

ISSN 1412-8830
Vol. VIII, No. 1, 2009

JURNAL TEKNIK



Diterbitkan oleh

Fakultas Teknik

Universitas Jenderal Achmad Yani

ISSN 1412 - 8810
Vol. VIII, No. 1, 2009

JURNAL TEKNIK

Vol. VIII, No. 1, 2009



Diterbitkan oleh
Fakultas Teknik
Universitas Jenderal Achmad Yani

JURNAL TEKNIK

JURNAL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI

Vol. VIII, No. 1, 2009

DAFTAR ISI

Pengembangan Algoritma Penjadwalan <i>Preventive Maintenance</i> dengan Menggunakan Metoda <i>Nippon-Denso</i> dan <i>Analytic Hierarchy Process</i> di PT. Pupuk Kujang I B Oleh : Cucu Wahyudin.....	1 - 14
Modelling a Brushless DC Motor Power Source Based Two-Finger Gripper Oleh : Safrani Candra Sari.....	15 - 24
Pengaruh Kondisi Air Terhadap Laju Korosi pada Baja Tulangan Oleh : Bambang Hari Prabowo, Lela Mukmilah.....	25 - 32
Implementasi Algoritma Koreksi <i>Differential GPS</i> Dengan Metode Diferensial Tunggal Secara <i>Post-Processing</i> Oleh : Pujo Laksono.....	33 - 37
Penerapan Kendali Logika Fuzzy+<i>Proportional Integral</i> pada Modul <i>Process Control Simulator PCS 327 Mk2</i> Oleh : Wrastawa Ridwan.....	38 - 46
Pengaruh Variasi Arus GMAW pada Sambungan Pipa Baja API 5L Grade B terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Oleh : Adi Ganda P., Pawawoi.....	47 - 55

Pengembangan Algoritma Penjadwalan *Preventive Maintenance* dengan Menggunakan Metoda *Nippon-Denso* dan *Analytic Hierarchy Process* di PT. Pupuk Kujang I B

Cucu Wahyudin

Jurusan Teknik Industri
Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani

Abstrak. Sejak tahun 2006 kebutuhan pupuk di Indonesia khususnya di daerah Jawa Barat sebesar 700.500 ton harus dipenuhi oleh PT. Pupuk Kujang Cikampek (Persero), sementara kapasitas produksi hanya sebesar 1.725 ton/hari atau 570.000 ton/tahun. Untuk mencukupi dan memenuhi kebutuhan pasokan pupuk tersebut, kemudian PT. Pupuk Kujang Cikampek (Persero) mendirikan Kujang 1B.

Saat ini, Kujang 1B (Dinas Perencanaan dan Pemeliharaan) dalam menjalankan sistem perawatan mesin sudah cukup baik, yaitu dengan melakukan jadwal *Preventive Maintenance* secara rutin untuk setiap mesinnya selama 4 bulan sekali. Orang-orang yang merawat mesin sudah memiliki pengetahuan yang memadai tentang mesin tersebut dan memiliki pengalaman yang tinggi (jam terbangnya banyak). Walaupun demikian, masih terdapat jumlah *down time* yang tinggi, yaitu untuk pabrik *utility* dengan penggerak item turbin 494 jam, motor 941 jam dan pompa 1059 jam. Pabrik *Cosorb* dengan item penggerak pompa 1710 jam dan *compressor* 1003 jam. Pabrik *Ammonia* dengan item penggerak turbin 644 jam, motor 1465 jam, *compressor* 358 jam dan pompa 442 jam. Pabrik *Urea* dengan item penggerak motor 3415 jam dan pompa 431 jam.

Jumlah *down time* tersebut menunjukkan indikasi bahwa performansi dari kegiatan perawatan yang sudah berjalan saat ini kurang memuaskan. Metoda *Nippon Denso* diduga dapat dijadikan acuan untuk meningkatkan nilai performansi sistem perawatan. Metoda ini merupakan suatu metoda pengukuran performansi kegiatan perawatan mesin yang mengintegrasikan aspek manusia dan aspek mesin dalam suatu nilai performansi, sehingga hasil pengukuran dapat dievaluasi berdasarkan nilai-nilai manusia dan mesin sebagai faktor-faktor yang berpengaruh. Pada penelitian ini proses pembobotan dilakukan dengan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) yang dikembangkan saat ini.

Kata kunci : *Preventive Maintenance, Down Time, kapasitas produksi, metoda Nippon-Denso, AHP*

1 Pendahuluan

PT. Pupuk Kujang (Persero) merupakan salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak dibidang industri pupuk. Salah satu produk yang dihasilkannya berupa pupuk urea prill yang berbahan baku air, NH_3 , CO_2 dan gas alam. Pupuk urea prill dihasilkan melalui empat tahapan, yang dikerjakan oleh pabrik *Utility*, pabrik *Cosorb*, pabrik *Amonia* dan pabrik *Urea*

Pabrik Kujang 1B dalam memproduksi pupuk urea berlangsung secara kontinyu. Proses produksi kontinyu memerlukan sistem pemeliharaan dan perawatan khusus, karena jika

terjadi kerusakan pada salah satu mesin dapat menyebabkan proses produksi secara keseluruhan berhenti. Saat ini, Dinas Perencanaan dan Pemeliharaan dalam menjalankan sistem perawatan mesin sudah cukup baik, yaitu dengan melakukan jadwal *Preventive Maintenance* secara rutin untuk setiap mesinnya selama 4 bulan sekali. Orang-orang yang merawat mesin sudah memiliki pengetahuan yang memadai tentang mesin tersebut dan memiliki pengalaman yang tinggi (jam terbangnya banyak). Walaupun demikian, pada saat ini masih terdapat jumlah *down time* yang tinggi. Adapun jumlah *down time* yang terjadi pada masing-masing pabrik dapat dilihat dalam tabel dibawah ini:

Tabel 1 *Down time* tahun 2006

No	Pabrik	Penggerak Item	Down Time (Jam)
1	Utility	Turbin	494
		Motor	941
		pompa	1059
2	Cosorb	pompa	1710
		Compresor	1003
		Turbin	644
3	Amomonia	Motor	1465
		Compresor	358
		Pompa	442
4	Urea	Motor	3415
		Pompa	431

Tabel 1 menunjukkan indikasi bahwa perlu dilakukan penelitian lebih mendalam lagi mengenai jadwal *Preventive Maintenance* tersebut. Dengan demikian PT. Pupuk Kujang (Persero), khususnya Dinas Perencanaan dan Pemeliharaan (RenHar) perlu mengembangkan dan menerapkan sistem pemeliharaan dan perawatan lebih lanjut sehingga jumlah *Down Time* tersebut dapat diminimasi.

Oleh karena itu perlu dikembangkan metoda lain dalam melakukan penjadwalan *Preventive Maintenance*, sehingga tujuan untuk meminimasi downtime dapat tercapai. Metoda Nippon Denso dapat dijadikan acuan untuk mengembangkan sistem perawatan dengan tujuan diatas.

2 Formulasi Masalah

Gejala yang menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut tentang penjadwalan *preventive maintenance* diantaranya :

1. Banyaknya *Down Time* yang terjadi di masing-masing pabrik,
2. Banyaknya waktu produksi yang terbuang,
3. Rencana kapasitas produksi tidak tercapai

Oleh karenanya, pada penelitian ini dirumuskan masalah penentuan interval perawatan pencegahan / pemeriksaan (*Jadwal Preventive Maintenance*) yang dapat memperkecil jumlah *Down Time* sehingga performansi perawatan dapat ditingkatkan.

II. STUDI LITERATUR

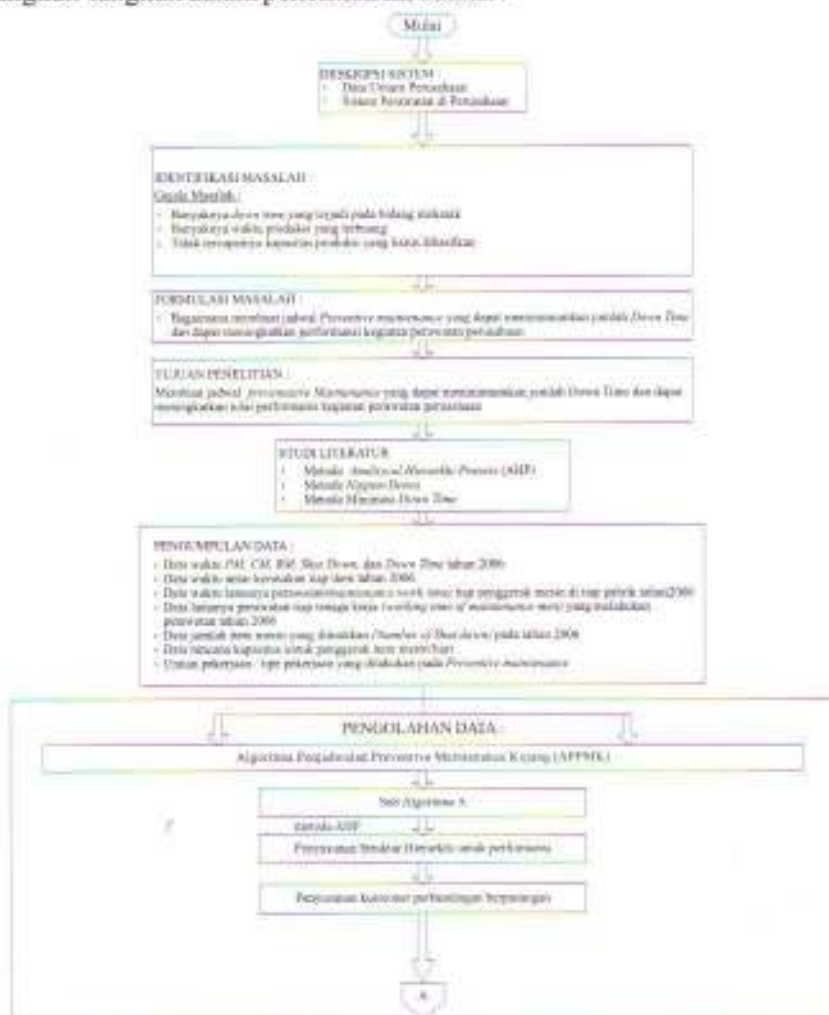
Metoda penelitian yang dipergunakan pada penelitian tugas akhir ini yaitu metoda AHP, metoda Nippon-Denso, dan metoda minimasi Down Time.

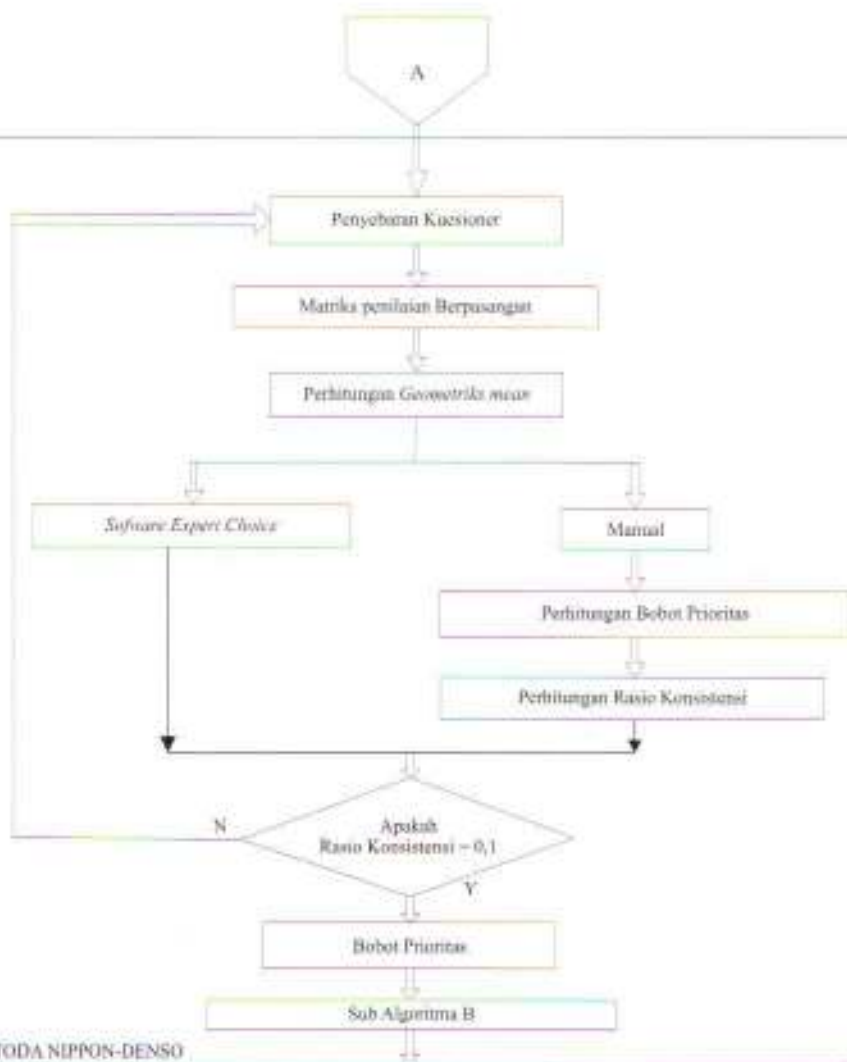
Analytic Hierarchy Process (AHP) adalah metoda untuk memecahkan suatu situasi yang kompleks tidak terstruktur ke dalam beberapa komponen dalam susunan yang hirarki, dengan memberi nilai subjektif tentang pentingnya setiap variabel secara relatif, dan menetapkan variabel mana yang memiliki prioritas paling tinggi guna mempengaruhi hasil pada situasi tersebut. Selain itu AHP juga merupakan salah satu metoda pengambilan keputusan dimana faktor-faktor logika, intuisi, pengalaman, pengetahuan, emosi dan rasa dicoba untuk dioptimalkan dalam suatu proses yang sistematis.

