Implementasi Networked Control System dalam Pengendalian Kecepatan Motor DC melalui Jaringan Komunikasi

Asep Najmurrokhman¹, Pranoto Hidayat Rusmin², Bambang Riyanto², Arief Syaichu Rohman², Hendrawan², dan Zulhariansyah²

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi

²Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung

asepnajmu@yahoo.com, pranotohr@yahoo.com.sg, briyanto@lskk.ee.itb.ac.id, arief@stei.itb.ac.id,

hend@stei.itb.ac.id, zulhariansyah@gmail.com

Abstrak—*Networked control systems* (NCS) adalah sistem kendali yang melibatkan jaringan komunikasi sebagai bagian dari lingkaran kendali. Makalah ini menguraikan tentang perancangan dan implementasi prototipe NCS berupa pengendalian kecepatan motor DC melalui jaringan publik. Dalam penelitian ini, sebuah motor DC dirancang harus mampu mengikuti setpoint yang dikirim melalui jaringan komunikasi. Sebuah pengendali tipe integral yang ditempatkan terpisah dengan plantnya dirancang agar motor DC memiliki kemampuan *setpoint tracking* tersebut. Konfigurasi eksperimen terdiri atas motor DC buatan Quanser, Akuisisi data menggunakan produk National Instruments (NI) yaitu seri DAQ PCI-6221 dan SCB-68, serta perangkat lunak LabVIEW sebagai antarmuka perangkat keras dan jaringan komunikasi. Hasil pengujian menunjukkan kemampuan *setpoint tracking* diperoleh melalui pengaturan nilai penguatan integral dari pengendalinya.

Kata Kunci—LabVIEW, motor DC, *networked control systems*, pengendali tipe integral.

I. PENDAHULUAN

Lebih dari satu dekade, perkembangan teknologi komputasi dan komunikasi maju dengan pesat.

Sebagai akibat dari perkembangan tersebut, implementasi sistem kendali akhir-akhir ini diarahkan menuju sistem kendali melalui jaringan komunikasi. Sistem kendali yang melibatkan jaringan komunikasi sebagai bagian dari lingkaran kendali disebut sebagai *networked control systems* (NCS) [1]. Penggunaan jaringan komunikasi menawarkan keuntungan yang cukup signifikan dalam hal keandalan, penggunaan sumber daya, pemeliharaan, diagnosa sistem apabila terjadi kesalahan, dan sebagainya [2]. Aplikasi NCS dapat ditemukan dalam kendaraan yang menerapkan kendali otomatis, robotika, pesawat udara nirawak (*unmanned aerial vehicle*), jaringan sensor nirkabel, dan sebagainya [3]. Disamping keuntungan yang ditawarkan, ada beberapa parameter yang muncul dalam jaringan komunikasi seperti waktu tunda

transmisi dan kemungkinan hilangnya data saat transmisi yang bisa menyebabkan penurunan kinerja sistem dan bahkan bisa menyebabkan ketidakstabilan [2]. Heemels, dkk. menyimpulkan beberapa parameter jaringan yang harus dipertimbangkan meliputi waktu tunda transmisi data yang bervariasi, adanya kemungkinan data hilang (yang disebut *packet dropout*) di tengah jalan akibat ketidakhandalan jaringan, adanya *error* kuantisasi disebabkan keterbatasan panjang kata (*finite word length*), interval pencacahan yang berubah-ubah secara acak, dan penggunaan bersama jaringan oleh beberapa komponen (*multi nodes*) [4].

Secara skematik, sebuah NCS diberikan dalam gambar 1. Dalam gambar tersebut, sebuah objek (yang disebut *plant*) dikendalikan oleh pengendali melalui jaringan komunikasi yang digunakan bersama-sama dengan pengguna lainnya. Keberadaan pengguna lain dalam kanal komunikasi memungkinkan volume data yang ditransmisikan sangat padat, sehingga terjadi waktu tunda transmisi data dari pengendali ke *plant* atau sebaliknya.

