

WAHANA SISTEM KENDALI TERSEBAR DALAM JARINGAN SENSOR NIRKABEL ARSITEKTUR TITIK TUNGGAL

Abdul Haris Junus Ontowirjo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara
E-mail: aharisjo@gmail.com

Abstract. In this paper described a simple model of control system include with time delay according to communication network. Time delay in wireless sensor network also explained. As an embedded system, each sensor point in wireless sensor network have operating system with scheduling strategy and certain programming paradigm also communication system with protocol. This two aspects had been analyzed according its contribution to time delay. Hardware implementation was designed and related with time delay characteristic and model. The hardware design using single point architecture could be possibly as starting point for developing distributed control strategies in wireless sensor network.

Keywords: wireless sensor network, time delay, distributed control, sensor point, actuator point

Akhir-akhir ini, tingkat perhatian pada sistem-sistem kendali tersebar dan kinerja waktu nyata yang melekat padanya naik cukup tinggi (Lian, et al, 2001, 2002). Pada saat yang sama perkembangan teknologi telah membawa kita pada era nirkabel. Teori-teori kendali tersebar yang merupakan perpaduan antara teori kendali dan teori telekomunikasi, memungkinkan dikembangkan 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 sebagai wahana eksplorasi 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 *plant-plant* atau proses-proses dengan mobilitas tinggi seperti kendaraan tanpa awak untuk eksplorasi daerah-daerah berbahaya, pesawat terbang atau helikopter tanpa awak

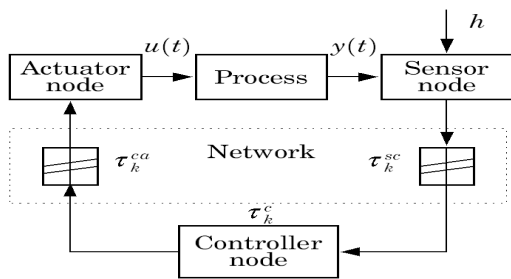
untuk keperluan mengintai dan penginderaan jarak jauh (remote sensing). Dengan semua keperluan ini maka strategi pengendalian yang spesifik pada pengendalian nirkabel ini berkembang.

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

SISTEM KENDALI TERSEBAR

Model tipikal suatu sistem kendali tersebar dapat digambarkan oleh Gambar 1. Titik aktuator dan titik sensor dihubungkan ke suatu jaringan komunikasi. Titik sensor menerima data dari proses atau plant dan mengirim pesan ke titik pengendali atau 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. Sesuai dengan jaringan dan penjadwalan dalam sistem, 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, 1987). Beberapa penataan perangkat lunak dan perangkat keras dapat diterapkan menurut metode sinkronisasi antara titik sensor, titik aktuator, dan titik kontroler. Penataan perangkat keras dan perangkat lunak di atas dapat digolongkan menjadi dua kategori, yaitu bila suatu titik dipicu kejadian dan lainnya dipicu waktu. Istilah dipicu kejadian bermakna bahwa suatu titik memulai aktivitas pada saat suatu kejadian tertentu terjadi, misalnya bila titik itu menerima informasi dari titik lain dalam jaringan, sedangkan dipicu waktu adalah bila suatu titik memulai aktivitas pada saat yang telah ditentukan, seperti bila titik itu memulai aktivitas secara periodik.



Gambar 1. Model tipikal sistem kendali tersebar.

Ada tiga tundaan dalam sistem (Gambar 1).

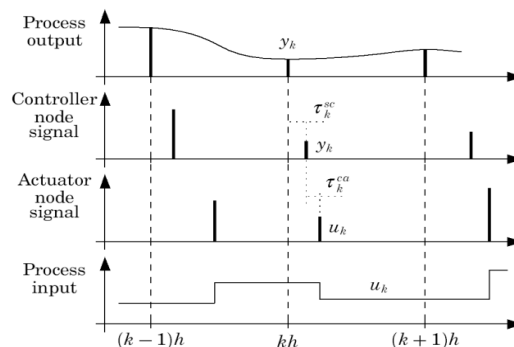
- tundaan komunikasi sensor dan kontroler, τ_k^{sc} .
- tundaan komputasi dalam kontroler, τ_k^c .
- tundaan komunikasi kontroler dan aktuator, τ_k^{ca} .