Metoda Nippon-Denso merupakan suatu metoda yang digunakan untuk mengetahui nilai performansi dari suatu perusahaan baik untuk jangka panjang dan jangka pendek. Elemen yang sangat berpengaruh menurut metoda Nippon-Denso yaitu man-Power dan Failure.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah :

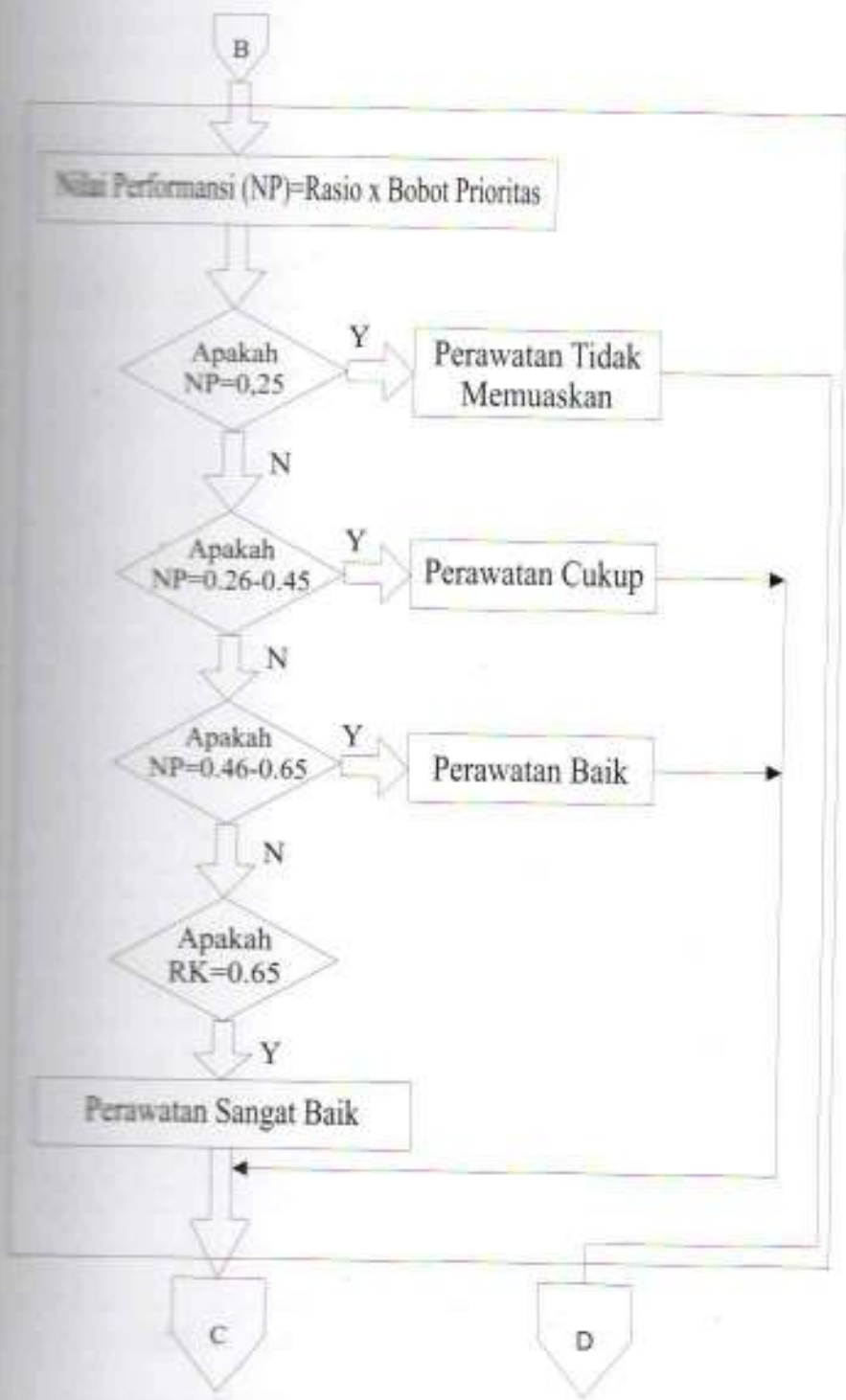


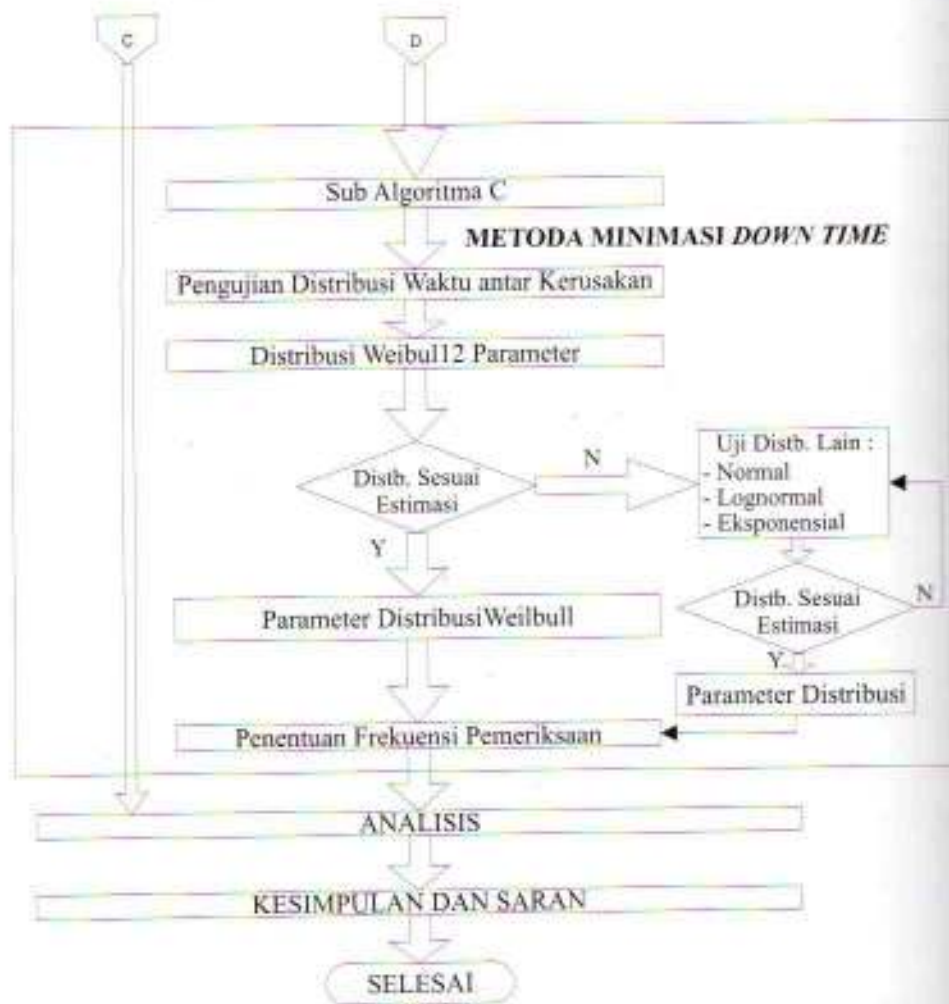


METODA NIPPON-DENSO

Perhitungan

- ± $Planned\ Operating\ Time = hr\ kerja\ tahun \times Rencana\ Kapasitas\ untuk\ penggerak\ item\ mesin\ hari$
- ± $Active\ Time = Planned\ Operating\ Time / (Prodhours\ loss + PM + BM)$
- ± $PMWR = (PM/hr) + CM/hr / (Total\ maintenance\ work\ time)$
- ± $NMWR = (PM + CM + BM/hr) / (Total\ Working\ time\ of\ maintenance\ work)$
- ± $ESR = (Down\ Time\ from\ shut\ down) / (active\ time)$
- ± $PIR = (Production\ interfered\ time) / (Planned\ operating\ time)$





4 Pengumpulan Data

Untuk memecahkan masalah yang ada di penelitian ini, maka diperlukan data-data yang mendukung dengan masalah tersebut yang kemudian akan diolah dan dianalisis sehingga didapatkan solusi dari permasalahan yang dihadapi.

Adapun data – data yang dikumpulkan dan diklasifikasikan sebagai berikut ini :

- Data umum perusahaan untuk memberikan gambaran di PT.Pupuk Kujang (Persero), lokasi penelitian dilakukan.
- Uraian pekerjaan / tipe pekerjaan yang dilakukan pada Preventive Maintenance
- Data – data Perhitungan Performansi
 - o Data Jadwal PM, CM dan BM pada tahun 2006
 - o Data Down Time yang terjadi selama tahun 2006
 - o Man Hours yang diperlukan selama Down Time
 - o Data jumlah item mesin yang dimatikan (Number of Shutdown)
 - o Rencana kapasitas untuk penggerak item mesin

- Data –data menentukan frekuensi pemeriksaan
Data waktu antar kerusakan

5 Pengolahan Data

Langkah awal dari pengolahan data ini yaitu dengan membuat algoritma. Algoritma ini digunakan untuk menggambarkan urutan-urutan dalam melakukan perhitungan. Yang dilanjutkan dengan menghitung nilai performansi. Penentuan nilai performansi ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

1 Metoda AHP (Sub Algoritma A)

Pengolahan data dengan metoda AHP terdiri dari beberapa langkah, yaitu :

- 1.1 Penyusunan struktur hierarki untuk performansi tiap penggerak item
Struktur hierarki ditentukan berdasarkan studi literatur dan wawancara dengan pihak perusahaan. Setelah proses tersebut maka diperoleh struktur hierarki untuk memilih penggerak item mana yang memiliki bobot prioritas terbesar.
- 1.2 Penyusunan kuesioner perbandingan berpasangan
Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan kuesioner perbandingan berpasangan berdasarkan banyaknya jumlah kriteria yang dibandingkan. Kemudian dilakukan penyebaran kuesioner kepada pihak yang telah berpengalaman dan memiliki pengetahuan tentang penilaian kriteria.
- 1.3 Penyebaran kuesioner
Pada penelitian ini penyebaran kuesioner diberikan kepada responden yang berkompeten di bidangnya untuk setiap pabrik, yaitu :
 - Pabrik *Utility*
 - Pabrik *Cosorb*
 - Pabrik *Ammonia*
 - Pabrik *Urea*
- 1.4 Matriks penilaian berpasangan
Data dari kuesioner perbandingan berpasangan akan disusun dalam bentuk matriks penilaian perbandingan berpasangan dengan menggunakan skala penilaian satu sampai sembilan berdasarkan tabel skala Thomas. L. Saaty. Matriks penilaian tersebut digunakan sebagai input untuk tahap pengolahan data.
- 1.5 Perhitungan *Geometric Mean*
Perhitungan *Geometric Mean* dilakukan setelah diketahui matriks penilaian perbandingan berpasangan oleh masing-masing responden. Pendapat masing-masing responden tersebut akan menghasilkan penilaian yang berbeda satu sama lain. Oleh karena itu untuk mencapai kesepakatan 1 jawaban untuk 1 matriks perbandingan berpasangan adalah dengan cara semua jawaban dari partisipan harus dirata-ratakan. Persamaan untuk *geometric mean* tersebut adalah:

$$a_{ij} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^{1/n}$$
 Dimana:
 a_{ij} = nilai rata-rata perbandingan antar kriteria a_i dengan a_j untuk partisipan.
 Z_i = nilai perbandingan antara kriteria a_i dengan a_j untuk partisipan ke-I dengan I = 1, 2, ..., n
 n = Jumlah partisipan / responden
 Setelah didapat *geometric mean*, terdapat 2 cara untuk mengetahui nilai bobot kriteria matriks, yaitu dengan cara :

a *Expert Choice*

Expert Choice adalah suatu sistem yang digunakan untuk melakukan analisa, sintesis dan pertimbangan (justifikasi) dari sebuah evaluasi keputusan yang kompleks. Dengan menggunakan *Expert Choice*, maka tidak ada lagi metode coba-coba dalam proses pengambilan keputusan, hanya memasukkan nilai dari *geometric* yang telah diketahui. Setelah itu akan muncul sendiri bobot dari masing-masing kriteria

b Manual

Pengolahan dengan cara manual terdiri dari beberapa tahap, yaitu :

Menghitung Bobot Prioritas

Perhitungan bobot prioritas menilai matriks perbandingan berpasangan berdasarkan *geometric mean* dari seluruh responden. Pendekatan lain untuk memperoleh nilai bobot kriteria adalah dengan langkah-langkah berikut ini:

- Matriks perbandingan dari responden
- Bagi masing-masing elemen kolom tertentu dengan nilai jumlah kolom tersebut.
- Hasil tersebut kemudian dinormalisasikan untuk mendapatkan vektor eigen matriks dengan meratakan jumlah baris terhadap elemen sub tujuan

Perhitungan diatas menunjukkan vektor eigen yang merupakan bobot matriks dari elemen terhadap tujuan.

Menghitung Rasio konsistensi

Perhitungan rasio konsistensi setiap matriks perbandingan berpasangan dilakukan untuk menunjukkan konsistensi kualitas penilaian pakar pengambil keputusan. Pengujian konsistensi ini dilakukan terhadap setiap penilaian yang diberikan responden pada kusioner pembobotan elemen. Pendekatan lain untuk menghitung RK adalah sebagai berikut :

- Setelah didapat bobot dari masing-masing matriks perbandingan berpasangan, kalikan matriks perbandingan awal dengan bobot,
- Kolom jumlah dibagi dengan bobot
- Menghitung nilai λ maks
 λ_{maks} = Penjumlahan dari hasil dibagi n
Dimana n = jumlah elemen yang diperbandingkan
- Menghitung nilai Indeks Konsistensi (IK)

$$IK = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1}$$

- Menghitung nilai Rasio Konsistensi, yaitu membagi IK dengan IKA

$$RK = \frac{IK}{IKA}$$

IKA (Indeks Konsistensi Awal) untuk setiap orde matriks perbandingan berpasangan didapat dari :

Tabel 1 Orde Matriks Perbandingan Berpasangan

Orde Matriks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,445	1,49

Dalam penelitian ini digunakan aturan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty, bahwa penilaian perbandingan berpasangan adalah konsisten apabila nilai rasio konsistensi (RK) $\leq 0,10$. Jika perbandingan konsistensi lebih besar berarti penilaian yang dilakukan bersifat random dan perlu diperbaiki dengan langkah selanjutnya adalah kembali ke pengambilan data dengan menyebarkan kuesioner matriks penilaian perbandingan berpasangan.

1.7 Bobot Kriteria Matriks

Setelah didapat nilai perbandingan berpasangan yang konsisten, maka dihasilkan nilai bobot setiap kriteria. Terdapat dua penilaian bobot kriteria yaitu bobot parsial (bobot prioritas yang menggambarkan kepentingan relatif dari masing-masing faktor yang berhubungan dengan elemennya) dan bobot global (bobot prioritas yang menggambarkan kepentingan relatif dari masing-masing faktor terhadap sasaran secara keseluruhan (*overall goal*)) dimana prioritas bobot parsial dikalikan dengan prioritas dari elemen di atasnya.

2 Menghitung Nilai Performansi untuk tiap penggerak mesin

2.1 Metoda Nippon-Denso (Sub algoritma B)

Pengolahan data-data dilakukan menurut data yang berasal dari keseluruhan laporan aktivitas perawatan untuk-until masing-masing item yang merupakan rekapitulasi dari laporan bulanan.

Tabel 2 Rumus Perhitungan Rasio-Rasio

Faktor	Rumus Perhitungan
Planned Maintenance Work Ratio	$(PM[hr]+CM[hr]) / (\text{Total Maintenance Work time})$
Net Maintenance Work Ratio	$(PM+CM+BM[hr]) / (\text{Total Working Time of Maintenance men})$
Equipment Shutdown Intensity Ratio	$(\text{Down time from shutdown}) / (\text{Active time})$
Equipment Shutdown Ratio	$(\text{Number of Shutdown}) / (\text{active time})$
Production Interfered Ratio	$(\text{Production interfered time}) / (\text{Planned Operating Time})$
Total	

Setelah bobot untuk masing-masing kriteria diketahui dan faktor-faktor dari performansi berdasarkan Metoda Nippon-Denso telah dihitung maka langkah selanjutnya yaitu dengan menghitung nilai performansi. Nilai performansi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$p = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

Tabel 3 Perhitungan Performansi Kegiatan Perawatan

Faktor	Item	Poin (1)	Bobot (2)	Hasil (1 x 2)	Rumus Perhitungan
Planned Maintenance Work Ratio					$(PM[hr] + CM[hr]) / (\text{Total maintenance work time})$
Net Maintenance Work Ratio					$(PM + CM + BM[hr]) / (\text{Total Working time of maintenance men})$
Equipment Shutdown Intensity Ratio					$(\text{Downtime from Shutdown}) / (\text{Active time})$
Equipment Shutdown Ratio					$(\text{Number of Shutdown}) / (\text{Active Time})$
Production Interfered Ratio					$(\text{Production interfered time}) / (\text{Planned Operating Time})$
Total				t	

Setelah diketahui nilai performansinya, lalu nilai tersebut di lihat apakah performansi perawatan yang telah dilakukan cukup baik atau tidak. Untuk mengetahui hal tersebut dapat tabel skala penilaian performansi perawatan dibawah ini.

Tabel 4 Skala Penilaian Performansi Perusahaan

Rentang Nilai performansi	Kategori
< 0,25	Tidak memuaskan
0,26-0,45	Cukup
0,46-0,65	Baik
> 0,65	Sangat baik

Jika nilai performansinya < 0,25, maka Dinas RenHar harus membuat jadwal PM yang baru. Tetapi jika lebih dari 0,25 dinas RenHar tidak harus membuat jadwal PM yang baru.

