

Sistem Pengendalian Web Tension Menggunakan Kontroler Robust PID

Totok R. Biyanto

Jurusan Teknik Fisika - FTI – ITS Surabaya

E-mail: trb@ep.its.ac.id

ABSTRAK

Sistem mekanik rol *winder* terdiri dari dua rol yang mempunyai fungsi yang berlainan, yaitu rol *rewinder* yang berfungsi sebagai penarik kertas dan rol *unwinder* berfungsi sebagai penggulur kertas. Pada saat proses *coating* berlangsung tekanan permukaan kertas antara rol *winder* dan *lead roll* dijaga kondisinya agar tidak terjadi perubahan *tension* yang dapat menyebabkan permukaan kertas terlalu kencang atau terlalu kendur. Tegangan permukaan kertas yang terlalu kendur dapat menyebabkan variasi ketebalan gulungan akhir proses *coating* tidak seragam, sedangkan jika terlalu kencang kertas akan putus sehingga proses *coating* dapat terhenti. Pengendalian tegangan permukaan kertas ini biasa disebut *web tension control*. Pengendali yang dipakai dalam pengendalian ini adalah pengendali PID yang sudah lazim digunakan di industri karena kehandalan dan kemudahannya. Namun performansi pada unit *winder* mensyaratkan pengendalian yang *smooth*, respon relatif cepat dan *steady state error* yang sesuai, sehingga perlu dipilih *tuning* yang paling tepat untuk aplikasi ini dengan memperhatikan *settling time open loop* dan frekuensi natural yang diinginkan dari lembar kertas. Salah satu *tuning* yang tepat untuk diaplikasikan adalah *tuning robust PID* yang mempunyai performansi secara kuantitas (ditunjukkan dari besar *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang kecil) dan secara kualitas (maksimum *overshoot* yang kecil, *settling time* yang kecil dan *error steady state* yang kecil pula).

Kata kunci: *Web tension control, unit winder, robust PID.*

ABSTRACT

Roll winder system consist of rewinder roll and unwinder roll. Paper tension at coating process must be maintained at proper tension. If the tension is too low, it will make the paper roll too loose and in another hand if the tension is too tight, it could cause web paper break. PID controller is the common controller because of high reliability and easy to use and easy to maintain. Winder control system required smooth response, fast response and error steady state free. So, PID controller must tune well. One of tuning method is PID robust tuning. PID robust tuning has Integral Time Absolute Error (ITAE), maximum overshoot, settling time and error steady state low relatively.

Keywords: *Web tension control, winder unit, robust PID.*

PENDAHULUAN

Permulaan pengembangan model matematis untuk dinamika *web* dapat dilihat pada [1,2,3,4], dan dikembangkan menjadi pengendalian *web* oleh [5] serta direview oleh [6,7].

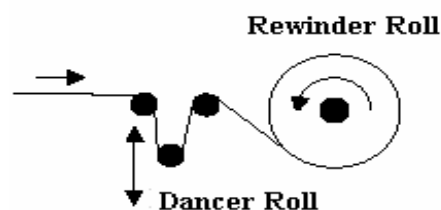
Tinjauan dan perbandingan skema pengendalian *web winder* dapat dilihat pada [9]. Perbandingan teknik pengendalian dengan memberikan tekanan pada pemilihan motor dan *drive* telah dipaparkan pada [8]. Pemodelan dan pengendalian *web* dibahas [5,7,9]. Dinamika *web* telah dimodelkan dan dibandingkan dengan hasil eksperimental

oleh [10]. Perbandingan *tension control* menggunakan transduser gaya dan *roll dancer feedback* dilakukan dan didiskusikan [11]. Akibat perubahan kecepatan *web* juga telah dipelajari oleh [12]