Gambar 1. Skematik NCS

Kondisi lain yang mungkin terjadi adalah hilangnya paket data (*packet dropout*) karena ketidakhandalan jaringan atau akibat penumpukan data yang melebihi kapasitasnya (*buffer overflow*). Dengan demikian, perancangan dan implementasi NCS harus mempertimbangkan parameter jaringan tersebut.

Berbagai metode telah dikembangkan oleh para peneliti dalam hal pemodelan, analisis stabilitas, dan

perancangan pengendali untuk NCS yang mempertimbangkan keberadaan parameter jaringan komunikasi. Karena penelitian dalam bidang NCS masih tergolong baru, hasil-hasil yang dilaporkan dalam literatur masih mempertimbangkan beberapa parameter jaringan di atas, sementara parameter jaringan lainnya diabaikan. Beberapa peneliti melibatkan efek waktu tunda transmisi, kehilangan paket data, dan kuantisasi dalam kinerja NCS kemudian merancang pengendali yang mampu mengatasi parameter tersebut [5,6,7,8]. Sementara itu, peneliti lain menguraikan NCS dengan parameter *packet dropout* dan waktu tunda transmisi [9,10]. Peneliti lainnya melibatkan faktor kehilangan data dalam pemodelan NCS, kemudian menurunkan karakterisasi eksak dalam sintesis pengendali [11,12,13,14]. Makalah lain membahas tentang efek kuantisasi dalam NCS kemudian mengembangkan sebuah pengendali yang mampu menangani efek tersebut [15].

Makalah ini menguraikan tentang perancangan dan implementasi prototipe NCS berupa pengendalian motor DC melalui jaringan komunikasi. Tujuan pengendaliannya berupa kemampuan *setpoint tracking* dari motor DC. Nilai *setpoint* dikirim melalui jaringan komunikasi. Sebuah pengendali yang ditempatkan terpisah dengan motor DC dirancang agar menghasilkan tujuan pengendalian tersebut. Pengendali tipe integral yang dirancang mampu menangani parameter jaringan seperti waktu tunda transmisi dan kemungkinan hilangnya data (*packet dropout*). Nilai *setpoint* dan pengendali direalisasikan menggunakan fasilitas yang dimiliki oleh perangkat lunak LabVIEW.

II. ARSITEKTUR NCS

Arsitektur NCS yang digunakan dalam eksperimen diperlihatkan pada gambar 2. Dalam diagram blok tersebut, sebuah kit motor DC buatan Quanser yang sudah dilengkapi dengan sensor kecepatan dan perangkat ADC serta DAC diletakkan di suatu tempat yang terpisah dengan pengendalinya. Komunikasi data antara motor DC sebagai *plant* dan pengendali berlangsung melalui jaringan komunikasi.

Gambar 2. Diagram blok eksperimen NCS

Skema eksperimennya diperlihatkan pada gambar 3. Bagian pengendali dan *setpoint* direalisasikan dengan fasilitas yang dimiliki oleh perangkat lunak LabVIEW yang juga digunakan di sisi *plant* untuk mengamati proses pengendalian yang dilakukan.

Gambar 3. Skema eksperimen NCS

Motor DC yang digunakan dalam eksperimen adalah kit motor DC buatan Quanser yang sudah dilengkapi dengan sensor kecepatan dan posisinya seperti terlihat pada gambar 4.

Gambar 4. Motor DC buatan Quanser

Sementara itu, perangkat akuisisi datanya menggunakan perangkat buatan National Instruments (NI) yaitu DAQ PCI-6221 dan konektor input-output SCB-68. Kartu DAQ PCI-6221 memiliki komponen ADC (*analog to digital converter*), DAC (*digital to analog converter*), masukan serta keluaran digital, *internal clock*, *multiplexer*, dan *timer-counter*. Kartu DAQ PCI-6221 dihubungkan pada slot PCI pada *mainboard* komputer. DAQ PCI-6221 tidak bisa digunakan langsung sebagai *interface plant*, diperlukan modul-modul lain yang dirangkai pada satu sasis. Semua data yang berasal dari modul-modul tersebut kemudian dikirim ke kartu DAQ PCI-6221 melalui kabel data. Kartu akuisisi data tersebut menyediakan banyak fitur seperti enam belas masukan analog, dua keluaran analog, 24 baris digital I/O, dan dua *counter* dan *timer*. Kartu ini juga menggunakan resolusi 16 bit yang mempunyai tingkat akurasi sebesar 70 μ V. Kecepatan pencacahan (*sampling*) perangkat ini sebesar 250 kilo-sampel/detik yang akan memberikan sinyal yang memadai untuk pengambilan sampel analog. Gambar 5 memperlihatkan bentuk dari kartu akuisisi data DAQ PCI-6221.