2.2 Menentukan Interval Perawatan Pencegahan (Sub Algoritma C)

Dalam menentukan interval perawatan pencegahan yang baru dapat dibuat dengan melalui beberapa tahap, yaitu:

1. Pengujian Distribusi Waktu antar Kerusakan
Agar penelitian yang dihadapi dapat diselesaikan dengan baik, maka perlu dilakukan pengujian distribusi kerusakan yang sesuai dengan karakteristik data. Dalam persoalan ini distribusi yang digunakan adalah distribusi Weibull 2 parameter. Hal ini karena dari hasil penelitian-penelitian yang sudah ada kebanyakan yang berhubungan dengan peralatan mekanik berhubungan dengan distribusi Weibull. Sedangkan dengan peralatan elektronika berhubungan dengan distribusi eksponensial.
2. Pengujian Kecocokan Distribusi Weibull 2 Parameter.
Agar permasalahan dapat dianalisis dan diselesaikan dengan model yang telah

perlu dilakukan pemilihan distribusi statistik kerusakan sesuai dengan karakteristik data yang ada, penentuan fungsi kepadatan probabilitas, serta penentuan tingkat keandalan bagi item-item mesin yang ada di Bidang Mekanik. Terhadap data waktu antar kerusakan item-item mesin dilakukan pengujian kesamaan untuk dapat mengetahui apakah data-data tersebut berasal dari univesum yang sama. Dengan demikian dapat menentukan apakah area pekerjaan yang diteliti dapat dianggap mempunyai distribusi kerusakan yang sama.

Pengujian kecocokan ini dikembangkan oleh kelompok Mann, dimana pengujian distribusi Weibull dua parameter menggunakan pemisalan (Ebeling, 1997):

- H_0 : Data berdistribusi Weibull dua parameter
- H_1 : Data tidak berdistribusi Weibull dua parameter

Pengujian statistiknya adalah sebagai berikut :

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=1}^r (1n_{t_{i-1}} - 1n_{t_i}) / M_1}{k_2 \sum_{i=1}^r (1n_{t_{i-1}} - 1n_{t_i}) / M_2}$$

Dimana :

k_1 dan k_2 = derajat kebebasan pada tabel distribusi F

$$k_1 = \frac{r}{2} \quad k_2 = \frac{r-1}{2}$$

t_i = interval waktu kerusakan ; $M_i = Z_{i+1} - Z_i$

$$Z_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i-0,5}{n+0,5} \right) \right]$$

n = merupakan jumlah unit yang diamati

r = banyaknya data dalam pengujian

M_{tabel} = didapat dari tabel distribusi F

Hipotesa dapat diterima apabila $M_{hitung} < F_{k_1, k_2}$ atau ($M_{hitung} < M_{tabel}$) artinya kerusakan yang diuji berdistribusi *weibull* dua parameter.

Jika Distribusi sesuai dengan estimasi lalu dilanjutkan dengan menentukan parameter distribusi *Weibull*, tetapi jika tidak maka dilakukan pengujian distribusi yang lain.

2.3 Parameter Distribusi Weibull

Jika data kerusakan telah ditentukan memiliki fungsi distribusi weibull, maka fungsi kumulatif weibull dapat ditulis sebagai berikut (Walpole, hal. 144-147):

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

Untuk menaksir besarnya parameter α dan β dapat dilakukan dengan cara regresi linier. Misalkan $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ adalah jumlah data kerusakan sistem yang telah disusun menurut urutan terkecil. Untuk tiap t_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$) berlaku hubungan sebagai berikut :

$$F(t_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

Persamaan terakhir dapat dinyatakan sebagai :

$$Y_i = a + bX_i$$

dimana :

$$Y_i = \ln t_i$$

$$X_i = \ln \left\{ \ln \left[\left\{ 1 - F(t_i) \right\}^{-1} \right] \right\}$$

$$a = \ln \alpha \quad ; \quad b = 1/\beta$$

Fungsi ini diperoleh dari pendekatan dengan metode harga tengah atau median (50%). Metode ini cocok untuk percobaan yang ukuran sampelnya kecil, data kurang lengkap, atau distribusi kerusakan tidak simetris. Metode ini lebih banyak digunakan dalam menaksir fungsi keandalan berdistribusi weibull.

Setelah itu dengan menggunakan metode Least Square, nilai konstanta a dan b dapat diperoleh sebagai berikut :

$$b = \frac{(N \sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{(N \sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

$$a = \frac{\sum Y_i}{N} - b \frac{\sum X_i}{N}$$

Dengan diketahuinya nilai kedua konstanta a dan b , maka parameter distribusi weibull dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\beta = 1/b$$

$$\alpha = \exp(a)$$

2.4 Penentuan Frekuensi Pemeriksaan

Tujuan dasar dibalik sebuah pemeriksaan adalah menentukan batasan suatu peralatan. Salah satu indikator yang dapat digunakan untuk menggambarkan batasan ini adalah kualitas produk yang dihasilkan. Untuk meminimasi jumlah kerusakan, juga dapat dilakukan dengan pemeriksaan secara periodik.

Kebijaksanaan frekuensi pemeriksaan dapat ditentukan melalui persamaan berikut :

$$n = \sqrt{\frac{k \times i}{\mu}}$$

Total downtime yang terjadi dengan adanya frekuensi pemeriksaan yang optimal (n) dinotasikan $D(n)$. Dimana :

$$D(n) = \frac{k \cdot \mu}{n} + n \cdot i$$

Maksimum availability (A) = $1 - D_{min}$

Keterangan :

D_{min} = Total minimum downtime

k = Jumlah kerusakan per unit waktu

n = Frekuensi Pemeriksaan

μ = Rata-rata waktu untuk melakukan perbaikan

i = Rata-rata waktu untuk melakukan kegiatan pemeriksaan

3 Kesimpulan dan Saran

Dari hasil seluruh pembahasan terhadap penelitian yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu :

3.1 Sistem Awal

Perhitungan nilai performansi kegiatan perawatan masing-masing item penggerak Kujang 1 B saat ini dengan menggunakan metoda Nippon-Denso:

Tabel 5 Nilai Performansi

Pabrik	Item Penggerak	Nilai Performansi
UTILITY	TURBIN	0.141
	MOTOR	0.154
	POMPA	0.157
COSORB	POMPA	0.229
	COMPRESSOR	0.199
Pabrik	Item Penggerak	Nilai Performansi
AMMONIA	TURBIN	0.164
	MOTOR	0.193
	COMPRESSOR	0.184
UREA	POMPA	0.123
	MOTOR	0.226
	POMPA	0.171

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa performansi kegiatan perawatan pada tahun 2006 tidak memuaskan.

3.2 Sistem Usulan

1. Pola kerusakan untuk setiap item mesin berdistribusi weibull.
2. Penentuan interval waktu perawatan optimal diambil berdasarkan interval waktu pemeriksaan yang menghasilkan interval downtime minimum dengan tetap mempertimbangkan tingkat *availability*.

3.3 Saran

1. Sistem Informasi mengenai kegiatan perawatan belum ada, sehingga dalam melakukan penjadwalan Preventive Maintenance masih dilakukan secara manual.
2. Penentuan Interval Pemeriksaan disarankan untuk penelitian lanjut dilakukan berdasarkan dari segi Biayanya.

Daftar Pustaka

1. Azhari, M.CH, Ir.Msc. Diktat Kuliah Perawatan, Teknik Industri, Unjani Bandung,1997.
2. Expert Choice. Inc, Expert Choice Version 9.0 Software Tutorial, McLean, Virginia.
3. Hald,A, Statistical Theory With Engineering Applications, A Wiley Publication in Applied Statistics, London.
4. Higgins, LindleyR & R. Keith Mobley, Maintenance Engineering Handbook 6th Edition, McGrawHill, NY,2002.
5. Myers. R.M & Walpole, R.E, Ilmu Peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan, ITB, Bandung 1995.
6. Nana, Ase Rukmana, Ir.MT. Modul Pelatihan Aplikasi Perangkat Lunak, Laboratorium Manajemen Kualitas, UNISBA Bandung, 2006.
7. Saaty,T.L. Decision Making For Leaders:The Analitical Hierarchy Process for Decision in a Complex World, RWS Publication, Pittsburg, 1988.
8. Saleh, Dedi Kurnia. Pengukuran Performansi Kegiatan Perawatan Mesin dengan metode NIPPON-DENSO : Konsep & Rekomendasi, Teknik Industri ITB,1999.
9. Sudjana,Prof.DR.M.A.,M.Sc, Metoda Statistika, Tarsito, Bandung 1996.
10. Suparlan,Suwandi, Ir.MME. Diktat Kuliah Perawatan, Teknik Mesin, ITB Bandung,1999.
11. Vajda, Prof. S, Maintenance, Replacement and Reliability. London, 1973.
12. Widodo, Manajemen Perawatan Mesin., Politeknik Manufaktur Bandung ITB Bandung 1999.
13. www.NIPPON-DENSO.com

Modelling a Brushless DC Motor Power Source Based Two-Finger Gripper

Safreni Candra Sari

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani

E-mail: remi2000@mail.com

Abstract. In industrial automation system and robotic fields, men use gripper as end manipulator to do simple manipulation tasks as grasping, screwing, pulling, etc. In order to obtain stability in manipulating an object, the gripper has to receive the proper current to produce proper gripper force. Therefore the modelling the gripper, hence, plays an important role. The gripper being modelled has two state: open and close. The finger is open, when finger moves away from each other, and close when the finger moves to each other. Opening the gripper can be done by sending voltage 0 to +5 V to the gripper, and close by sending -5 V to 0 V. The voltage magnitude determines the acceleration of the finger movement, hence, the gripforce is determined by the dynamic of the current sent to the brushless dc motor in the gripper. This paper discuss the modelling process of the gripper. At the end, we will have a mathematical model of the gripper.

Keywords : *Brushless DC Motor, modelling, identification, gripper*

1 Introduction

In order to design a good controller for a manipulation system, we need a well-modeled grasping system, which is then used to determine which controller is used^[1]. The power source of the gripper is a brushless DC motor. In order to drive the motor, a PWM (Pulse Width Modulation) is used. This PWM is built in the gripper. The mechanical scheme of the finger is given below.

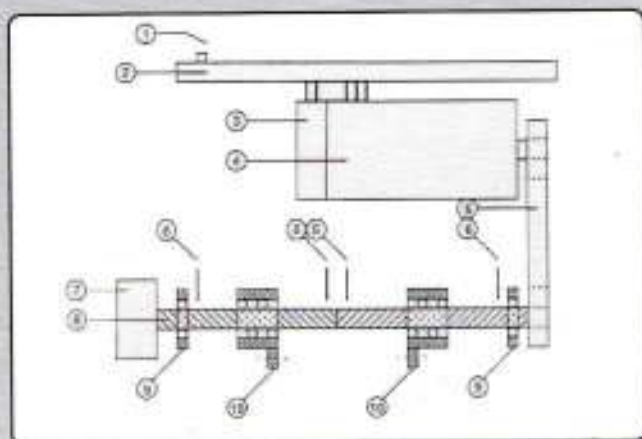


Figure 1: The scheme of the two finger parallel gripper. 1: 25 poles sub D connector, 2: PWM Servo Amplifier, 3: incremental encoder, 4: brushless DC motor, 5: belt, 6: approaching sensors, 7: electromagnetic break, 8: ball bearings rotating spindle, 9: bearings, 10: finger-fastened blockabel. 4 Skala Penilaian Performansi Perusahaan

Brushless DC motor is a permanent magnet rotor DC motor that use electronic switching for the current in the stator winding segment to accomplish commutation. This motor is classified as the synchronous motor with a trapezoidal flux distribution.

The grasping mechanism is conducted by controlling the force when grasping. Therefore we are interested in the speed/torque characteristic performance of the gripper. Since the brushless DC motor is a synchronous motor, first we will discuss the detailed machine formulations for synchronous motor in section 2. Next, the equations considering the brushless DC motor will be presented in section 3, which is given in state space equation. Finally in section 4 the transfer function and the block diagram of the gripper will be given.

2 Mathematical Model and Torque Considerations for the Synchronous Machine

The majority of research associated with the formulation of models for the simulation of synchronous machines is directed towards the synchronous generator. The class of synchronous machines contains several specific machines that are differing with respect to their rotor structures. Therefore the description of each sub-case of the synchronous machine is treated from the general synchronous machine^[2].

This section presents the detailed machine formulations for synchronous motors which, in addition to provide the basis for a more advanced study of the subject. It may also be used to advantage for a number of problems associated with practical electro-driving system. Taking as a general example, the synchronous machine where the motor is presented as a 3-phase synchronous machine with the phase winding in a star-connection (wye-connection). All mutuals between stator and rotor circuits are periodical functions of rotor angle position.

In machine variables, the general expression for the voltage equation will involve the symmetric stator phases (designated by subscripts as , bs , and cs for phases a , b , and c) and the symmetric rotor windings (designated by subscripts kq and kd for the q -axis and d -axis auxiliary windings and by subscript fd for the field winding, which is assumed to be oriented along the d -axis)[3]. If u_s , i_s , λ_s , are respectively the vector of stator voltages, -currents, and -flux linkages, and u_r , i_r , λ_r , are respectively the vector of the rotor voltages, -currents, and -flux linkages, then the voltage equations are written as

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_s & 0 \\ 0 & \mathcal{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_s \\ \dot{\lambda}_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

where \mathcal{R}_s and \mathcal{R}_r are stator and rotor resistance matrices

$$\mathcal{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \mathcal{R}_r = \begin{bmatrix} R_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & R_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{kd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

When denoting any of the above stator and rotor vectors (voltage, current, and flux) by the generic notation f_s , f_r , respectively, the vector structure will be

$$f_s = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}]^T \quad (3)$$

$$f_r = [f_{kr} \quad f_{lr} \quad f_{fr}]^T \quad (4)$$

where stator components are associated with phase winding in machine variables, and rotor components are associated with the two auxiliary winding and the field winding in machine variables.

Assuming magnetic linearity, the flux linkages may be expressed by

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s(\theta) & \mathbf{L}_m(\theta) \\ \mathbf{L}_m^T(\theta) & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

with inductances matrices

Assuming magnetic linearity, the flux linkages may be expressed by

$$\mathbf{L}_s(\theta) = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} - L_m \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{L}_m(\theta) = \begin{bmatrix} M_q \cos(p\theta) & M_f \cos(p\theta) & M_d \cos(p\theta) \\ M_q \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_f \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_d \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_q \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_f \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_d \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{fr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{dr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

where:

- | | | |
|-----------------|---|--|
| L_s | - | (average) stator self inductance, |
| M_s | - | (average) stator to stator mutual inductance, |
| L_m | - | stator inductance coefficient that accounts for the rotor salient, |
| L_{qr} | - | self inductance of the rotor q-axis auxiliary winding, |
| L_{dr} | - | self inductance of the rotor field winding |
| L_{fr} | - | self inductance of the rotor field winding, |
| M_r | - | mutual inductance between the two d-axis rotor winding, |
| M_d, M_q, M_f | - | magnitudes of the angle dependent mutual inductances between stator and the various rotor winding, |
| P | - | the number of pole pairs. |

For the motor mechanical dynamics, the differential equation for the rotor velocity ω is

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_L \quad (9)$$

where J is moment inertia of the rotor, ω is the speed of the rotor, T_e is the electromechanical torque, B is the motor damping and T_L is the load torque.

Reference Frame Transformation

The presented model is not in convenient form for determining the steady state conditions needed for achieving constant velocity operation, due to the model's periodical dependence on position. This position dependence can be eliminated by a nonsingular change of variables, which effectively projects the stator variables into a reference frame fixed to the rotor.

To simplify the mathematical description of the synchronous machine and to facilitate a simulation, a two axes transformation of the stator and rotor quantities may be performed such that the basic equations possess constant coefficients. The derived matrix equations can be presented in d, q, θ -axes frame [Park R.H., 1929].

$$[U] = [R] [I] + \left[\frac{d\lambda}{dt} \right] + p [\lambda] \omega \quad (10)$$

where $[U]$, $[R]$, $[I]$, and $[\lambda]$ are respectively voltage matrix, resistance matrix, current matrix, and flux linkage matrix, which is given by $[L][I]$.