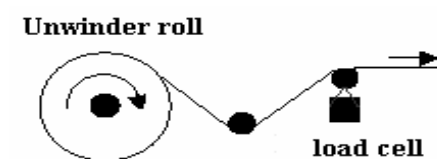
Performansi sistem juga tergantung pada teknik dan setting pengendali yang diterapkan. Pada pengendalian yang telah dilakukan diatas digunakan pengendali PID yang memang telah terbukti handal di lapangan. Beberapa penelitian tentang pengendalian ini telah dilakukan untuk memenuhi permasalahan di lapangan yaitu untuk mendapatkan performansi yang *robust*, dimana performansi pada unit *winder* mensyaratkan

pengendalian yang *smooth*, respon relatif cepat dan *error steady state* yang sesuai, sehingga perlu dipilih *tuning* yang paling tepat. *Tuning robust* menggunakan PID-IMC telah dilakukan oleh [13], dengan cara mencari harga λ dengan *trial* dan *error*, dan menghasilkan performansi yang lebih baik dibandingkan PID konvensional. Pada makalah ini akan dicoba alternatif *tuning robust* PID dengan tujuan memperbaiki performansi sistem pengendalian *web tension* pada proses *coating* kertas di sebuah perusahaan kertas di Surabaya.

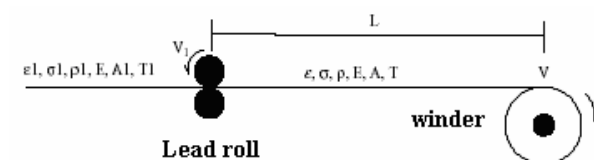
Pada mesin *coating* secara umum terdapat dua rol yaitu rol *rewinder* yang berfungsi sebagai penarik kertas dan rol *unwinder* sebagai pengulur kertas. Gambar rol *rewinder* dapat ditunjukkan pada Gambar 1 dan rol *unwinder* pada Gambar 2, konstruksi *plant* secara umum untuk menyederhanakan kedua unit *winder* seperti Gambar 3



Gambar 1. Rewinder dengan Dancer Roll



Gambar 2. Unwinder dengan Load Cell



Gambar 3. Penyederhanaan Winder

Pemodelan dinamika kertas pada makalah ini mengasumsikan:

- 1) Percepatan v_1 pada *lead roll* konstan / tetap;
- 2) Lebar melintang kertas adalah seragam
- 3) *Strain* / $\epsilon \ll 1$;
- 4) Kertas elastis;
- 5) Kepadatan kertas tidak ada perubahan yaitu $\rho = \rho_0 + 1$

Pengendali Robust PID

Sistem dikatakan *robust* atau kokoh jika pada saat sistem tersebut berada pada satu titik, maka sistem tersebut akan mempunyai kemampuan bertahan terhadap gangguan sehingga kembali pada

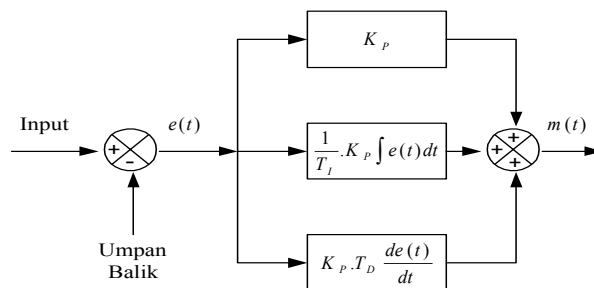
titik semula. Suatu sistem pengendali dikatakan *robust* jika:

1. Sensitifitasnya rendah

Salah satu syarat dari sistem yang *robust* adalah mempunyai sensitifitas rendah, dalam hal ini sistem tidak mudah mengalami suatu perubahan atau osilasi jika diberi suatu gangguan. Sistem akan tetap bisa mempertahankan performansinya.