Gambar 5. DAQ PCI-6221

Sementara itu, SCB-68 adalah blok konektor I/O dengan 68 terminal untuk mempermudah sambungan sinyal ke perangkat DAQ PCI-6221. SCB-68 memiliki area *breadboard* untuk rangkaian tambahan dan juga memiliki soket untuk saling bertukar komponen listrik. Rangkaian dan soket ini memungkinkan untuk melakukan pemfilteran RC, pendeteksian arus sebesar 4 sampai 20 mA, pendeteksian termokopel terbuka, dan redaman tegangan. Rangkaian terbuka ini juga memungkinkan pengkondisian sinyal untuk dapat dengan mudah ditambahkan ke sinyal input analog dan ke keluaran dari kartu data akuisisi.

Gambar 6. SCB-68

Gambar 6 memperlihatkan bentuk dari SCB-68 yang digunakan dalam eksperimen untuk menghubungkan perangkat komputer dengan akuisisi datanya dengan plant motor DC.

Jaringan komunikasi yang digunakan dalam eksperimen ini menggunakan jaringan lokal di Laboratorium Sistem Kendali dan Komputer (LSKK) STEI ITB dan jaringan yang lebih besar yang berada di ITB. Topologi jaringan di LSJK diberikan dalam gambar 7. *Plant* (motor DC dan sensor) diletakkan di alamat IP 167.205.66.122. Dalam eksperimen, uji coba dilakukan melalui dua skenario, yaitu menggunakan jaringan kecil dan jaringan besar. Skenario jaringan kecil dilaksanakan dengan menempatkan pengendali pada alamat IP 167.205.66.18 yang masih berada di jaringan lokal LSJK. Sementara skenario jaringan besar dijalankan dengan menempatkan pengendali dan pemberi *setpoint* di alamat IP 167.205.112.14 yang berada di luar jaringan LSJK tetapi masih berada di jaringan komputer ITB dengan jumlah *hop router* sebanyak 30.

Gambar 7. Topologi jaringan lokal LSJK STEI ITB

III. PEMODELAN MOTOR DC DAN PERANCANGAN PENGENDALI

Bagian ini menguraikan tentang pemodelan motor DC dan perancangan pengendali tipe integral untuk menghasilkan tujuan pengendalian berupa kemampuan motor DC tersebut dalam *setpoint tracking*. Dalam eksperimen, nilai *setpoint* dikirim dari jarak jauh melalui jaringan komunikasi berupa kecepatan yang harus dicapai oleh motor DC tersebut. Pengendali tipe integral dibangun agar diperoleh kemampuan *setpoint tracking* dengan cara mengatur nilai penguatan integralnya. Pengendali tersebut juga ditempatkan secara terpisah dengan *plant* sehingga menerima dan mengirimkan data melalui jaringan komunikasi.

3.1 Pemodelan Motor DC

Motor DC produk Quanser yang digunakan dalam eksperimen NCS ini adalah salah satu motor DC standar dengan menggunakan pengaturan arus jangkar. Model rangkaian motor DC tersebut diberikan dalam gambar 8.