Although it is possible to construct transformation to other frames of reference, these would not eliminate the position dependence due to the asymmetry present in the rotor. Since the asymmetrical rotor windings are presumed to be aligned with the rotor frame of reference, just one transformation matrix is necessary. It transforms circuit variables from the stator windings to the fictitious windings which rotate with the rotor, and it is given by

$$K_{sr}(\theta) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta-2\pi/3) & \cos(p\theta+2\pi/3) \\ \sin(p\theta) & \sin(p\theta-2\pi/3) & \sin(p\theta+2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

This matrix is orthonormal and, hence, its inverse is equal to its transpose. Formally stated, the considered change of variables is defined by

$$\tilde{f}_s = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}] \quad (12)$$

$$\tilde{f}_s = K_{sr}(\theta) f_s \quad (13)$$

where the tilde represents the stator variables in the new coordinate d, q, θ -system. If the stator windings are star-connected, the sum of the stator currents must always be equal to zero, i.e. $\tilde{i}_d + \tilde{i}_q + i_\theta = 0$. By other words, the reference frame transformation, which is intended to eliminate from the voltage equations, will also satisfy the algebraic current constraint by construction.

Generally the stator voltage equations become

(14)

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + p\omega\lambda_{ds} \quad (15)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (16)$$

and the rotor voltage equations become

$$0 = R_{rd} i_{rd} + \frac{d\lambda_{rd}}{dt} \quad (17)$$

$$0 = R_{rq} i_{rq} + \frac{d\lambda_{rq}}{dt} \quad (18)$$

$$u_{\theta r} = R_{r\theta} i_{\theta r} + \frac{d\lambda_{\theta r}}{dt} \quad (19)$$

The transformed flux linkages become

$$\begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} \tilde{i}_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

where

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & L_s - M_s + \frac{1}{2}L_\theta & 0 & 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}M_s & \sqrt{\frac{2}{3}}M_r \\ L_s - M_s - \frac{1}{2}L_\theta & 0 & 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}M_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_r + 2M_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}M_s & 0 & 0 & M_r & L_\theta \\ \sqrt{\frac{2}{3}}M_s & 0 & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}M_s & 0 & 0 & L_\theta & M_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

All dependencies on rotor angle θ is eliminated and the analysis is simplified. However, non-linearity is not entirely eliminated. Note that $i_\theta = 0$ so that the θ -axis equation could be completely ignored.

Due to the motor asymmetry, the most convenient set of electrical variables for expressing the electrical torque consists of stator current and stator flux. Using these variables the torque expression becomes

$$T_e = \frac{3}{2} p (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (22)$$

3 Brushless DC Motor

Brushless DC motor is a special case of the synchronous motor where the rotor field winding is replaced by permanent magnets attached to the surface of a smooth rotor, with auxiliary rotor winding removed¹¹. Therefore we have $i_{qr} = \text{constant}$, $i_{dr} = i_{dr} = 0$, and $Lm = 0$. In order to simplify the notation, the new coefficients concerning magnet flux and inductance are defined, which are stated respectively as follow.

$$\lambda_m = \frac{3}{2} M_f i_{fd} \quad (23)$$

$$L = L_s - M_s \quad (24)$$

respectively. Since $Ls = Ms$ the new description allows the torque to be expressed by

$$T_e = p \lambda_m i_{qs} \quad (25)$$

Consider the state vector

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]$$

Where $x_1 = \theta$, $x_2 = \omega$, $x_3 = i_{qs}$, $x_4 = i_{ds}$ and the input and output vectors are as follows

$$u = [u_1 \quad u_2] \quad y = [y_1 \quad y_2]$$

where $u_1 = u_{qs}$, $u_2 = u_{ds}$, $y_1 = \theta$, $y_2 = i_{ds}$. Since the motor torque depends only on i_{qs} but not on i_{ds} , the d -axis current is the appropriate choice of the second output. With the above variable assignments, the state space equation can be presented as follow

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Fx + Gu \\ y &= Hx + Ju \end{aligned} \quad (26)$$

where

$$(27) \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$J = 0 \quad (30)$$

From above equations, the block diagram for the motor can be presented as the following figure.

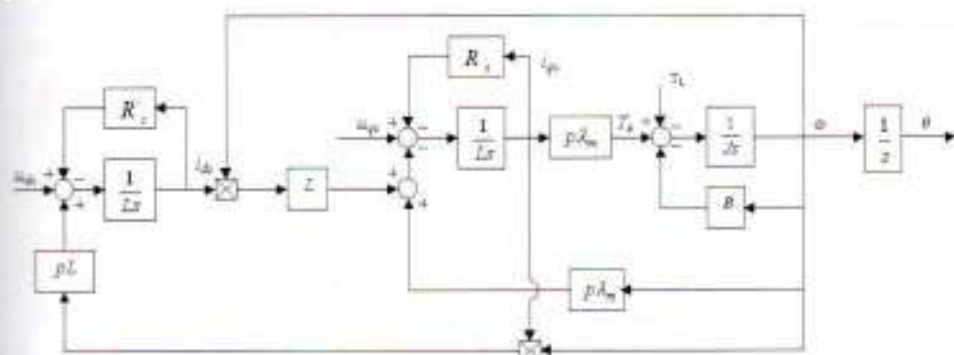


Figure 2 The block diagram of brushless DC motor with d, q domain

From the above block diagram we can see that the electrical Torque (T_e) depends only on the i_q s. If i_{ds} is forced to be zero, all we have is the right hand part of the motor model, which lie in the dash rectangle. Since the i_{ds} is the output of our state space equation, it can be controlled to be zero.

4 Gripper Model

From Figure 2, we can see that if i_{ds} is forced to zero, we will obtain the lock diagram which lies in the dash area. This block diagram is nothing else but the electromechanical model of the common DC motor. One more time the block diagram is illustrated in the following figure.

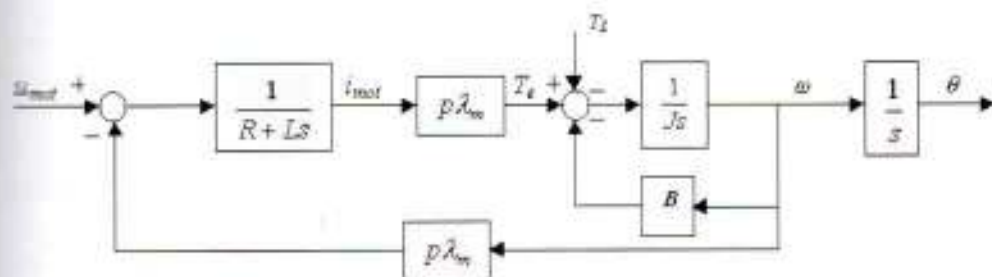


Figure 3 The simplification of the brushless DC motor, where the i_{ds} is equal to zero.

The i_q becomes the motor current i_{mot} and the u_q becomes the motor input voltage u_{mot} .

Since the value of the Ls is very small compared to the resistance (R), the transfer function $1/(Ls+R)$ is reduced to $1/R$. Thus the equation for i_{mot} becomes

$$i_{mot} = \frac{u_{mot} - p\lambda_m\omega}{R} \quad (31)$$

PWM Servo Amplifier

The built-in PWM servo amplifier provides current, which is related to the motor current. Since i_{mot} is the only current needed to drive the electrical torque (T_e), we can imply that the actual current from the PWM can be referenced as i_{mot} . The current provided by the PWM is proportional to the PWM input voltage with a transconductance gain of IA/IV input⁽³⁾.

The motor current is determined by the input voltage of the amplifier. Therefore we have

$$i_{mot} = g_{mot} u_{in} \quad (32)$$

where g_{mot} is the amplifier transconductance gain, and u_{in} is the input voltage of the amplifier. From the block diagram above, the equation of u_{mot} is

$$u_{mot} = i_{mot} R + p \lambda_m \omega \quad (33)$$

Let us express $k_e = p \lambda_m$. Equating the Eq.(32) to Eq.(33), we obtain following equation

$$u_{mot} = g_{mot} R u_{in} + k_e \omega \quad (34)$$

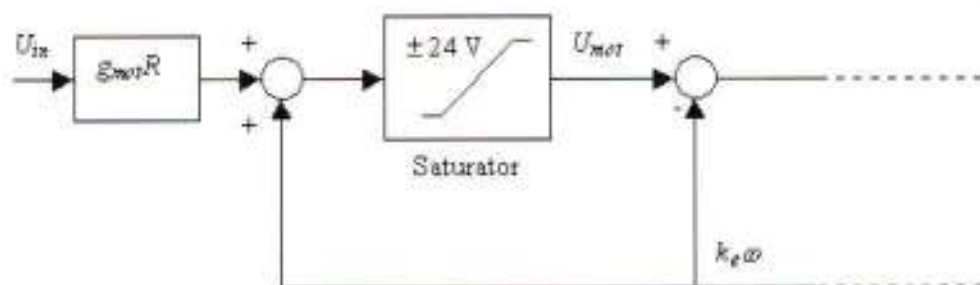


Figure 4 The gripper amplifier model

The maximum voltage allowed for the motor is 24 V (see appendix 3). Because of this saturation we have:

$$\begin{aligned} u_{mot} &= g_{mot} R u_{in} + k_e \omega & \text{for } u_{mot} < 24 \text{ V} \\ u_{mot} &= 24 \text{ V} & \text{for } u_{mot} > 24 \text{ V} \end{aligned} \quad (35)$$

This is clearer with the block diagram shown in figure

Motor Transformation

The transformation of the gripper is split into two parts: the translation from the motor-shaft to the ball-bearing rotation spindle, and from the spindle to the finger-fastening block. The transformation from the motor-shaft to the ball-bearing rotating spindle comes to pass with a belt. The transformation ratio is

$$\frac{\varphi_r}{\varphi_m} = \frac{1}{4.5} \quad (36)$$

And the transformation from the spindle to the finger-opening

$$\frac{D_v}{\varphi_s} = \frac{2}{\pi} \text{ mm/rad} \quad (37)$$

The total transformation n from the motor-shaft to the finger opening is

$$n = \frac{D_v}{\varphi_m} = \frac{9}{4\pi} = 0.141 \text{ mm/rad} \quad (38)$$

The Torque Load

Before the gripper grip an object, the force applied by the fingers is zero. After gripping an object there is force which works on the gripper. Because the workspace of the gripper (the finger opening) only about 10 cm maximum, and to simplify the model it is assumed that any object has its own elasticity constant. So, the force that applied by the finger is:

$$F = k_s D \quad (39)$$

where k_s is the spring constant of the object being gripped, and D is the distance difference of the initial and the final position of the finger.

To generate gripforce, the motor has to increase the torque. The load can be modeled as the direct torque load of the motor. Therefore

$$T_L = nF \quad (40)$$

Since the systems of the gripper such as: rotor, belt, spindle, screw, is not frictionless, the torque load becomes larger than that of the Eq.(40). There is a factor that presents the efficiency of the mechanical system. The total load torque becomes

$$T_L = \eta nF \quad (41)$$

The value of the η is not measured yet. Because of the quality of the gripper mechanical part (this gripper is bought ten years ago), it is difficult to measure this value, and therefore it is estimated by 70%. If $k_m = k_r = p\lambda_m$, then the final model of the gripper can be given as illustrated in Figure 5.

In order to design a proper controller, the gripper model is linearized. Therefore the unlinear parts is removed from the model, and the linearized transfer function is:

$$\frac{F_{out}(s)}{U_m(s)} = \frac{g_{nom} k_{nom} \eta}{n} \cdot \frac{\frac{k_s n^2}{J\eta}}{s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{k_s n^2}{J\eta}} \quad (42)$$

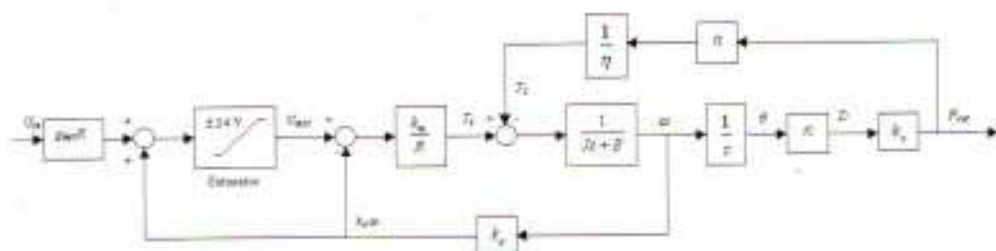


Figure 5 The gripper model

or

$$\frac{F_{out}(s)}{U_{in}(s)} = K_g \frac{\omega_g^2}{s^2 + 2\zeta_g \omega_g s + \omega_g^2} \quad (43)$$

where

$$K_g = \frac{g_{mot} k_{mot} \eta}{n} \quad K_g = \frac{g_{mot} k_{mot} \eta}{n}$$

5 Conclusion

The gripper model later, in many cases is integrated with sensors and actuators. The transfer function of the gripper (equation 43), is integrated with transfer function of sensors, actuators and controllers, and become the transfer function of the grasping system. This grasping system transfer function is used to conduct the simulation of the grasping system. The influence of nonlinearities in the gripper in many cases is compensated by the controller.

6 References

- [1] E.G.M. Holweg, "Autonomous Control in Dexterous Gripping", Ph.D. Thesis, Control Laboratory, Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, ISBN: 90-9009962-x, 1996.
- [2] E.A. Lomonova, and J.B. Klassens, "Electrical actuators for mechatronic applications", Delft University of Technology, Control laboratory report, October 1998.
- [3] Paresh C. Sen, "Electric Motor Drives and Control - Past, Present and Future," 0278-046/90/1200-0562\$01.00 © 1990 IEEE.
- [4] Timothy M. Rowan and Russel J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters," IEEE Transaction on Industry Application, VI. IA-22, No. 4, July/August 1996.
- [5] M.T.P. Surapati, "Toolboxes of Permanent Magnet Brushless Motor for Aircraft On-Board Applications", Delft University of Technology, Control Laboratory, Master thesis, March 1999.

Pengaruh Kondisi Air Terhadap Laju Korosi pada Baja Tulangan

Bambang Hari Prabowo, Lela Mukmilah

Jurusan Teknik Kimia

Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani

e-mail: bhpujtk@yahoo.co.id

Abstrak. Penggunaan logam sebagai bahan konstruksi, perlu diketahui seberapa cepatkah suatu logam itu rusak atau tidak berfungsi karena korosi. Maka dari itu dibutuhkan pengendalian korosi agar bahan konstruksi dapat berfungsi maksimal.

Banyak faktor yang menyebabkan kegagalan suatu struktur beton diantaranya kekuatan ikatan atau kuat lekat (*bonding strength*) antara beton dan tulangnya sendiri. Penurunan kekuatan ikatan beton dengan tulangnya dapat terjadi bila pada permukaan baja tulangan yang digunakan sebelum atau setelah dilakukan pengecoran terdapat kotoran berupa deposit korosi, tanah, minyak pelumas dan lain-lain.

Pada penelitian ini, dilakukan perendaman selama beberapa waktu pada baja tulangan di berbagai kondisi air digunakan sebagai cara untuk mengukur laju korosi pada baja tulangan konstruksi beton, karena air adalah salah satu komposisi utama untuk tercampurnya beton, yang akan memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pengerjaan beton. Sehingga dari usaha ini, diharapkan dapat diketahui kondisi air yang dipakai untuk pembuatan beton bertulang, dengan mempertimbangkan dampak yang akan dialami oleh baja tulangan di dalam beton tersebut.

Hasil dari penelitian yang diperoleh, laju korosi tertinggi terdapat pada air laut (air yang banyak mengandung ion klorida) sebesar 5,523 mpy pada sampel yang diberikan *stress* (ditekuk). Sedangkan laju korosi terkecil terdapat pada air sungai sebesar 0,221 mpy pada sampel *non stress*.