2. Mempunyai kestabilan pada range variasi parameter

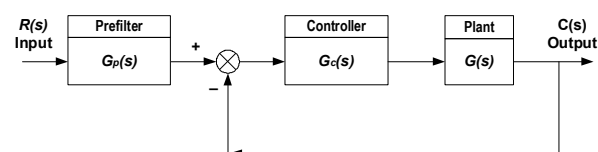
Sistem yang *robust* akan bisa mempertahankan kestabilan bila diberikan pada variasi parameter tertentu, misalnya pemberian inputan yang berbeda pada sistem yang diharapkan sistem mengalami suatu perubahan proses menjadi proses baru dan sistem masih dalam range kestabilan. Pengendali akan tetap menjaga kesetabilannya dan dapat memperkecil indeks performansi.



Gambar 4. Diagram Blok Pengendali PID

Memilih tiga koefisien pengendali PID (K_p , K_i , K_d) agar diperoleh pengendalian yang *robust* biasanya dengan metode *trial and error*. Seperti pada *robust* IMC (Internal Model Control) dengan mencoba-coba harga λ yang mampu memberikan performansi paling baik. Diagram blok sistem pengendali PID pada Gambar 4.

Perancangan pengendali *robust* PID tidak memerlukan metode *trial dan error* dalam menentukan parameter PID. Performansi sistem pengendalian menjadi tujuan dengan indikator performansi ITAE (*Integrated Time Absolute Error*) dengan memilih frekuensi natural (ω_n) sesuai karakteristik proses (*settling time*) dan koefisien *damping ratio* (ξ) yang diinginkan. Diagram blok sistem pengendali *robust* PID ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Sistem Pengendali Robust PID [9]

Pada kriteria ITAE, unsur waktu masuk ke dalam faktor integrasi. Sehingga disebut *integrated time absolute error*. Error pada permulaan akan mempunyai nilai ITAE kecil dan akan membesar dengan pertambahan waktu. Koefisien optimum ITAE seperti pada Tabel 1 untuk *input step* dan dalam persamaan matematik dinyatakan sebagai berikut :

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e| t dt \quad (1)$$

Tabel 1. Tabel Koefisien Indeks Performansi ITAE untuk Input Step [14]

$s + \omega_n$
$s^2 + 1.4\omega_n + \omega_n$
$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3$
$s^4 + 2.1\omega_n s^3 + 3.4\omega_n^2 s^2 + 2.7\omega_n^3 s + \omega_n^4$
$s^5 + 2.8\omega_n s^4 + 5.0\omega_n^2 s^3 + 5.5\omega_n^3 s^2 + 3.4\omega_n^4 s + \omega_n^5$
$s^6 + 3.25\omega_n s^5 + 6.60\omega_n^2 s^4 + 8.60\omega_n^3 s^3 + 7.45\omega_n^4 s^2 + 3.95\omega_n^5 s + \omega_n^6$

Koefisien tersebut untuk memperkecil indeks performansi ITAE pada pemberian *input step*, dan secara umum analog dengan fungsi transfer dari *loop* tertutup:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \quad (2)$$

Penentuan tiga parameter PID untuk memperkecil indeks performansi ITAE, sesuai prosedur perancangan sebagai berikut:

- Memilih ω_n dari sistem *loop* tertutup dengan *settling time* yang spesifik.
Frekuensi natural (ω_n) dari *loop* tertutup diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (3)$$

- Menentukan tiga koefisien PID dengan menggunakan persamaan optimum seperti pada Tabel 1 dan ω_n yang diperoleh diatas untuk mendapatkan $G_c(s)$.
- Menentukan Prefilter $G_p(s)$ sesuai dengan persamaan (2, 4,5)

$$T_I(s) = \frac{G_c(s).G(s)}{1 + G_c(s).G(s)} \quad (4)$$

$$T(s) = G_p(s).T_I(s) = \frac{G_p(s).G_c(s).G(s)}{1 + G_c(s).G(s)} \quad (5)$$

METODE PENGENDALIAN

Sistem yang Dikendalikan

Dinamika sistem pada unit *rewinder* akan dimodelkan berupa *single input* dan *single output*

yang mana torsi motor sebagai *manipulated variable (input)* dan *tension* sebagai *process variable (output)*. Sedangkan parameter yang digunakan dalam pemodelan adalah:

D = Diameter roll *winder* = 1.056 m

GR = Gear Ratio = 3

E = Modulus Elastisitas Young pada kertas = 1719.10^6 N/m²

A = Luas melintang kertas = $1.72 \cdot 10^{-3}$ m²

J = Total Inersia pada motor = 144.967 kgm²

L = Panjang antara lear roll dan rol *winder* = 5 m

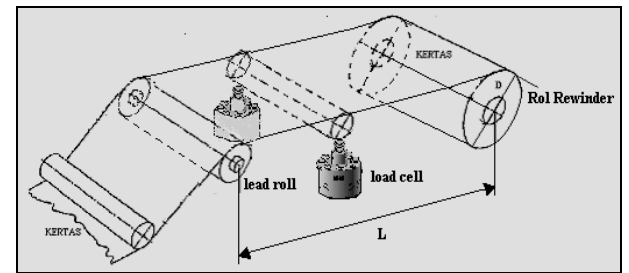
C = Modulus redaman kertas = 5 N sec/m²

B = Koefisien gesek pada motor penggerak = $2,25 \cdot 10^{-3}$ N m/rad/sec

V₁ = Kecepatan kertas pada *lead roll* = 152 m/sec

Data-data diatas dimasukan ke dalam persamaan 6 sebagai fungsi alih untuk unit *rewinder*, sehingga didapatkan:

$$G_m(s) = \frac{T}{\tau} = \frac{(2.088.10^{-6}s + 717.922)}{s^2 + 31.98875s + 173.535237} \quad (6)$$



Gambar 6. Plant Rol Winder

Menentukan ω_n dari Sistem Loop Tertutup dari Settling Time yang Spesifik

Untuk mendapatkan (ω_n) dapat ditentukan dari *settling time* (T_s) *loop* tertutup dengan *gain* pengendali dan *gain* prefilter sama dengan 1 ($G_c(s) = 1$ dan $G_p(s) = 1$).

$$H_m(s) = \frac{(2.088.10^{-6}s + 717.922)}{s^2 + 31.98875s + 918.457}$$

Pada hasil simulasi diperoleh *settling time* sebesar 0.3 detik. Dalam perancangan ini digunakan koefisien *damping ratio* sebesar 0.6 ($\zeta = 0.6$) karena akan memberikan redaman yang cukup bagi sistem dan respon yang cepat, sehingga dengan menggunakan persamaan (3) diperoleh $\omega_n = 22.22$.

Pemodelan Dinamik Kertas

Pemodelan dinamik dari kertas adalah sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}(\rho AL) = \rho_1 A_1 V_1 - \rho A V \quad (7)$$

$$\sigma = E\varepsilon + C \frac{d\varepsilon}{dt}, \sigma = \frac{T}{A} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_u}{L_u} \rho AL = \rho_u A_u L_u \quad (9)$$

Persamaan 1 adalah neraca massa untuk lebar kertas antara *lead roll* dan *rol winder*, pada persamaan bagian kiri menyatakan sebuah perubahan keseluruhan lembar kertas antara *lead roll* dan *rol winder* dan sebelah kanan menunjukkan necara material yang masuk ke *lead roll* dan material yang digulung pada *rol winder*.

Persamaan 8 adalah hukum *elastisitas* dan persamaan untuk menentukan *stress*/ketegangan sedangkan persamaan 9 menyatakan tentang *strain*/regangan dan kontinuitas massa.