Gambar 8. Model rangkaian Motor DC

Persamaan yang berlaku dalam rangkaian tersebut berbentuk

$$V_m = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + k_m \omega_m \quad (1)$$

sedangkan di bagian output berlaku persamaan

$$J_{eq} \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_m = k_T I_m \quad (2)$$

Dengan mengabaikan nilai L_m dan B akan diperoleh fungsi transfer sistem orde satu untuk memodelkan motor DC tersebut yang berbentuk

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{T_m s + 1} \quad (3)$$

dengan $K = \frac{1}{k_m}$ dan $T_m = \frac{J_{eq} R_m}{k_T k_m}$. Karena tidak semua parameter yang diperlukan untuk menurunkan model

matematis tersedia dalam lembar datanya, maka model matematis motor DC yang dinyatakan dalam persamaan (3) diperoleh melalui serangkaian pengujian. Dari hasil pengujian diperoleh pemodelan fungsi transfer motor DC tersebut berbentuk

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{18,93}{0,0901s + 1} \quad (4)$$

3.2 Perancangan Pengendali

Dalam eksperimen ini, pengendali yang dirancang menggunakan tipe integral dan direalisasikan dengan perangkat lunak LabVIEW seperti diperlihatkan pada gambar 9. Dalam gambar tersebut juga diberikan fasilitas pemberian nilai *setpoint*nya.

Gambar 9. Blok pengendali dan *setpoint*

Fungsi transfer pengendali tipe integral yang diberikan dalam blok Pengendali pada gambar 2 berbentuk

$$G_c(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

Dengan demikian, desain pengendali berkaitan dengan penentuan nilai K_i yang memenuhi tujuan pengendaliannya. Dengan adanya parameter jaringan, komunikasi data melalui jaringan mendapatkan efek dari parameter jaringan tersebut. Dengan mengasumsikan bahwa waktu tunda transmisi adalah parameter jaringan yang cukup dominan, model sistem lingkaran tertutup dari pengendalian kecepatan motor DC tersebut dapat dinyatakan dalam diagram blok Simulink pada gambar 10.

Gambar 10. Sistem lingkaran tertutup dengan efek waktu tunda transmisi

Blok PID Controller dalam gambar 10 menyatakan pengendali yang dalam eksperimen ini diambil tipe integralnya seperti bentuk persamaan (2). Salahsatu pendekatan yang digunakan untuk menyatakan fungsi rasional dari bentuk waktu tunda adalah dengan aproksimasi Pade orde satu [16] dalam bentuk berikut

$$D = e^{-T_D s} \approx \frac{2 - T_D s}{2 + T_D s} \quad (5)$$

Dengan mengambil nilai waktu tunda transmisi sebesar

10 ms, fungsi lingkaran tertutup dari sistem yang dirancang berbentuk

$$G(s) = \frac{1893K_i(4 - 0,0001s^2)}{0,003s^3 + (0,4004 + 0,00189K_i)s^2 + (4 - 0,757K_i)s + 75,72K_i} \quad (6)$$

Dengan metode Routh Hurwitz, nilai K_i yang memberikan kondisi kestabilan bagi sistem lingkaran tertutupnya berada di antara rentang $0 < K_i < 5,2858$.

IV. HASIL EKSPERIMEN DAN DISKUSI

Dalam eksperimen ini dilakukan dua skenario pengujian sistem, yaitu pengujian di jaringan kecil dan di jaringan yang lebih besar untuk melihat efek parameter jaringan berupa waktu tunda dan kemungkinan *packet dropout*.

4.1 Pengujian Sistem di Jaringan Kecil

Plant motor DC dan pengendalinya diletakkan dalam satu subnet jaringan. Alamat IP *plant* terletak di 167.205.66.122, sedangkan alamat IP pengendali berada di 167.205.66.18. Waktu tunda transmisi yang terjadi selama komunikasi data di dalam *subnet* ini maksimum 1 ms. Hasil pengujian sistem dengan memvariasikan nilai K_i ditampilkan pada gambar 11-15.