Kata kunci : Laju korosi, Baja tulangan, Bonding strength, Kondisi air dan mpy

1 Pendahuluan

Bahan konstruksi pada umumnya terbuat dari logam, baik untuk alat industri kimia, industri otomotif dan konstruksi bangunan. Bahan ini akan berinteraksi dengan berbagai lingkungan (udara dan air), pada saat berinteraksi logam ini akan terkorosi. Dalam penggunaan logam sebagai bahan konstruksi perlu diketahui seberapa cepatkah suatu logam itu rusak atau tidak berfungsi karena korosi. Maka dari itu dibutuhkan pengendalian korosi agar bahan konstruksi dapat berfungsi maksimal. Laju korosi yang kecil akan memperpanjang waktu pemakaian bahan konstruksi dan lebih ekonomis.

Umur bahan konstruksi dapat diprediksi, diantaranya berdasarkan pengaruh lingkungan atau medium. Pada lingkungan agresif, laju korosi lebih tinggi terutama pada lingkungan asam. Bagaimanapun laju korosi merupakan salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam pemilihan logam. Dalam bidang perekayasaan, sifat mekanis benda kerja umumnya merupakan salah satu batasan atau kriteria pemilihan logam. Pada situasi yang demikian, ada beberapa kemungkinan dalam melakukan pemilihan logam dari beberapa logam yang telah memenuhi syarat mekanis (misalnya: kekuatan (*strength*), keuletan (*ductile*), kekerasan (*hardness*), dan ketangguhan).

Oleh karena itu, biasanya dalam bidang rekayasa sukar mendapatkan benda kerja yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi dalam lingkungan.

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan bahan yang disebabkan oleh reaksi terhadap lingkungan disekitarnya, sebagai suatu gejala alami yang merupakan konsekuensi logis dari siklus kehidupan. Dengan kata lain, korosi merupakan suatu proses yang akan terus berlangsung dan tidak akan berhenti. Proses korosi didasarkan pada reaksi elektrokimia, yaitu larutnya logam atau adanya perpindahan elektron yang masuk ke lingkungan dan keluarnya gas hidrogen. Korosi tidak dapat dihentikan, tetapi hanya dapat dicegah atau dihambat laju korosinya. Oleh karena itu, untuk memperpanjang umur benda kerja yang terbuat dari logam perlu dicarikan sistem penanganan korosi.

Dampak lingkungan (air), terhadap ketahanan logam adalah salah satu aspek penting pada sistem penanganan korosi. Pada saat baja dan logam paduan lain yang merupakan bahan logam, berada di lingkungan air, maka reaksi korosi akan segera terjadi atau berlangsung. Laju korosi relatif terhadap komposisi air, yaitu keadaan netral, mengandung pengotor yang larut atau komponen yang dapat memicu dan meningkatkan laju korosi (lingkungan agresif).

Baja tulangan ialah bahan logam yang biasa digunakan pada proses pengecoran konstruksi bangunan, yang berbentuk batang silinder dengan corak dari kawat ulir dan polos. Baja tulangan termasuk kedalam golongan baja karbon rendah karena kandungan karbonnya antara 0,08 % - 0,25 %. Baja tulangan merupakan material logam yang relatif tahan terhadap korosi, tergantung dari komposisi logam yang terkandung di dalamnya. Berdasarkan sifat mekanik memiliki kekuatan (*strength*), keuletan (*ductile*), kekerasan (*hardness*) dan ketangguhan yang baik.

Pada penelitian ini akan dilakukan perendaman benda kerja pada lingkungan air untuk mengetahui laju korosi yang terjadi pada baja tulangan konstruksi beton. Pada penelitian ini bahan dan medium dibatasi, yaitu:

- Berbagai jenis air (sumur, hujan, PAM, air laut, air sungai)
- Baja tulangan dengan diameter 10 mm.

Analisis yang akan dilakukan untuk pengukuran laju korosi adalah dengan metoda kehilangan berat per satuan luas dan waktu.

2 Metoda dan Hasil Penelitian

Metoda penelitian ditunjukkan pada gambar 1, sedangkan hasil penelitian ditunjukkan sebagai berikut:





Gambar 1 Skema diagram alir tahap penelitian

Tabel 1 Laju korosi pada benda kerja non stress

Waktu peredaman	Lama peredaman (jam)	Jenis air	Laju korosi (mpy)
12 hari	303	hujan	1,046
		sumur	1,046
		laut	1,046
		sungai	0
		PAM	0
24 hari	573.5	hujan	1,6576
		sumur	1,105
		laut	1,657
		sungai	0
		PAM	0,552
36 hari	861.5	hujan	2,206
		sumur	1,103
		laut	2,206
		sungai	0
		PAM	0,735
48 hari	1149	hujan	2,482
		sumur	1,379
		laut	2,482
		sungai	0,276
		PAM	0,827
60 hari	1434	hujan	2,209
		sumur	1,105
		laut	2,430
		sungai	0,221
		PAM	0,663

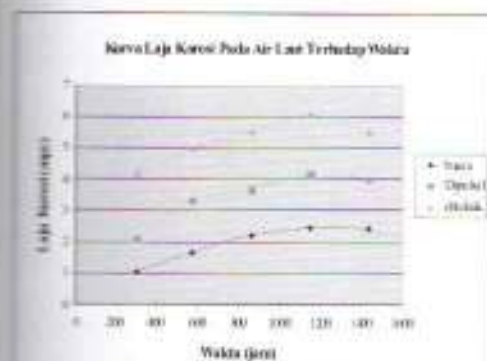
Tabel 2 Laju korosi pada benda kerja yang diberi tegangan

Waktu perendaman	Lama perendaman (jam)	Jenis air	Laju korosi (mpy)
12 hari	303	hujan	2,091
		sumur	1,046
		laut	2,091
		sungai	0
		PAM	1,046
24 hari	573.5	hujan	2,762
		sumur	1,657
		laut	3,314
		sungai	0
		PAM	1,105
36 hari	861.5	hujan	2,942
		sumur	1,839
		laut	3,677
		sungai	0,368
		PAM	1,103
48 hari	1149	hujan	3,033
		sumur	2,206
		laut	4,136
		sungai	0,827
		PAM	1,379
60 hari	1434	hujan	2,872
		sumur	1,988
		laut	3,977
		sungai	0,663
		PAM	1,326

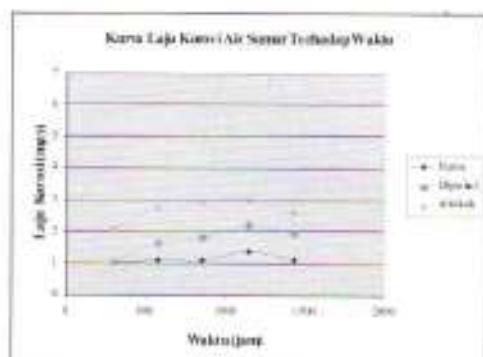
Tabel 3 Laju korosi pada benda kerja yang diberi tegangan

Waktu peredaman	Lama peredaman (jam)	Jenis air	Laju korosi (mpy)
12 hari	303	hujan	3,137
		sumur	2,091
		laut	4,182
		sungai	1,046
		PAM	2,091
24 hari	573.5	hujan	3,315
		sumur	2,762
		laut	4,972
		sungai	1,105
		PAM	2,210

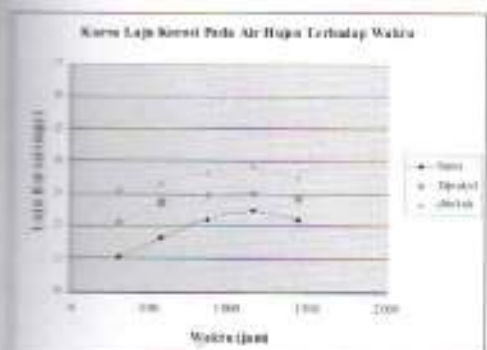
36 hari	861.5	hujan	3,677
		sumur	2,942
		laut	5,516
		sungai	1,471
		PAM	2,206
48 hari	1149	hujan	3,860
		sumur	3,033
		laut	6,066
		sungai	1,930
		PAM	2,482
60 hari	1434	hujan	3,535
		sumur	2,651
		laut	5,523
		sungai	1,767
		PAM	2,209



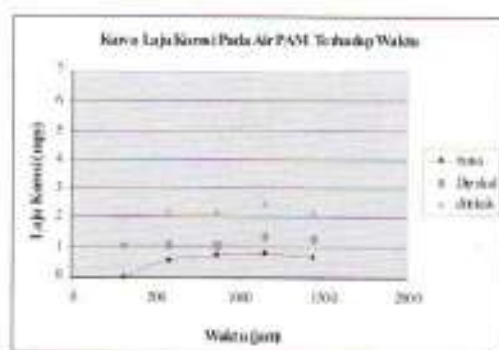
(a)



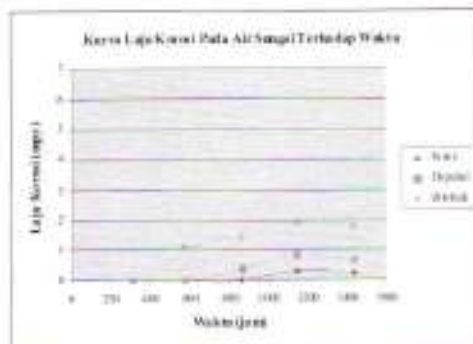
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 2 Kurva laju korosi pada berbagai media; (a) air laut (b) air sumur (c) air hujan (d) air PAM (e) air sungai



(a)

(b)

(c)

Gambar 3 Kondisi akhir baja setelah dibersihkan: (a) biasa, (b) dipukul, (c) ditekuk

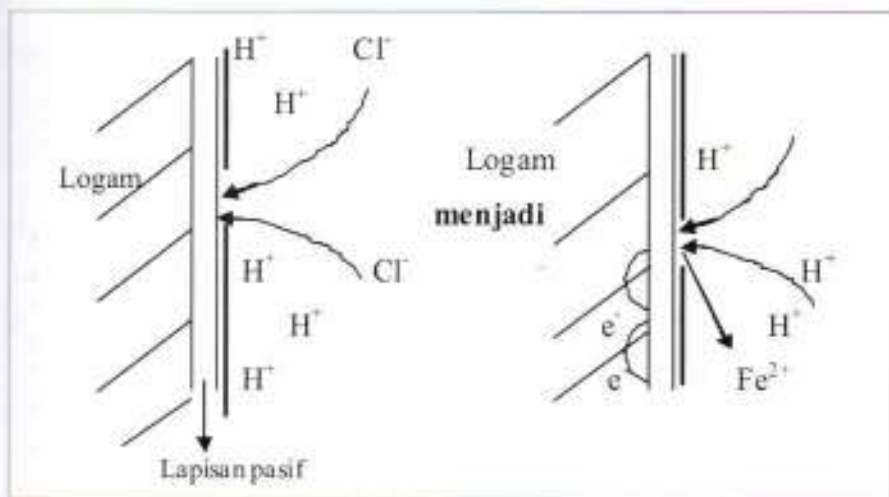
3 Pembahasan

Dari penelitian yang telah kami lakukan, dengan menggunakan beberapa variasi perlakuan pada benda kerja dan jenis air perendam (masing-masing sebanyak 250 ml). Diperoleh laju korosi baja terus meningkat setiap harinya, seperti yang bisa dilihat pada hasil penelitian. Namun laju korosi ini memiliki titik optimum pada perendaman dihari ke-48 dan diperoleh hasil akhir pada hari ke-60, dimana laju korosi terhambat oleh lapisan karat sebagai lapisan barrier yang menghalangi reaksi elektrokimia.

Diantara variasi perlakuan pada benda kerja, diperoleh bahwa benda kerja yang diberikan stress dengan cara ditekuk, memiliki laju korosi yang paling besar jika dibandingkan dengan non stress dan dipukul. Pengaruh diberikannya stress pada benda kerja menyebabkan stuktur atomnya berubah, akibatnya ada dislokasi dan menjadi terbuka, sehingga permukaan benda kerja lebih mudah terserang ion agresif. Permukaan benda kerja yang lebih terbuka (dalam hal ini lapisan pasif logam), mengakibatkan benda kerja akan lebih mudah terserang korosi. Air yang dipakai untuk perendaman, yang paling mempengaruhi laju korosi adalah air laut dengan besarnya laju korosi adalah 5,523 mpy, yang kemudian air hujan sebesar 3,535 mpy, air sumur 2,651 mpy, air PAM 2,209 mpy, dan air sungai 1,767 mpy.

Air laut memiliki agresivitas terhadap logam yang sangat tinggi karena memiliki kandungan ion Cl⁻ yang sangat tinggi, dimana ion Cl⁻ ini sangat agresif terhadap logam, ion ini dapat merusak lapisan pasif pada logam sehingga dapat mempercepat terjadinya

proses korosi. Ion klorida ini dapat menyebabkan terjadinya korosi sumuran, dan pada proses selanjutnya akan mendalamkan sumurnya.



Gambar 5 Skema terjadinya proses korosi

Laju korosi terbesar kedua adalah air hujan, karena pada perjalanan air hujan jatuh ke bumi, air menyerap partikel-partikel yang ada di udara, yang berasal dari emisi gas buang kendaraan bermotor, gas buang dari industri dan lain-lain, yang menyebabkan polusi (tingkat kekotoran lingkungan) seperti CO_2 , CO , NO_x , SO_x dan lain-lain, yang menyebabkan air hujan sekarang ini bersifat cenderung asam dan korosif terhadap logam.

Air sumur tergantung pada tanah tempat air itu berada, bila tanah mengandung banyak kapur maka akan sadah dan mengandung mikroba, air sumur juga menyerap gas-gas serta bahan-bahan organik seperti CO_2 , H_2S , NH_3 dan lain-lain, sehingga terdapat banyak pengotor. Korosifitas air sumur akan lebih kecil dibandingkan dengan air laut.

Air sungai merupakan air permukaan dimana kandungan zat terlarutnya tergantung pada komposisi air yang mengalir (apakah banyak zat pencemar atau tidak). Kandungan mineral pada air sungai jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan air laut, sehingga agresivitasnya lebih rendah jika dibandingkan dengan air laut. Selain itu, faktor pH berpengaruh juga terhadap laju korosi, karena larutan yang bersifat asam akan mempercepat terjadinya proses korosi, yang disebabkan oleh banyaknya ion H^+ . Hal ini telah dibuktikan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dimana konsentrasi pada larutan 4 molar lebih korosif dibandingkan dengan larutan 2 molar. Logam sangat mudah bereaksi dengan ion H^+ (asam) dan adanya O_2 yang larut dari udara. Korosi pada keadaan ini akan berlangsung cepat walau pada temperatur rendah, karena telah terjadi reaksi elektrokimia.

4 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat ditarik kesimpulan antara lain:

1. Laju korosi tertinggi pada lingkungan air laut yang diberi stress dengan laju 5,523 mpy, walaupun pH nya netral tetapi air laut banyak mengandung unsur ion klorida (Cl).
2. Ion klorida adalah unsur yang paling agresif, dan keberadaannya pada kandungan air akan mempercepat laju korosi.
3. Pemberian stress pada benda kerja / logam dapat mempercepat laju korosi.
4. Besarnya laju korosi dalam media air, selain ditentukan dari nilai pH, juga dari kandungan mineral dalam air.