Persamaan (8-9) menentukan karakteristik dinamika torsi di daerah *winder* dan dengan menggunakan asumsi-asumsi diatas, hubungan-hubungan ini dapat disederhanakan dalam satu persamaan sebagai berikut:

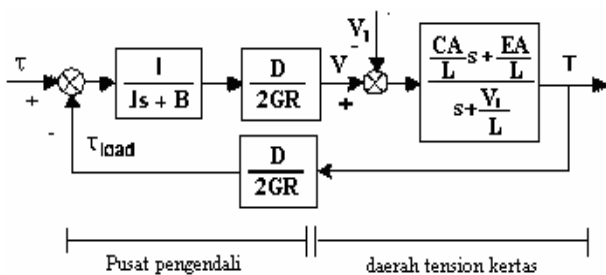
$$L \frac{dT}{dt} = EA(V - V_1) + T_1 V_1 - TV + CA \frac{d}{dt}(V - V_1) \quad (10)$$

Persamaan (10) cukup mencerminkan dinamika yang dominan dari daerah *winder* untuk disimulasikan serta dianalisa. Bagian yang dimanipulasi meliputi *motor*, *gearbox*, dan *rol winder*. Dengan menggunakan hukum *Newton* kedua persamaan *winder* adalah:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau - \tau_{load} - B\omega \quad (11)$$

Dari persamaan (10) dan (11), blok diagram yang dilinierisasikan pada Gambar 6. Fungsi transfer orde kedua dalam domain-s mulai torsi motor sampai tensi lembar kertas didapatkan sebagai berikut:

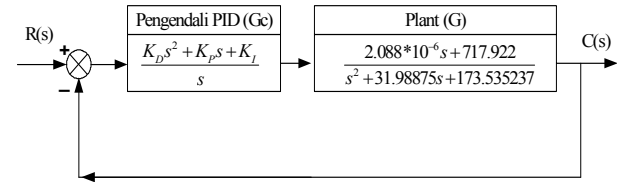
$$\frac{T}{\tau} = \frac{\frac{D}{2GR} \frac{EA}{JL} \left(\frac{C}{E}s + 1 \right)}{s^2 + \left(\frac{B}{J} + \frac{V_1}{L} + \frac{D^2}{4GR^2} \frac{CA}{JL} \right) s + \frac{B}{J} \frac{V_1}{L} + \frac{D^2}{4GR^2} \frac{EA}{JL}} \quad (12)$$



Gambar 7. Diagram Blok Penyederhanaan Daerah Tension Kertas

Menentukan Tiga Parameter PID Menggunakan Metode ITAE

Untuk menentukan harga K_p , K_i dan K_d digunakan koefisien indeks performansi ITAE untuk *input step*. Kemudian dengan memasukkan harga ω_n akan didapat harga K_p , K_i dan K_d .



Gambar 8. Diagram Blok Sistem Pengendalian Web Tention

Fungsi transfer dari diagram blok diatas adalah (persamaan 4):

$$T_l(s) = \frac{G_c(s).G(s)}{1 + G_c(s)..G(s)}.$$

Dengan memasukkan setiap fungsi transfer diatas, maka $T_l(s)$ adalah:

$$T_l(s) = \frac{2.1 * 10^{-6} K_d s^3 + (2.1 * 10^{-6} K_p + 717.9 K_d) s^2}{(2.1 * 10^{-6} K_p + 1) s^3 + (2.1 * 10^{-6} K_p + 717.9 K_d + 31.99) s^2 + (2.1 * 10^{-6} K_i + 717.9 K_p) s + 717.9 K_i} + \frac{717.9 K_i}{(2.1 * 10^{-6} K_p + K_i + 717.9 K_d + 173.54) s + 717.9 K_i} \quad (13)$$

Koefisien pengendali PID dapat ditentukan dari *denominator* fungsi transfer diatas dengan mensubstitusikannya ke dalam koefisien indeks performansi ITAE untuk *input step* yaitu:

$$s^3 + 1.75 \omega_n s^2 + 2.15 \omega_n^2 s + \omega_n^3$$

Dengan $\omega_n = 22.22$, maka koefisien indeks performansi ITAE adalah:

$$s^3 + 38.9 s^2 + 1061.7 s + 10973.9 \quad (14)$$

Koefisien indeks performansi ITAE diatas ekivalen dengan *denominator* persamaan 13:

$$(2.1 * 10^{-6} K_p + 1) s^3 + (2.1 * 10^{-6} K_p + 717.9 K_d + 31.99) s^2 + (2.1 * 10^{-6} K_p + K_i + 717.9 K_d + 173.54) s + 717.9 K_i$$