Gambar 11. Respon sistem untuk $K_i = 0,146$

Gambar 12. Respon sistem untuk $K_i = 1$

Gambar 13. Respon sistem untuk $K_i = 1,9$

Gambar 14. Respon sistem untuk $K_i = 2,5$

Gambar 15. Respon sistem untuk $K_i = 3,5$

4.2 Pengujian Sistem di Jaringan Besar

Sistem kendali direalisasikan pada jaringan yang lebih besar dari sebelumnya. Motor DC ditempatkan pada alamat IP 167.205.66.122, sedangkan pengendali dan pembangkit nilai *setpoint* ditempatkan di alamat IP 167.205.112.14. Waktu tunda transmisi yang terjadi antara pengendali dan *plant* juga lebih besar jika dibandingkan dengan sistem dalam satu subnet yang nilainya berkisar antara 1 ms sampai 10 ms. Untuk jalur komunikasi yang dilewati beserta waktu tunda transmisinya diperlihatkan pada gambar 16.

```
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Rie>ping 167.205.66.122

Pinging 167.205.66.122 with 32 bytes of data:
Reply from 167.205.66.122: bytes=32 time=2ms TTL=59
Reply from 167.205.66.122: bytes=32 time=1ms TTL=59
Reply from 167.205.66.122: bytes=32 time=1ms TTL=59
Reply from 167.205.66.122: bytes=32 time=1ms TTL=59

Ping statistics for 167.205.66.122:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 2ms, Average = 1ms

C:\Users\Rie>tracert 167.205.66.122

Tracing route to lskk-122.ee.itb.ac.id [167.205.66.122]
over a maximum of 30 hops:
  0  <1 ms    <1 ms    <1 ms  cadangan-112-1.itb.ac.id [167.205.112.1]
  1  <1 ms    <1 ms    <1 ms  gtw.arc.itb.ac.id [167.205.3.1]
  2  <1 ms    <1 ms    <1 ms  R13-WOC-P40-Cat6-Ulan.ITB.ac.id [167.205.23.3]
  3  <1 ms    <1 ms    <1 ms  Labtek0111-Cat6-GEO-1.ITB.ac.id [167.205.62.2]
  4  <1 ms    <1 ms    <1 ms  lskk-ee-router.itb.ac.id [167.205.30.110]
  5  <1 ms    <1 ms    <1 ms  lskk-122.ee.itb.ac.id [167.205.66.122]

Trace complete.
```

Gambar 16. Hasil *ping* dan *tracer* saat eksperimen

Dengan memvariasikan nilai K_i yang digunakan, diperoleh hasil-hasil seperti diperlihatkan pada gambar 17-21.

Gambar 17. Respon sistem untuk $K_i = 0,146$

Gambar 18. Respon sistem untuk $K_i = 1$

Gambar 19. Respon sistem untuk $K_i = 1,9$

Gambar 20. Respon sistem untuk $K_i = 2,5$

Gambar 21. Respon sistem untuk $K_i = 3,5$

Dari hasil pengujian terlihat bahwa kemampuan *setpoint tracking* berhasil dipenuhi oleh sistem yang direalisasikan dengan menggunakan pengendali tipe integral. Untuk nilai K_i yang sama, respon waktu dari *plant* motor DC yang dikendalikan melalui jaringan lokal relatif lebih baik dalam hal pemenuhan kriteria desainnya, yaitu nilai *maximum overshoot* dan waktu menetap yang lebih kecil. Hal ini disebabkan waktu tunda transmisi di jaringan lebih besar relatif lebih tinggi dibandingkan waktu tunda di jaringan lokal. Dari hasil pengujian juga terlihat bahwa semakin besar nilai K_i menghasilkan respon kurang teredam yang diperlihatkan dengan adanya *overshoot*. Dari hasil analisis terhadap model matematikanya, nilai K_i ini dibatasi sekitar 5,2858 agar kestabilan sistemnya masih dijamin.

V. KESIMPULAN

Dalam makalah telah diuraikan implementasi *networked control system* (NCS) berupa pengendalian kecepatan motor DC melalui jaringan komunikasi. Tujuan pengendalian berupa kemampuan *setpoint tracking* dengan kriteria respon waktu yang ditentukan dapat dipenuhi melalui perancangan pengendali tipe integral. Eksperimen yang dilakukan dengan dua skenario, yaitu melalui jaringan lokal dan jaringan yang lebih besar menunjukkan bahwa parameter jaringan seperti waktu tunda transmisi dan kemungkinan hilangnya paket data (*packet dropout*) selama transmisi memberikan pengaruh dalam hal pemenuhan tujuan pengendaliannya. Eksplorasi lebih lanjut difokuskan kepada pemodelan dan implementasi dari sistem ini dengan melibatkan parameter jaringan serta

pertimbangan ketidakpastian dalam pemodelan sistem tersebut. Pemodelannya menggunakan *Markovian jump system* yang mengakomodasi sifat stokastik dari parameter jaringan kemudian mendesain pengendali dengan menggunakan kriteria kinerja H_∞ atau disipatif seperti dihasilkan dalam [17,18].

