggunakan protokol UDP (*User Datagram Protocol*). Dari *switch* diteruskan ke IP Power 9202 dan tetap menggunakan lapisan fisik IEEE 802.3 dan lapisan atasnya adalah TCP/IP. Modul IP Power 9202 ini terdiri dari modul IP 9200 dan modul 3-2 9202. Modul IP 9200 merupakan *network module* yang langsung terhubung dengan *switch* menggunakan konektor RJ45. Sedangkan modul 3-2 9202 merupakan *output module* yang pada dasarnya adalah sekumpulan rele. Modul ini terhubung dengan modul IP 9200 dengan protokol RS232 dan ke pemanas atau lampu menggunakan sepasang kabel.



Gambar 7: Hubungan kontroler dan aktuator

Pada titik sensor digunakan papan akuisisi data (*Sensor Data Acquisition Board*): MDA300CA dari Crossbow yang ditumpangkan pada wahana berupa Mote yang pada dasarnya adalah wahana radio dan prosesor (*Processor and Radio Platform*): MICAz MPR2400CA. Pada titik sensor nirkabel MDA300CA terdapat sensor kelembaban, dan temperatur, dan aktuator berupa rele. Wahana MICAz MPR2400CA merupakan sistem terselip yang menggunakan mikrokontroler Atmel ATmega 128L dan bekerja pada 2.4 GHz ISM Band. Untuk komunikasi digunakan protokol IEEE 802.15.4 pada lapisan fisik dan ZigBee pada lapisan di atasnya. Papan sensor dan akuisisi data MDA300CA yang berada di atas wahana MICAz MPR2400CA ini mengirimkan data melalui medium nirkabel ke data sink MIB600 yang harus berada di wahana yang sama yaitu MICAz MPR2400CA tadi. Kedua titik ini berkomunikasi menggunakan protokol IEEE 802.15.4 pada lapisan fisik dan ZigBee pada lapisan di atasnya.



Gambar 8: Hubungan sensor dan kontroler

5. KESIMPULAN

Telah dipaparkan beberapa masalah pengendalian pada saat sistem kendali diterapkan pada lintasan komunikasi terutama yang nirkabel. Fenomena tundaan waktu dan kehilangan data amat mempengaruhi strategi pengendalian dan rancangan pengendali yang di dalamnya implementasi algoritma-algoritma kendali. Ada dua hal yang mempengaruhi tundaan waktu dan kehilangan data adalah sistem operasi yang diterapkan pada tiap titik sensor nirkabel dan protokol terutama sublapisan kendali akses medium. Strategi pengendalian dan kendala-kendala yang dihadapi akibat tundaan waktu dan kehilangan data yang ditimbulkan oleh sistem operasi dan sistem komunikasi diimplementasikan pada wahana yang menjadikan komputer sebagai titik kontroler dan jaringan sensor nirkabel sebagai sensornya. Karena untuk keperluan aktuasi diterapkan daya yang tinggi lebih dari spesifikasi aktuatur yang terdapat dalam titik sensor nirkabel maka digunakan aktuatur jaringan lain yang memadai. Dengan menggunakan komputer sebagai titik kontroler maka perangkat keras yang dirancang di atas dapat dijadikan wahana pengembangan algoritma-algoritma sebagai implemetasi strategi-strategi kendali tersebar yang menggunakan jaringan sensor nirkabel.



Gambar 9: Mote, prosesor dan wahana radio, Micaz



Gambar 10: Papan akuisisi data MDA300CA

6. DAFTAR PUSTAKA

- Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D. E., Pister, K. S. J., 2000, "System Architecture Directions for Networked Sensors", *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*.
- Karl, H. Willig, A., 2005, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Luck, R., Ray, A., 1990, "An observer-based compensator for distributed delays", *Automatica*, **26:5**, 1990, pp. 903-908.
- Nilsson, J., 1996, *Analysis and Design of Real-Time Systems with Random Delays*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Nilsson, J., 1998, *Real-Time Control Systems with Delays*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

- Ontowirjo, A. H. J., Wirawan, 2009, "Telaah Latensi dan Kehilangan Data pada Jaringan Sensor Nirkabel", *Prosiding SENTIA'09, 12-Maret 2009*, pp. J6-J10.
- Ploplys, N. J., Kawka, P. A., Alleyne, A. G., 2004, "Closed-Loop Control over Wireless Networks", *IEEE Control Magazine*, Vol. 24, Juni, 2004, pp. 58-71.
- Ray, A., 1997, "Performance evaluation of medium access control protocols for distributed digital avionics", *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **109**, December, 1997, pp. 370–377.
- Ye, W., Heidermann, J., Estrin, D., 2002, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks". *Proceeding of INFOCOM 2002*. Juni 2002, IEEE Press, New York.
- Ye, W., Heidermann, J., Estrin, D., 2004, "Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks". *IEEE/ACM Transactions on Networking*.