Didapatkan *gain* $K_P = 1.237$, $K_I = 15.286$ dan $K_D = 9.611 \times 10^{-3}$, sehingga fungsi transfer pengendali PID dan *close loop* adalah:

$$G_c(s) = \frac{9.611 * 10^{-3} s^2 + 1.237 s + 15.286}{s} \quad (15)$$

$$T_l(s) = \frac{2.007 * 10^{-7} s^3 + 6.899 s^2 + 888.069 s + 10974.1557}{s^3 + 38.888 s^2 + 1061.604 s + 10974.1557} \quad (16)$$

Menentukan Prefilter

Dengan menggunakan persamaan dengan persamaan (2, 4, 5) maka fungsi tranfer dari

prefilter $G_P(s)$, dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$T(s) = G_P(s)T_I(s) = \frac{G_P(s)G_C(s)G(s)}{1 + G_C(s)G(s)}$$

dengan $T(s)$ sesuai persamaan 8 adalah:

$$T(s) = \frac{10973.9}{s^3 + 38.9s^2 + 1061.7s + 10973.9}$$

dan $G_P(s)$ dan $T_I(s)$ sesuai persamaan 10 dan 11 adalah:

$$G_P(s)T_I(s) = G_P(s) \frac{10973.9}{s^3 + 38.9s^2 + 1061.7s + 10973.9}$$

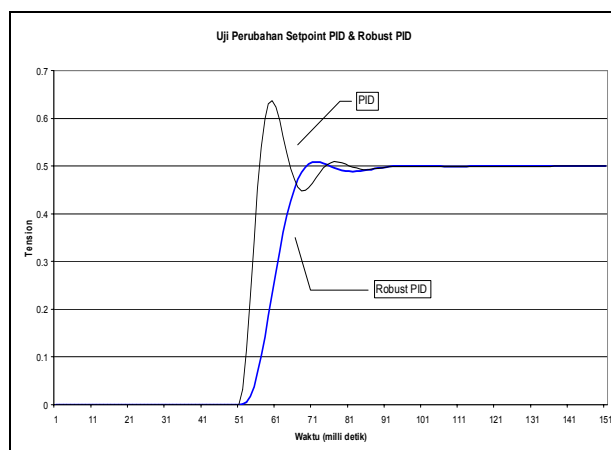
maka $G_P(s)$ yang diperoleh adalah:

$$G_P(s) = \frac{10973.9}{2.0067 \cdot 10^{-8}s^3 + 6.899s^2 + 888.069s + 10974.1557}$$

PENGUJUAN DAN HASIL

Simulasi dijalankan dengan software Matlab 7.0 dengan memberikan pengujian perubahan *set point* berupa sinyal *step*.

Pada pengujian ini diberikan perubahan *set point* terlihat bahwa kedua pengendali mempunyai *settling time* yang hampir sama karena respon *open loop* sistem memang relatif cepat. Kedua pengendalian juga tidak meninggalkan *steady state error*. Namun pengendali *robust* PID mempunyai *overshoot* sebesar 1.744%, yang jauh lebih kecil yaitu dibanding PID yang mencapai 27.54% sehingga harga ITAE *robust* PID sebesar 0.084, lebih baik dibandingkan harga ITAE PID yang sebesar 0.138. Dari hasil simulasi pada Tabel 2 membuktikan bahwa pengendali *robust* PID mampu bekerja dengan lebih baik dibandingkan PID konvensional.