REFERENSI

- [1] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi & Y. Xu, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems", *Proc. of The IEEE*, vol. 95, no. 1, January 2007, pp.138-162.
- [2] W. Zhang, M.S. Branicky & S.M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, 2001, pp. 84-99.
- [3] D.H. Varsakelis & W.S. Levine, *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, Birkhauser, Boston, 2005.
- [4] Heemels, W. P. M. H., et al., "Networked Control Systems with Communication Constraints: Tradeoffs between Transmission Intervals, Delays and Performance", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 55, no. 8, August 2010, pp. 1781 -1796.
- [5] F. Rasool, S.K. Nguang & M. Krug, "Robust H_∞ output feedback control of networked control systems with multiple quantizers", *Proc. of IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications*, 21-23 June 2011, pp. 1541-1546.
- [6] P. Shi, R. Yang & H. Gao, "State Feedback Control for Networked Systems with Mixed Delays Subject to Quantization and Dropout Compensation", *Proc. of Chinese Control and Decision Conference*, 23-25 May 2011, pp. 295-299.
- [7] H. Gao, T. Chen & J. Lam, "A New Delay System Approach to Network-based Control", *Automatica* Vol. 44, No. 1, January 2008, pp. 39-52.
- [8] J. Lam, H. Gao, H., C. Wang, "Stability Analysis for Continuous Systems with Two Additive Time Varying Delay Components", *Systems Control Letters*, Vol. 56, No. 1, January 2007, pp. 16 – 24.
- [9] Y.L. Wang, W.T. Liu, X.L. Zhu, Z. Du, "A Survey of Networked Control Systems with Delay and Packet Dropout", *Proc. of Chinese Control and Decision Conference*, 23-25 May 2011, pp. 2342-2346.
- [10] M.Y. Zhao, H.P. Liu, Z.J. Li, D.H. Sun, "Fault Tolerant Control for Networked Control Systems with Packet dropout and Time Delay", *International Journal of Automation and Computing*, vol. 8, no. 2, May 2011, pp.244-253.
- [11] D. Ma, G.M. Dimirovski, J. Zhao, "Hybrid state feedback controller design of networked switched control systems with packet dropout", *Proc. of American Control Conference*, June 30 – July 2, 2010, pp.1368-1373
- [12] S. Hirche, C.C. Chen, M. Buss, "Performance Oriented Control Over Networks: Switching Controllers and Switched Time Delay", *Asian Journal of Control* Vol. 10, No. 1, January 2008, pp. 24-33
- [13] H. Ishii, " H_∞ control with limited communication and message losses", *Systems & Control Letters* (57) 2008, pp. 322-331.
- [14] S. Aberkane, J.C Ponsart, D. Sauter, "Output-Feedback H_2/H_∞ Control of A Class of Networked Fault Tolerant Control Systems", *Asian Journal of Control* Vol. 10, No. 1, January 2008, pp. 34-44
- [15] D. Nesic, D. Liberzon, "A Unified Framework for Design and Analysis of Networked and Quantized Control Systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 54, no. 4, April 2009, pp. 732-747.
- [16] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 2002, p. 383.
- [17] A. Najmurokhman, B. Riyanto, A.S. Rochman, Hendrawan, "Pengendali H_∞ untuk Networked Control Systems dengan Parameter Packet Dropout", Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS), Politeknik Negeri Bandung, 17 November 2011.
- [18] A. Najmurokhman, B. Riyanto, A.S. Rochman, Hendrawan, "Dissipative Controller Design for Networked Control Systems via Markovian Jump System Approach", dikirim ke *ITB Journal of Engineering Science*, 2012.