5 Daftar Pustaka

1. Ardjo, Durban Latief. Korosi dan Prinsip-Prinsip Korosi. Bandung : Institut Teknologi Bandung. 1986.
2. Budiman, Frans. Korosi Majalah Ilmiah dan Teknologi Vol 1, No 2. Jakarta Pusat: PT Zindo Utama. 1979.
3. Dipohusato, Istimawan. Struktur Beton Bertulang. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama. 1999.
4. Fontana, Mars G. Corrosion Engineering. McGraw-Hill. New York. 1978.
5. Jones, Denny A. Principles and Prevention of CORROSION. Macmillan Publishing Company. New York. 1992.
6. Mulyono, Tri. Teknologi Beton. Yogya : Andi Yogyakarta. 2003.
7. Nawi, Edward G. BETON BERTULANG Suatu Pendekatan Dasar. Jakarta : CV Refika Aditama. 1993.
8. Roberge, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill. New York. 1999.
9. Supardi, H Rahmat. Korosi. Bandung : Tarsito. 1997
10. Supriyadi. Pendidikan dan Latihan Casting Teknologi for Supervisor "Unsur Paduan dan Pengaruhnya". Bandung : Balai Besar Logam dan Mesin. 2006.
11. Trethewey, KR.dkk. KOROSI untuk mahasiswa dan rekayasawan. PT.Gramedia Pustaka Utama Jakarta. 1991.
12. Widharto, Sri. Karat dan Pencegahannya, Edisi 1. Jakarta : PT.Pradnya Paramita. 1999.

Implementasi Algoritma Koreksi *Differential GPS* Dengan Metode Diferensial Tunggal Secara *Post-Processing*

Pujo Laksono

Magister Game Technology

STEI - ITB

e-mail: L4ks0n0@yahoo.com

Abstrak. Dengan adanya perbedaan klasifikasi pada alat, serta kesalahan-kesalahan alami serta teknis pada sistem GPS, maka dibutuhkan sebuah metode untuk meningkatkan akurasi untuk aplikasi-aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi. Dalam hal ini, metode koreksi DGPS dengan diferensial tunggal menawarkan solusi yang dapat memberikan hasil yang memuaskan. Penelitian ini berisi studi menyangkut implementasi serta kelayakan metode koreksi DGPS di lapangan untuk aplikasi statis dengan pengolahan data *post-processing*.

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan studi referensi, kemudian eksplorasi terhadap alat yang digunakan, dalam hal ini pesawat GPS kelas-A dan pesawat GPS kelas-B. Setelah pemahaman terhadap alat tercapai, dilakukan implementasi dan pengujian terhadap metode koreksi DGPS ini sehingga akan dapat dianalisis mengenai tingkat akurasi serta kelayakan dari penerapan metode koreksi DGPS dengan diferensial tunggal.

Kata kunci : *diferensial GPS, diferensial tunggal, post-processing.*

1 Pendahuluan

GPS (*Global Positioning System*) adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang sudah banyak diaplikasikan, terutama bagi aplikasi-aplikasi yang membutuhkan informasi tentang posisi. Seiring dengan dihilangkannya kesalahan yang disengaja (*S/A - Selective Availability*) pada tahun 2000 untuk pesawat GPS sipil di seluruh dunia, maka kesalahan yang tersisa berarti hanyalah kesalahan teknis dan juga kesalahan alami. Selain kesalahan-kesalahan tersebut, terdapat faktor lain yakni terdapatnya tiga buah kelas pada pesawat penerima GPS, di mana masing-masing kelas memiliki tingkat akurasi sendiri.

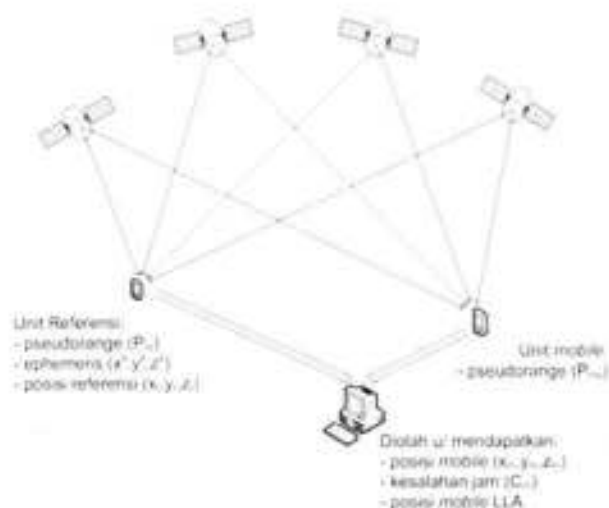
Metode koreksi DGPS dengan diferensial tunggal menawarkan perbaikan akurasi yang baik dengan cara membandingkan parameter-parameter tertentu antara sebuah GPS kelas lebih rendah dengan pesawat GPS yang lebih tinggi. Metode koreksi DGPS ini tidak terlalu kompleks, menawarkan akurasi yang dapat diterima (1-10 meter), serta dapat diaplikasikan dengan kriteria-kriteria yang tidak terlalu mengikat. Derau yang dihasilkan oleh metode ini juga tidak terlalu besar. Selain itu, metode koreksi diferensial GPS dengan diferensial tunggal ini memiliki prospek untuk diterapkan pada suatu wilayah tertentu karena sederhana serta biaya yang dibutuhkannya lebih rendah.

2 KOREKSI DGPS

Empat data yang dibutuhkan untuk menjalankan algoritma koreksi ini yaitu:

1. Posisi yang "diketahui" pada pesawat referensi : x_r, y_r, z_r (ECEF XYZ).
2. Koordinat posisi x_s, y_s, z_s dari semua satelit pada waktu transmisi sinyal.

3. *Pseudorange* yang diukur dengan pesawat referensi: $P_{rs} (s = 1, \dots, n; n \geq 4)$.
4. *Pseudorange* yang diukur dengan pesawat bergerak: $P_{ms} (s = 1, \dots, m; m \geq 4)$.



Bila jarak antara pesawat bergerak dengan pesawat referensi di bawah 50 km, kesalahan jam satelit, bias ionosfer, dan bias troposfer hampir sama besarnya untuk kedua pesawat dan saling meniadakan dalam penghitungan diferensial tunggal. Terdapat empat besaran yang dicari solusinya yaitu: koordinat X_m, Y_m, Z_m , dan kesalahan jam (*clock*) $C_m - C_r$. Model perhitungan kesalahan berikut ini yang dipakai dalam penentuan posisi:

$$P_{ms} + C_m + E_{ms} = R_{ms}$$

$$P_{rs} + C_r + E_{rs} = R_{rs}$$

Dengan mengurangkan kedua persamaan tersebut, diperoleh:

$$[P_{ms} - P_{rs}] + [C_m - C_r] + E_{rms} = [R_{ms} - R_{rs}]$$

Dengan Erms gabungan kesalahan diferensial yang tersisa, seperti kesalahan model, *multipath*, dan derau pesawat. Penyelesaian untuk besaran yang tidak diketahui X_m, Y_m , dan Z_m akar kuadrat untuk R_{ms} dilinearkan menjadi:

$$\begin{aligned} & [P_{ms} - P_{rs}] + [C_m - C_r] + E_{rms} \\ & = R_{rms0} + \left\{ \frac{(X_{ms0} - X_s)}{R_{ms0}} \right\} \cdot dX_m + \left\{ \frac{(Y_{ms0} - Y_s)}{R_{ms0}} \right\} \cdot dY_m \\ & + \left\{ \frac{(Z_{ms0} - Z_s)}{R_{ms0}} \right\} \cdot dZ_m - R_{rs} \end{aligned}$$

Dengan penyusunan ulang diperoleh:

$$\{(X_{ro} - X_r) / R_{ro}\} * dX_r + \{(Y_{ro} - Y_r) / R_{ro}\} * dY_r + \{(Z_{ro} - Z_r) / R_{ro}\} * dZ_r - C_{ro} = P_{ro} - R_{ro} + E_{ro}$$

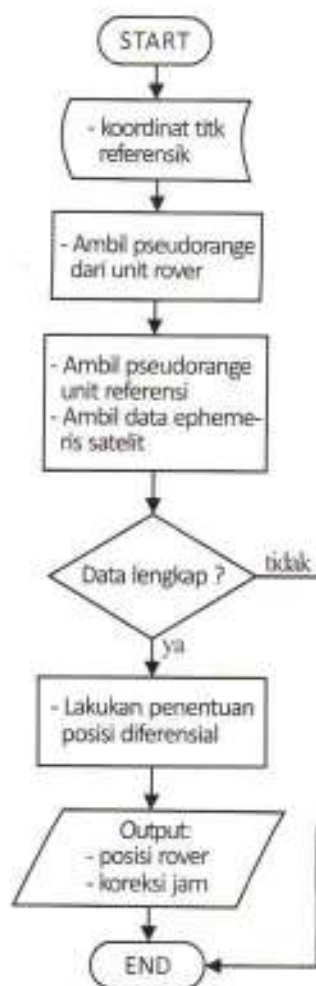
Dengan:

$C_{ro} = C_r - C_r$, kesalahan jam diferensial

$P_{ro} = P_{ro} - (P_r - R_r)$, pengamatan *pseudo-range* terkoreksi diferensial.

3 Implementasi

Untuk pengimplementasiannya, sistem koreksi DGPS ini akurat untuk radius 50 kilometer dari stasiun referensi. Berapa-pun pesawat GPS yang akan dikoreksi oleh metode koreksi DGPS ini hasilnya akan tetap akurat selama masih berada di dalam radius tersebut. Metode ini disebut juga sebagai metode *Local Area DGPS*. Implementasi pada sistem koreksi DGPS ini dijalankan sesuai diagram berikut:



4 Hasil Pengujian

Dari hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan di atas, terdapat beberapa analisis mengenai tingkat ketepatan pesawat GPS yang telah mengalami koreksi dengan metode diferensial tunggal serta melalui proses filtrasi. Beberapa analisis menyangkut penelitian tersebut antara lain adalah:

1. Dengan aplikasi koreksi DGPS untuk menghitung jarak relatif menunjukkan bahwa metode ini dapat menurunkan tingkat kesalahan dalam akurasi hingga 2-5 meter.
2. Apabila jaraknya cukup pendek maka data jarak yang terkoreksi juga memiliki kemungkinan terjadinya kesalahan. Untuk mengurangi terjadinya kesalahan ini, digunakan metode filtrasi.
3. Metode filtrasi berguna untuk menentukan data-data yang valid untuk diikutsertakan di dalam penentuan posisi berdasarkan metode koreksi DGPS. Metode ini dijalankan berdasarkan jumlah satelit yang terlibat di dalam pengambilan data dan berdasarkan kepada besar kesalahan pewaktuan. Salah satu faktor lain yang dapat dianalisis untuk meningkatkan ketepatan metode koreksi DGPS ini adalah menyamakan metode pengukuran *pseudorange* dari masing-masing alat.

5 Kesimpulan

Kesimpulan terhadap hasil penelitian adalah:

1. Metode koreksi DGPS dapat diimplementasikan pada sistem penentuan posisi statis dengan pengolahan data *post-processing*. Koreksi dilakukan terhadap beberapa kesalahan yang ada dalam penentuan posisi dengan menggunakan titik pusat referensi sebagai acuan koreksi. Metode koreksi DGPS dapat mengurangi kesalahan dalam penentuan posisi dengan GPS kelas-B hingga jangkauan 1-10 meter.
2. Dengan metode koreksi DGPS, ketepatan penentuan posisi dari pesawat GPS kelas-B dapat ditingkatkan hingga mendekati ketepatan penentuan posisi dari pesawat GPS kelas-A.
3. Metode koreksi diferensial untuk penentuan posisi GPS ini mendukung aplikasi lapangan dengan berbagai macam variasi, karena algoritma serta metodenya mudah untuk diterapkan.

6 Daftar Pustaka

1. Abidin, Hasanudin, Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya, cetakan kedua, Pradnya Paramita, Jakarta, 2000.
2. Farrel, Jay A., Matthew, B, The Global Positioning System and Inertial Navigation, McGraw-Hill, New York, 1999.
3. Lachapelle, G., GPS Observables and Error Sources For Kinematic Positioning, Proceedings of IAG International Symposium 107 on Kinematic Systems in Geodesy, New York, 1991.
4. Farrel, Jay A., Givargis, Tony, Experimental Differential GPS Reference Station Evaluations, Proceedings of the American Control Reference, San Diego, California, June 1999.
5. Farrel, Jay A., Givargis, Tony, Differential GPS Reference Station Algorithm – Design and Analysis, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 3, May 2000, pg. 519-531.

6. Wells, D.E., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.P. Schwarz, J.M. Tranquilla, P. Vanicek, Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton, 1986.
7. U.S. Department of Transportation, Federal Administration of Aviation - Specification for the Wide Area Augmentation System, 2001.
8. Van Dierendonck, A.J., P. Fenton and T. Ford, Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, Proceedings of the National Technical Meeting U.S. Institute of Navigation, San Diego, 1992.
9. Mikhail, E.M., Observations and Least Squares, Harper & Row, New York, 1976.
10. Dalziel, Stuart, Numerical Methods: Natural Sciences Tripos 1B Lecture Notes, Lent Term 1999, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, 1999.
11. Murison, Marc A., A Practical Method for Solving the Kepler Equation, U.S. Naval Observatory, Washington, DC, 2006.
12. <http://home-2.worldonline.nl/~samsvl/>

Penerapan Kendali Logika Fuzzy+*Proportional Integral* pada Modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2*

Wrastawa Ridwan

Jurusan Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
e-mail: r1space@yahoo.com

Abstrak. Respon *output* yang diperoleh dengan penerapan kontroler logika fuzzy adaptif pada modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2* ternyata masih kurang memuaskan yaitu *settling time* yang lambat pada saat pembebanan dan *overshoot* yang besar. Pada penelitian ini akan dirancang suatu kontrol hybrid terdiri dari kontroler logika fuzzy adaptif dan kontroler *Proportional Integral* (PI) yang digunakan untuk mengendalikan respon output dari modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2*. *Gain* Kontrol digunakan untuk mengubah sinyal kontrol sehingga didapatkan respon output dari sistem sesuai dengan yang diinginkan (*setpoint*). Penambahan kontroler integral digunakan untuk mengurangi *overshoot* yang ada. Algoritma pembelajaran yang digunakan pada sistem fuzzy adalah *gradient descent* untuk mengestimasi parameter-parameter fuzzy. Sistem akan diberi gangguan beban setelah mencapai *steady state* sebesar 0,5 volt dan 1 volt.

Dalam penelitian ini diperoleh hasil respon *output* dengan rata-rata error terkecil pada saat $K = 1,2$ dan $K_i = 0,2$ dengan rata-rata error 0,2245 Volt.

Kata kunci : *Process Control Simulator PCS 327 MK2, kontrol hybrid*

1 Pendahuluan

Process Control Simulator PCS-327 MK-2 adalah simulator analog dengan fungsi tertentu yang memakai rangkaian terpadu *operational amplifier* disusun dengan aturan sedemikian sehingga prinsip-prinsip metode kontrol proses dapat diajarkan pada level teknisi dan teknologis. Secara umum, *PCS 327 MK-2* ini terdiri dari bagian pengendali dan bagian proses. Bagian *pengendali* terdiri dari aksi kontrol integral, *derivative* dan *proportional*. Seiring dengan perkembangan teknologi pengaturan kerja sistem, maka pengontrolan sistem atau yang sering disebut pengendali terasa semakin diperlukan keberadaannya. Khususnya di bidang pengontrolan perangkat keras, baik itu berupa alat-alat elektronik maupun alat-alat mekanik, telah dikenalkan berbagai metode pengontrolan yang cukup baik untuk digunakan, salah satunya adalah pengendali logika fuzzy.

Pada penelitian ini dianalisis penerapan kontrol hybrid pada bagian proses dari *Process Control Simulator PCS-327 MK-2* sedangkan pengendalinya menggunakan *adaptive fuzzy logic* pengendali dan pengendali PI (*Proportional Integral*). Keterbatasan pengetahuan operator manusia mengenai plant yang akan diatur menyebabkan kesulitan dalam menentukan aturan-aturan dasar dalam perancangan *fuzzy logic pengendali*, sehingga dikembangkan suatu metode untuk mengidentifikasi sistem dengan menerapkan konsep inversi kausal. Sedangkan pengendali PI diharapkan dapat mengendalikan respon sistem untuk mengatasi *overshoot* yang ada pada saat pembebanan.

Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mendapatkan respon output dari plant berupa modul *Process Control Simulator PCS-327 MK2* menggunakan kontrol hybrid, yaitu *adaptive fuzzy logic controller* dan pengendali PI (Proportional Integral). Identifikasi dan desain kontrol menerapkan metode inversi kausal dan metode *gradient descent training* sebagai algoritma pembelajaran. Identifikasi dilakukan secara *online* sehingga didapatkan parameter-parameter dari model fuzzy yang nantinya digunakan sebagai acuan untuk menentukan besarnya sinyal kontrol yang diperlukan agar menghasilkan respon output yang diinginkan (sama dengan *setpoint*), terutama apabila sistem diberi gangguan beban.

Penelitian ini dibatasi pada penerapan kontrol hybrid (*adaptive fuzzy logic controller* dan pengendali PI) pada bagian proses modul *Process Control Simulator PCS-327 MK2*. Kemudian sistem akan diberi gangguan beban setelah mencapai *steady state* sebesar 0,5 volt dan 1 volt.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Fuzzy Adaptif

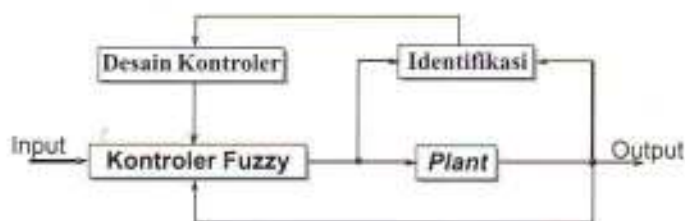
Terdapat dua cara pendekatan untuk *adaptive fuzzy controller*, yaitu *direct adaptive control* dan *indirect adaptive control* [Passino, 1997]. Dalam penelitian ini akan digunakan *indirect adaptive fuzzy controller*.

Pada *indirect adaptive fuzzy controller* dilakukan identifikasi *on line* untuk mengestimasi parameter-parameter *plant* dan bagian "*controller designer*" akan mengubah parameter dari kontroler. Jika parameter *plant* berubah, identifier akan mengestimasi *parameter plant* dan *controller designer* akan mengubah parameter kontroler. Pendekatan ini dinamakan *indirect adaptive control* karena kita mengubah kontroler secara tidak langsung melainkan terlebih dahulu harus mengestimasi parameter *plant*.

Pada *direct adaptive fuzzy controller* tidak memerlukan perantara model proses atau tahap identifikasi parameter, mendapatkan parameter kontroler secara langsung dari perbandingan aktual performansi *loop* tertutup dengan beberapa kelakuan yang diinginkan lewat indeks performansi keluaran yang menunjukkan adaptasi kontroler.

Beberapa kelebihan kontroler adaptif secara tak langsung (*indirect adaptive control*) dibandingkan pendekatan secara langsung (*direct adaptive control*) adalah:

- Pembangkitan suatu model *plant* membolehkan perubahan parameter yang terdeteksi secara tiba-tiba, sesuai dengan hasil penjejakan dari karakteristik sementara.
- Pemisahan model adaptasi dari disain kontroler, membolehkan model untuk dianalisis secara terpisah dari performansi kontroler dan kestabilan sistem.
- Spesifikasi performansi kontroler dapat diubah untuk mengakomodasi batasan-batasan yang baru.



Gambar 1 *Indirect adaptive fuzzy controller*

Identifikasi Model Fuzzy

Sistem Logika Fuzzy yang digunakan adalah menggunakan :

- *Singleton Fuzzifier*
- *Center average defuzzifier*
- Aturan penalaran produk (*produk inference engine*)
- Fungsi Keanggotaan Gaussian

Sistem Fuzzy yang akan dirancang mempunyai bentuk :

$$f(x) = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{y}^j \left[\prod_{i=1}^N \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{j=1}^M \left[\prod_{i=1}^N \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j} \right)^2 \right) \right]}$$

Parameter yang dapat diubah - ubah (*adjustable*) dari sistem logika fuzzy di atas adalah :

$$\bar{y}^j \in V$$

$$\bar{x}_i^j \in U_i$$

$$\sigma_i^j$$

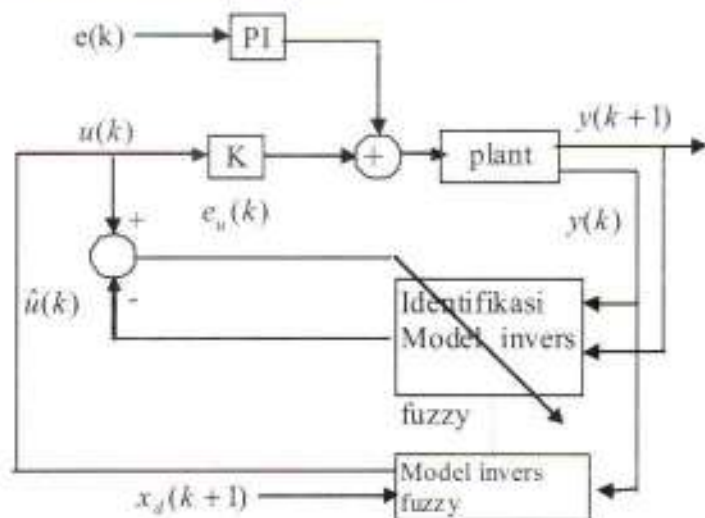
V adalah semesta pembicaraan pada keluaran, sedangkan U_i adalah semesta pembicaraan pada masing-masing masukannya. M adalah banyaknya aturan fuzzy dan N adalah banyaknya masukan. Sedangkan $f(x)$ adalah keluaran sistem fuzzy tersebut. Variabel \bar{x}_i^j dan σ_i^j ($i=1, \dots, N; j=1, \dots, M$) masing - masing adalah titik tengah dan lebar dari fungsi keanggotaan masukan. Masukan dari sistem fuzzy tersebut dinotasikan dengan x_i ($i=1, \dots, N$), sedangkan titik tengah fungsi keanggotaan di keluarannya adalah \bar{y}^j ($j=1, \dots, M$).

2.2 Kontrol Hybrid

Kontrol hybrid adalah kontrol yang menggunakan dua atau lebih pengendali dalam satu sistem. Blok diagram dari kontrol hybrid yang terdiri dari pengendali logika fuzzy *indirect adaptive* dan pengendali *Proportional Integral (PI)* secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.

Jika prosedur pemodelan fuzzy secara adaptif digunakan untuk menyediakan pemodelan proses dalam desain kontroler dilakukan secara online, maka hasilnya adalah berupa suatu pengendali logika fuzzy *indirect adaptive*. Sedangkan penambahan kontroler PI adalah untuk mengurangi *overshoot*. Persamaan kontroler PI adalah sebagai berikut.

$$U(k) = K_i * (e(k) + e(k+1))$$



Gambar 2 Diagram blok kontrol *hybrid*

Struktur kontroler ini terdiri atas dua buah umpan balik, yaitu umpan balik untuk kontroler dan umpan balik untuk *update* pemodelan plant. Umpan balik untuk kontroler menggunakan hasil observasi keluaran untuk menentukan sinyal kontrol yang dibutuhkan yang digunakan sehingga dihasilkan respon yang diinginkan, umpan balik kontroler, sedangkan umpan balik untuk *update* pemodelan proses menggunakan observasi masukan/keluaran plant untuk mengadaptasi model *invers* proses yang dibutuhkan untuk umpan balik kontroler.

3. Metode Penelitian

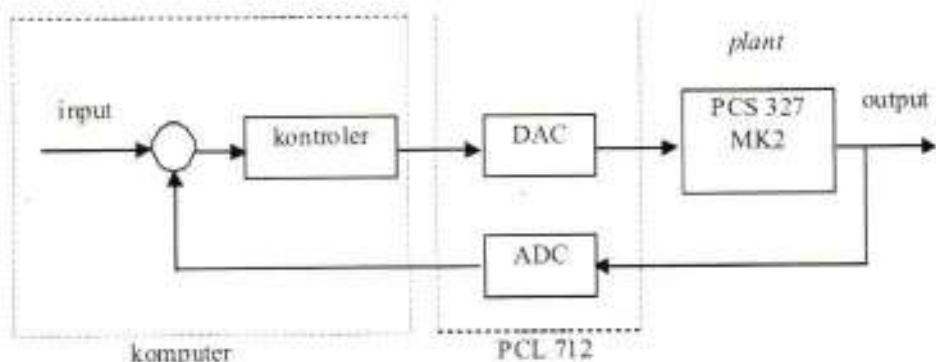
Metode pengerjaan penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap :

1. Mengumpulkan bahan literatur.
2. Mempelajari teori sistem logika fuzzy untuk identifikasi dan controller.
3. Membuat software untuk identifikasi dan controller
4. Penyiapan hardware (PCS 327 MK-2, komputer, ADC/DAC).
5. Mengumpulkan data dengan melakukan proses identifikasi sistem dan menerapkan controller pada sistem (bagian proses dari modul *Process Control Simulator* PCS 327 MK2) dengan perubahan *gain* kontrol.
6. Analisis data untuk menentukan spesifikasi respon sistem.
7. Pembuatan laporan penelitian

Penelitian ini akan dilakukan pada Laboratorium Teknik Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, khususnya pada tahap penyiapan *hardware*, pengumpulan dan analisis data.

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini berupa 1 (satu) set komputer untuk mengolah data secara *on-line*, peralatan ADC/DAC berupa multi lab Card PCL-712 dan plant yang dikontrol berupa modul PCS 327 MK2. Hubungan antar perangkat keras diperlihatkan dalam Gambar 3.

Perangkat lunak yang digunakan untuk mengimplementasikan algoritma kontrol menggunakan bahasa pemrograman C.



Gambar 3 Blok diagram perancangan sistem kontrol *hybrid*

Sebelum diterapkan pengendali logika fuzzy *indirect adaptive* perlu dilakukan proses identifikasi terlebih dahulu. Hasil dari proses identifikasi tersebut berupa parameter-parameter fuzzy yang kemudian digunakan untuk kontroler logika fuzzy adaptif. Proses pembelajarannya menggunakan algoritma *gradient descent*.

Untuk lebih jelasnya, proses perancangan kontroler logika fuzzy adaptif yang diterapkan pada modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2*, melalui algoritma sebagai berikut:

a. Algoritma identifikasi *plant*

1. Modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2* diberi masukan step sebesar 3.8 volt.
2. Menentukan jumlah *rule* ($= 30$)
3. Menentukan inialisasi parameter model invers fuzzy yaitu $\bar{x}_1^i(0), \bar{x}_2^i(0), \bar{y}^i(0), \bar{s}_1^i(0), \bar{s}_2^i(0)$ yang nantinya akan diestimasi.
4. Mengestimasi parameter-parameter tersebut dengan algoritma *gradient descent* berdasarkan data masukan/keluaran *plant*.
5. Data parameter-parameter dari langkah 4 digunakan untuk inialisasi kontroler.

b. Algoritma Kontroler *Hybrid*

1. Hasil identifikasi model *invers fuzzy* yang berupa parameter-parameter fuzzy digunakan untuk inialisasi kontroler fuzzy adaptif.
2. Gangguan beban diberikan pada saat respon *loop* tertutup dari *plant* mencapai *steady state*. Beban diberikan sebesar 0.5 volt (13,15%) dan 1 volt (26,31%).
3. Memberikan input kontrol gain (K) yang berubah kemudian menghitung *Mean Error (ME)*.
4. Pada K yang sama diberikan input kontrol *gain integral* (K_i) yang berbeda.
5. Menganalisis respon sistem untuk mengetahui karakteristik performansi sistem meliputi *time settling* (t_s) pada saat transien dan pembebanan, *maximum overshoot* (Mp) dan persen *maximum overshoot* (%Mp), *output steady state*, *error steady state* serta seberapa besar rata-rata kesalahan (*Mean Error*).

Software ini dibuat untuk menangani akuisisi data dari modul Process Control Simulator dan mengoleksi data input-output untuk identifikasi secara *online*, serta untuk implementasi pengaturan dengan kontroler hybrid (logika fuzzy adaptif dan PI).

4 Hasil Penelitian dan Pembahasan

4.1 Hasil Identifikasi Plant

Identifikasi sistem dilakukan secara *online* dengan memberikan masukan step sebesar 3,8 volt pada plant. Identifikasi yang dilakukan adalah identifikasi model *invers fuzzy* dari plant untuk mendapatkan parameter-parameter sistem fuzzy dengan menggunakan algoritma pembelajaran *gradient descent* dengan ketentuan :

Tabel 1 Parameter-parameter sistem fuzzy hasil identifikasi

Rule	\bar{x}_1^i (V)	\bar{x}_2^i (V)	\bar{y}^i (V)	$\bar{\sigma}_1^i$ (V)	$\bar{\sigma}_2^i$ (V)
1	0,6268473761	3,0500610500	3,4168127115	3,6446857694	0,0500000000
2	0,5881927408	3,0500610500	3,1784460826	3,6446857694	0,0500000000
3	0,8579908202	3,0500610500	2,4620093940	3,8796155001	0,0500000000
4	1,0618599637	3,2063492063	1,5919073582	3,8986814149	0,0500000000
5	1,6083571280	3,2063492063	1,0031400384	4,3459853749	0,0500000000
6	1,7946944795	3,3626373626	0,6514397262	4,3001862782	0,0500000000
7	2,4477608092	3,3626373626	0,3047860891	4,5940793200	0,0500000000
8	2,7516889183	3,3626373626	0,0831116144	4,3474977849	0,0500000000
9	3,0981920489	3,3626373626	-0,041106747	4,4427051556	0,0500000000
10	3,1201334242	3,5189255189	-0,186007371	4,4614273753	0,0500000000
11	3,2958200965	3,5189255189	-0,310024055	4,4977258296	0,0500000000
12	3,4360228654	3,5189255189	-0,378948859	4,3231318135	0,0500000000
13	3,5719326341	3,5189255189	-0,411089448	4,3428175513	0,0500000000
14	3,6807137855	3,5189255189	-0,437764554	4,1725253782	0,0500000000
15	3,7478390179	3,5189255189	3,7999999999	4,1790979614	0,0500000000
16	3,7486254407	3,6752139470	3,7999999999	4,2289555727	0,0500000000
17	3,7821402191	3,6752139470	3,7999999999	4,2326570255	0,0500008496
18	3,8216374798	3,6752139470	3,7999999999	4,0868048292	0,0500008496
19	3,8544592207	3,6752139470	3,7999999999	4,0881946683	0,0500008496
20	3,9177562854	3,6752139470	3,7999999999	4,0216559066	0,0500008496
21	3,9392872794	3,6799724815	3,7999999999	4,0221217483	0,0648749014
22	3,9355882148	3,8315047017	3,7999999999	4,1050773056	0,0500000000
23	3,9462880257	3,8315047017	3,7999999999	4,1053234543	0,0500089708
24	3,9700170073	3,8315047017	3,7999999993	4,0513128230	0,0500089708
25	3,9740670116	3,8315047017	3,7999999993	4,0513559643	0,0500089708
26	3,9740670116	3,8315047017	3,7999999993	4,0513559643	0,0500089708
27	3,9775356182	3,8315047017	3,7999888812	4,0513936251	0,0500089708
28	3,9980878646	3,8315047017	3,6053363235	4,0028210263	0,0500089708
29	2,8937728937	3,8315047017	3,6053363235	3,8315018315	0,0500089708
30	3,0500610500	3,8315047017	3,6053363235	0,0500000000	0,0500089708

- Jumlah rule (M) = 30, Kecepatan pembelajaran (α) = 0,5

Parameter-parameter sistem fuzzy hasil dari identifikasi dapat dilihat pada tabel 1. Parameter-parameter hasil identifikasi tersebut digunakan untuk inisialisasi parameter pada kontroler logika fuzzy adaptif secara *online*. Data parameter-parameter diatas terlihat bahwa nilai x_1 mengalami perubahan cukup besar dari rule ke 1 sampai ke 15, rule ke 16 sampai 29 tidak banyak berubah dan berubah lagi pada rule ke 30. Untuk nilai x_2 tidak mengalami perubahan setelah rule ke 22. Nilai y_2 tidak mengalami perubahan mulai rule ke 15 sampai 27 dan berubah sedikit pada rule ke 28 samapi rule ke 30. Nilai θ_1 cenderung tetap, sedangkan nilai θ_2 berubah dari rule ke 1 sampai 29 dan berubah drastis pada rule 30.