Gambar 9. Respon pengendali *robust* PID dan PID

Kemampuan *robust* PID meredam perubahan variabel proses sangat berguna untuk menjaga keseragaman kerapatan gulungan kertas dan menghindari terjadinya kertas putus.

Kemudahan yang diberikan oleh *robust* PID disebabkan karena dalam mendesign *robust* PID, engineer langsung bisa memperkirakan respon yang akan dicapai dengan menentukan harga ξ . Bila harga ξ semakin kecil maka respon sistem akan semakin cepat, namun mudah berosilasi. Bila harga ξ semakin besar maka respon akan semakin sluggish. Harga ξ biasanya antara 0.6 sampai 0.8 tergantung kebutuhan proses.

Tabel 2. Perbandingan performansi

Parameter Sistem	Pengendali <i>Robust</i> PID	Pengendali PID
<i>Settling time</i>	0.2 detik	0.2 detik
Maksimum <i>Overshoot</i>	1.744%	27.54%
<i>Error Steady State</i>	0 %	0 %
Indeks ITAE	0.084	0.138

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- ❑ Sistem pengendali *Robust* PID mempunyai karakteristik stabil dan sensitifitas rendah sehingga memenuhi syarat pengendalian *Robust*, terutama untuk pengendalian *web tension* yang memerlukan pengendalian yang cepat, overshoot yang kecil dan tidak meninggalkan *error steady state*.
- ❑ Dari hasil uji *step* sistem *robust* PID memiliki performansi yang lebih baik dari PID konvensional, selain itu *robust* PID mudah untuk dirancang sesuai kebutuhan proses.

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, D., 1958. Dynamic Behavior of the Production Process, Process Dynamics. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Grenfell, K., June 1963. Tension control on paper-making and converting machinery. In: Proceedings of the 9th IEEE Annual Conference on Electrical Engineering in the Pulp and Paper Industry. pp. 20–21.
- King, D., December 1969. The mathematical model of a news paper press. Newspaper Techniques, 3–7(Interim Report).
- Brandenburg, G., 1977. New mathematical models for web tension and register error. In: Proceedings of the 3rd International IFAC Conference on Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industry. Vol. 1. pp. 411–438.
- Young, G., Reid, K., June 1993. Lateral and longitudinal dynamic behavior and control of moving webs. ASME Journal of Dynamic Sys-

tems, Measurement, and Control 115, 309–317.
28

6. Wolfermann, W., June 1995, Tension Control of Webs-A Review of the Problems and Solutions in the Present and Future, Proc. 3rd IWHC Int. Web Handling Conf., Oklahoma State University.
7. Wolfermann, W., June 1995. Tension control of webs, a review of the problems and solutions in the present and future. In: Good, J. (Ed.), Proceedings Third International Conference on Web Handling. Vol. 1. Stillwater, OK, USA, p. 198-229.
8. Veres, R.P. and Newton, J.O., May/June, 1972, Control Techniques for Film and Fabric Winders, IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 1A-8, No.3.
9. Boulter, B.T. and Fox, H.W., 1995, Advanced Dynamic Simulation, Rockwell Automation/Reliance Electric Systems Engineering Training Course E108.
10. Walton, B. and Rice, B.S., June 1997, Web Longitudinal Dynamics, Proc. 4th IWHC Int. Web Handling Conf., Oklahoma State University.
11. Ebler, N.A., Arnason R., Michaelis, G., and D'Sa, N., July/Aug., 1993, Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells, IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 29, No. 4.,
12. Boulter, B.T., The Effect of Speed Loop Bandwidths and Line-Speed on System Eigenvalues in Multi-Span Web Transport Systems, Proc. of 4th IWHC Int. Web Handling Conf., Oklahoma State University, June 1997.
13. Biyanto, TR., Mahardika, TPN., June 27th 2005, Controlling of Winder Using IMC-PID, The 4th National Conference Design and Application of Technology 2005, Widya Mandala University, Surabaya.