Subskrip k menandakan kemungkinan tundaan yang tergantung 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, 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 ketertinggalan 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 tipikal sistem kendali tersebar (Nilsson, 1996)

Jaringan Sensor Nirkabel

Hal-hal penting untuk diperhatikan dalam mengimplementasikan sistem kendali pada jaringan sensor nirkabel adalah sistem operasi yang digunakan pada tiap titik sensor dan sistem komunikasi yang diterapkan oleh sensor dalam mengirimkan pesan atau data ke jaringan. Dalam implementasi ini digunakan sistem operasi TinyOS dan protokol yang digunakan adalah IEEE 802.15.4 dan ZigBee dengan salah satu jenis protokol akses medium (MAC) yaitu S-MAC.

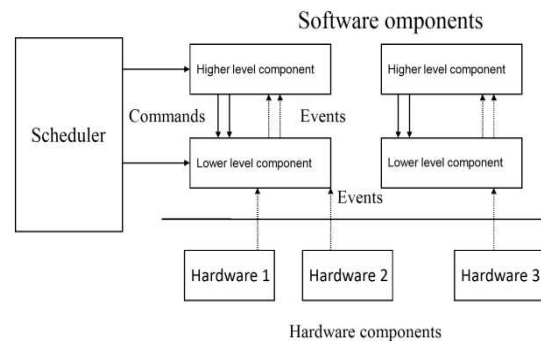
Sistem Operasi (TinyOS)

Sistem operasi untuk keperluan jaringan sensor nirkabel dirancang untuk perangkat keras pengonsumsi daya rendah dan berukuran fisik kecil, padat dengan operasi paralel, hirarki kendali terbatas dan dukungan paralelisme perangkat keras yang terbatas, keberagaman rancangan dan penggunaan, serta operasi yang kebal terhadap gangguan (*robust*).

Modus utama operasi 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 dilibatkan adalah kontroler dengan kemampuan terbatas. Pergantian antara memori dan prosesor dalam mengalirkan data pada *system bus* terjadi lebih lambat. Sensor 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 melakukan 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 serta semua komponen perangkat kerasnya juga tertentu sesuai dengan penggunaannya. 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 dari jangkauan dan sulit untuk

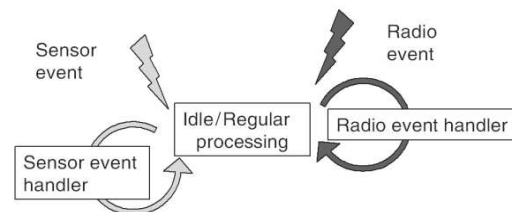
dijangkau manusia sehingga harus mampu beroperasi dari sebagian besar umurnya tanpa perawatan (*maintenance*). Walaupun redundansi antar titik, untuk mengganti titik yang rusak, adalah suatu pilihan tapi harga komunikasi antar titik amatlah mahal (mengonsumsi daya yang besar) sehingga pilihan ini diabaikan.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

TinyOS tidak menangani *concurrency* dengan paralelisme pada tingkat 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 [8]. Dengan penjadwalan ini diharapkan nilai peluang terjadi proses pada tiap tingkat yang dapat tertangani secara paralel meningkat. Penjadwalan dua tingkat ini digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Penjadwalan dua tingkat (Ontowirjo dan Wirawan, 2009a)

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 (Nilsson, 1996)

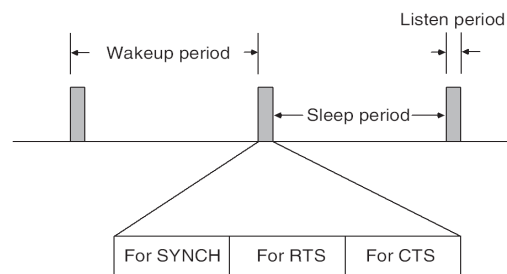
Sistem Komunikasi (S-MAC)

Tundaan waktu pada sisi komunikasi didominasi oleh mekanisme protokol sublapisan kendali akses medium atau MAC (*Medium Access Protocol*) karena sublapisan inilah yang mengendalikan radio. Keadaan suatu titik yang berhubungan dengan komunikasi adalah mengirim paket data, menerima paket data, diam sambil 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. Efisiensi energi merupakan tujuan tunggal yang paling penting dalam perancangan suatu protokol kendali akses medium, MAC. Faktor-faktor potensial penyebab pemborosan energi adalah tumbukan atau kolisi (*collision*), *overhearing*, *overhead*, dan keadaan istirahat (*idle listening*).

Tumbukan menimbulkan terbuangnya energi menerima dan mengirim dan kemungkinan untuk terbuangnya energi pada pengiriman-pengiriman kembali (*retransmission*). Tumbukan dapat diatasi dengan penentuan tetap (*fix assignment*) yaitu dengan TDMA (*Time Division Multiple Access*), atau penentuan berdasarkan permintaan (*demand assignment*) (Ye, et al, 2004). Tumbukan ini merupakan penyumbang signifikan dalam masalah tundaan waktu. Protokol akan selalu 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. Energi akan terkuras pada proses menerima data. 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. Dalam mengirimkan data, suatu protokol mengemasnya dalam suatu bingkai (*frame*) atau paket yang mengandung informasi-informasi 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 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, 2002, 2004), 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 periode waktu tertentu (tetap) dan keadaan tidur juga dengan periode waktu tertentu (tetap) mengikuti suatu jadwal, seperti diperagakan dalam Gambar 1. Protokol S-MAC berusaha untuk menyelaraskan jadwal-jadwal di setiap titik sehingga periode mendengar semua titik mulai pada saat yang bersamaan. Mekanisme penyelarasan ini merupakan sumber tundaan waktu di samping sumber potensial pada periode mendengar yang memiliki 3 fase:



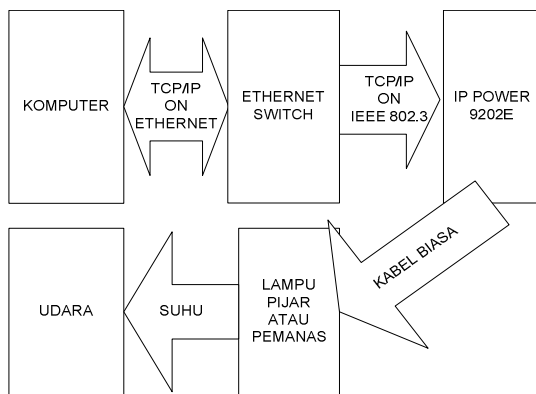
Gambar 5. Skema waktu angun (dari tidur) secara periodik (Dunkels, et al, 2004)

- Fase SYNCH. Suatu titik menerima paket-paket SYNCH dari titik-titik sekitar. Tabel jadwal titik-titik sekitar tercermin dalam paket-paket ini.
- Fase RTS. Dalam fase 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.
- Fase CTS. Dalam fase ini suatu titik mengirimkan paket CTS bila paket RTS diterima pada fasa sebelumnya.

IMPLEMENTASI

Tujuan implementasi dalam hal ini adalah untuk menyediakan wahana bagi penerapan algoritma kendali tersebar pada jaringan sensor nirkabel arsitektur titik tunggal (*single node architecture*). Titik kontroler diimplementasikan dengan komputer yang menjalankan algoritma kendali tersebar. Implementasi algoritma tersebut bisa dalam berbagai perangkat lunak seperti

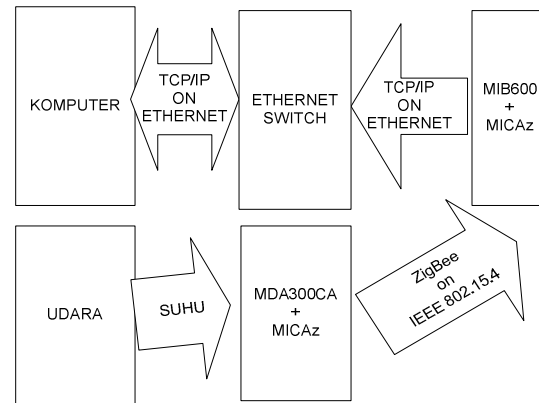
bahasa C, C++, Java, atau yang populer di dunia riset dan akademik yaitu MATLAB. Komputer ke switch menggunakan lapisan fisik ethernet atau IEEE 802.3 yang di atasnya dilapisi oleh protokol TCP/IP karena komunikasi yang dikembangkan menggunakan protokol UDP (*User Datagram Protocol*). Dari switch diteruskan ke IP Power 9202 [13] 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 6. Koneksi kontroler ke aktuator (Ontowirjo dan Wirawan, 2009b)

Untuk titik sensor digunakan Sensor Data Acquisition Board: MDA300CA dari Crossbow yang ditumpangkan pada wahana *Mote: 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 sejenis yaitu MICAz MPR2400CA tadi. Kedua titik ini berkomunikasi menggunakan protokol IEEE 802.15.4 pada lapisan fisik dan ZigBee pada lapisan di atasnya.



Gambar 7. Koneksi sensor ke kontroler (Ontowirjo dan Wirawan, 2009b)

PENUTUP

Di atas telah dipaparkan beberapa masalah pengendalian bila 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 aktuator yang terdapat dalam titik sensor nirkabel maka digunakan aktuator jaringan lain yang memadai.

Dengan menggunakan komputer sebagai titik kontroler maka perangkat keras yang dirancang di atas dapat dijadikan wahana pengembangan algoritma-algoritma sebagai implemmentasi strategi-strategi kendali tersebar yang menggunakan jaringan sensor nirkabel.

DAFTAR RUJUKAN

- Lian, F., Moyne, J. and Tilbury, D., Performance Evaluation of Control Networks, *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, pp. 66-83.
- Lian, F., Moyne, J. and Tilbury, D., Network Design Consideration for Distributed Control Systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, pp. 297-307.
- Ploplys, N. J., Kawka, P. A., Alleyne, A. G., Closed-Loop Control over Wireless Networks, *IEEE Control Magazine*, Vol. 24, 2004, pp. 58-71.
- Ray, A., Performance evaluation of medium access control protocols for distributed digital avionics, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **109**, December 1987, pp. 370-377.
- Luck, R., Ray, A., An observer-based compensator for distributed delays, *Automatica*, **26:5**, 1990, pp. 903-908.
- Nilsson, J., *Real-Time Control Systems with Delays*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, 1998.
- Nilsson, J., *Analysis and Design of Real-Time Systems with Random Delays*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, 1996.
- Hill, J., R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. E. Culler, K. S. J. Pister, System Architecture Directions for Networked Sensors, *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Cambridge, MA, 2000, 93-104.
- Ontowirjo, A. H. J., Wirawan, Telaah Latensi dan Kehilangan Data pada Jaringan Sensor Nirkabel, *Prosiding SINTIA'09, 12-Maret 2009*, pp. J6-J10.
- Dunkels, A., J. Alonso, T. Voigt, Making TCP/IP Viable for Wireless Sensor Networks, *Proceeding of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, Berlin, Jerman, 2004.
- Ye, W., Heidermann, J., Estrin, D., Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004.
- Ye, W., Heidermann, J., Estrin, D., An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proceeding of INFOCOM 2002*, IEEE Press, New York, 2002.
- Aviosys Inc., (2005), *IP Power 9202 Internet Power Controller User Manual*.
- Ontowirjo, A. H. J., Wirawan, Jaringan Sensor Nirkabel Arsitektur Titik Tunggal Sebagai Wahana Penerapan Sistem Kendali Tersebar, *Prosiding SEMNASIF Buku 1*, ISSN 1979-2328, UPN Veteran, Jogjakarta, 23 Mei 2009, hal. C-1 s.d. C-8.
- Anonim, MTS/MDA Sensor Board Users Manual, Crossbow Technology Inc., 2007.
- Anonim, MPR/MIB Users Manual, Crossbow Technology, Inc., 2007.