4.2 Respon Sistem Tanpa Kontroler PI

Respon keluaran setelah diimplementasikan kontroler logika fuzzy adaptif jika diberikan masukan step sebesar 3,8 volt dengan kontrol gain yang bervariasi diperlihatkan pada tabel 2 dan 3 berikut ini.

Tabel 2 Spesifikasi kontrol dengan K bervariasi, tanpa beban

Spesifikasi Gain (K)	t_s (det)	M_p (V)	O_{ss} (V)	E_{ss} (V)	Rata-rata error (V)
1,0	7,4699	0,4688	3,8315	0,0315	0,4364
1,1	7,1899	0,7814	3,8315	0,0315	0,4103
1,2	6,5899	0,9377	3,8315	0,0315	0,3873
1,3	9,9399	1,0940	3,8315	0,0315	0,3707

Tabel 3 Spesifikasi kontrol dengan K bervariasi, berbeban

Spesifikasi Gain (K)	Beban 0,5 V		Beban 1 V	
	t_{s1} (det)	t_{s2} (det)	t_{s3} (det)	t_{s4} (det)
1,0	6,0899	4,8899	6,2599	7,4699
1,1	4,6199	4,2299	5,2799	6,9199
1,2	4,0699	3,3499	4,4499	4,8899
1,3	3,2399	2,8599	3,7899	4,7799

Berdasarkan spesifikasi kontrol diatas terlihat bahwa rata-rata error untuk $K = 1,0$ paling besar disebabkan oleh *time settling* (t_s) lambat baik pada saat transien maupun pada saat pembebanan. Rata-rata error paling kecil pada saat $K = 1,3$ karena mempunyai t_s yang paling cepat pada saat pembebanan. Pada saat pembebanan, diperoleh t_s yang paling cepat pada $K = 1,3$. Namun K yang besar ini mengakibatkan t_s pada saat transien dan *maximum overshoot* menjadi besar juga.

Data diatas memperlihatkan bahwa makin besar harga K , harga M_p makin besar dan t_s pada saat pembebanan makin cepat. Diperoleh pula bahwa harga M_p dan t_s masih terlalu besar, sehingga spesifikasi ini yang akan diperbaiki dengan penerapan kontrol hybrid, dengan menambahkan kontroler PI pada sistem.

4.3 Respon Sistem dengan Kontroler Hybrid

Kontrol hybrid pada penelitian ini adalah kontrol fuzzy adaptif dan kontrol Proportional Integral (PI). Penambahan kontroler PI disini untuk mengurangi *maximum overshoot* (M_p) dan mempercepat transien, terutama pada saat pembebanan. Pada percobaan ini diberikan setpoint 3,8 volt dengan kontrol gain (K) dan konstanta integrator (K_i) yang bervariasi. Penambahan tegangan beban diberikan ketika sistem telah mencapai *steady state*.

Tabel 4 Spesifikasi kontrol untuk K_i= 0,2 dan K bervariasi

Harga K	t_r (det)	M_p (V)	E_{ss} (V)	t_d (det)	Parameter Pembebanan			Rerata Error (V)
					t_{d2} (det)	t_{d3} (det)	t_{d4} (det)	
1	2,69	0,1563	0,0315	6,1	4,51	8,79	7,14	0,3047
1,1	6,22	0,3126	0,0315	4,99	3,95	6,48	6,98	0,2929
1,2	5,43	0,4688	0,0315	3,96	3,14	4,99	4,61	0,2885
1,3	5,44	0,7814	0,0315	3,24	2,69	5,06	3,68	0,3006

Dari data diatas diperoleh, semakin besar harga K, harga t_s pada saat pembebanan makin kecil sehingga harga rata-rata error makin kecil. *Error steady state* (E_{ss}) sama untuk semua harga K. Harga M_p sebanding dengan kenaikan harga K. Diperoleh respon terbaik pada K=1,2 dengan harga rata-rata error paling kecil.

Tabel 5 Spesifikasi kontrol untuk K_i= 0,25 dan K bervariasi

Harga K	t_r (det)	M_p (V)	E_{ss} (V)	t_d (det)	Parameter Pembebanan			Rerata Error (V)
					t_{d2} (det)	t_{d3} (det)	t_{d4} (det)	
1	2,2	0,1563	0,0315	6,54	4,34	8,95	7,58	0,2876
1,1	4,23	0,3126	0,0315	5,16	3,68	7,31	6,99	0,2820
1,2	4,99	0,4688	0,0315	4,06	3,14	5,44	4,61	0,2925
1,3	5,5	0,4688	0,0315	3,35	2,85	4,22	3,68	0,2560

Dari data diatas diperoleh, semakin besar harga K, t_r pada saat transien dan M_p makin besar. Pada saat pembebanan, semakin besar harga K, semakin kecil harga t_s . Kecenderungan nilai rata-rata error makin kecil dengan kenaikan harga K. Diperoleh respon terbaik pada K=1,3 dengan harga rata-rata error paling kecil.

Tabel 6 Spesifikasi kontrol untuk K_i= 0,3 dan K bervariasi

Harga K	t_r (det)	M_p (V)	E_{ss} (V)	t_d (det)	Parameter Pembebanan			Rerata Error (V)
					t_{d2} (det)	t_{d3} (det)	t_{d4} (det)	
1	2,14	0	0,0315	6,54	4,62	9,72	7,86	0,2524
1,1	3,62	0,1563	0,0315	5,16	3,68	7,69	6,37	0,2532
1,2	3,95	0,3126	0,0315	4,18	3,13	7,10	5,00	0,2245
1,3	9,34	0	0,0315	6,1	3,68	6,87	6,37	0,3641

Dari data diatas diperoleh, semakin besar harga K , t , pada saat transien makin besar. Harga M_p relatif kecil, bahkan pada $K = 1$ dan $K = 1,3$, tidak terdapat *overshoot*. Pada saat pembebanan, semakin besar harga K , kecenderungan harga t_s semakin kecil. Kecenderungan nilai rata-rata error makin kecil dengan kenaikan harga K . Diperoleh respon terbaik pada $K = 1,2$ dengan harga rata-rata error paling kecil.

Secara umum diperoleh dari analisis respon output sistem, bahwa kenaikan harga K membuat harga t , saat transien semakin besar, harga M_p semakin besar dan harga t_s saat pembebanan semakin kecil. Kenaikan harga K_i mengakibatkan harga t_s saat transien makin besar dan harga M_p semakin kecil. Nilai t , saat pembebanan cenderung mengalami kenaikan.

Analisis data secara keseluruhan, diperoleh rata-rata error yang terkecil pada saat $K_i = 0,3$ dan $K = 1,2$.

5 Kesimpulan

1. Kenaikan harga K membuat harga t , pada saat transien semakin besar, harga M_p semakin besar dan harga t_s pada saat pembebanan semakin kecil.
2. Kenaikan harga K_i mengakibatkan harga t_s pada saat transien makin besar dan harga M_p semakin kecil. Nilai t , saat pembebanan cenderung mengalami kenaikan.
3. Secara keseluruhan diperoleh rata-rata error yang terkecil pada saat $K_i = 0,3$ dan $K = 1,2$.

Daftar Pustaka

1. Jang, J.S.R., Sun C.T., Mizutani, E., 1997, Neuro-Fuzzy Fuzzy and Soft Computing : A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, New Jersey : Prentice Hall International, Inc.
2. Landau, I.D, 1990, System Identification and Control Design Using P.I.M + Software, New Jersey : Prentice Hall International, Inc.
3. Ogata, Katsuhiko, 1997, Teknik Kontrol Automatik Jilid I, Jakarta : Erlangga.
4. Passino, Kevin M., Yurkovich, S., 1997, Fuzzy Control, New York : Addison Wesley Logman.
5. Ridwan, Wrastawa, 2007, Penerapan Adaptive Fuzzy Logic Controller Pada Modul Process Control Simulator PCS 327 MK2, Gorontalo : Penelitian Dosen Muda.
6. Wang, Li-Xin, 1997, A Course in Fuzzy Systems and Control, New Jersey : Prentice-Hall International, Inc.
7. Yan, J., Ryan, M., Power, J., 1994, Using Fuzzy Logic Toward Intelligent Systems, Cambridge : Prentice-Hall International (UK) Limited.
8., 1998, Model PCL-712 : Multi-Lab (12 bit) A/D+D/A+DIO, London : Advantech Co. Ltd.
9., 1998, Process Control Simulator PCS327 Book 1, London : Feedback Instruments Ltd.

Pengaruh Variasi Arus GMAW pada Sambungan Pipa Baja API 5L Grade B terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro

Adi Ganda P., Pawawoi

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Ahmad Yani

Abstrak. Proses pengelasan merupakan teknologi penyambungan pada logam yang sering digunakan. Metode pengelasan GMAW telah banyak digunakan secara luas pada penyambungan pipa penyalur (*pipe line*), pipa konstruksi, proses pemipaan (*piping process*), dll. Baja API 5L Grade B adalah salah satu bahan yang distandarkan oleh API untuk penggunaan/aplikasi perpipaan pada perusahaan minyak dan gas (*oil and Gas*). Dalam instalasinya dibutuhkan hasil penyambungan yang baik tanpa terbentuknya cacat pada sambungan sesuai dengan standar API. Variasi arus (100, 135 dan 160A) pada proses pengelasan GMAW akan berpengaruh terhadap *heat input* dan kelarutan (*dilution*) antara logam dasar dengan logam pengisi yang dapat menyebabkan perubahan sifat fisik dan sifat mekanik pada sambungan pipa. Kualitas/mutu sambungan dapat dikaji dengan melakukan pengujian supaya dapat diketahui sifat fisik dan sifat mekanik hasil sambungan pipa dengan variasi arus pada metoda GMAW. Metoda pengujian yang dilakukan antara lain : uji tarik, uji *nick break* dan uji lengkung, sedangkan perubahan struktur mikro dikaji dengan analisa metalografi.

Kata kunci : GMAW, API 5L Grade B, arus, *heat input*

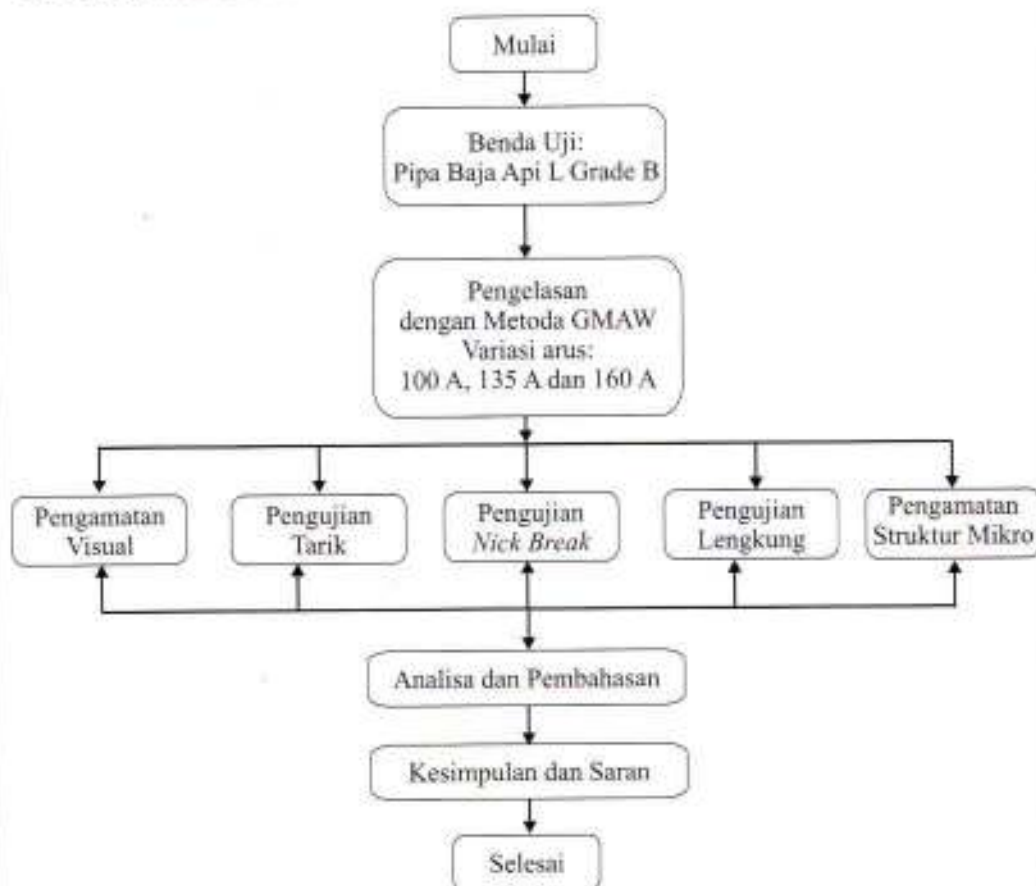
1 Pendahuluan

Dengan kemajuan yang telah dicapai sampai saat ini teknologi las memegang peran penting dalam masyarakat modern. Dari perkembangannya yang pesat telah banyak teknologi baru yang ditemukan sehingga boleh dikatakan hampir tidak ada logam yang tidak dapat dilas dengan cara yang ada pada waktu ini. Penggunaan teknik pengelasan khususnya dalam konstruksi sangat luas, meliputi konstruksi, perkapalan, jembatan, rangka baja, bejana tekan, saluran pipa, pipa penyalur dan lain sebagainya. Pipa penyalur (*pipe line*) adalah suatu alat transportasi untuk memindahkan cairan atau gas seperti minyak mentah, air, gas alam, dan lain-lain. Di samping itu juga merupakan pengganti alat transportasi darat yaitu dengan adanya saluran pipa tersebut maka biaya pengiriman dari tempat pengeboran ke tempat pengolahan menjadi lebih efisien. Pengelasan saluran pipa adalah proses penyambungan yang dilakukan di lapangan. Kenyataan di lapangan pengelasan pipa penyalur (*pipe line*) selalu menggunakan proses pengelasan SMAW (*shielded metal arc welding*) atau proses pengelasan GTAW (*gas tungsten arc welding*) padahal masih banyak sekali teknologi pengelasan logam yang dapat digunakan, misalnya proses pengelasan GMAW (*gas metal arc welding*). Proses pengelasan GMAW adalah suatu proses pengelasan busur listrik. Dalam pengelasan ini, kawat las pengisi yang juga berfungsi sebagai elektroda diumpankan secara terus menerus secara otomatis. Busur listrik terjadi antara kawat pengisi dan

logam induk. Gas pelindung yang digunakan dalam proses pengelasan ini adalah gas argon, helium atau campuran dari keduanya.

Material yang digunakan dalam pipa penyalur (*pipe line*) biasanya mengacu pada standar API (*American Petroleum Institute*). Banyak jenis material yang dapat digunakan dalam pipa penyalur dengan standar API, diantaranya jenis API 5L Grade B. Pada penelitian ini penulis menggunakan material jenis API 5 L Grade B, karena Material ini merupakan logam baja yang tidak terlalu sulit untuk dilakukan pengelasan, akan tetapi karena logam ini menjadi aktif pada suhu tinggi sehingga meningkatnya kandungan karbon dapat lebih memungkinkan untuk terbentuknya fasa martensit pada logam las yang terpengaruh panas atau HAZ (*Heat Affected Zone*). Ditambah masukan panas yang tidak sesuai maka dapat dipastikan cacat atau diskontinuiti akan terjadi.

2. Diagram Alir Penelitian



Gambar 1 Diagram alir penelitian

3 Data dan Pembahasan

3.1 Data Proses pengujian

Sambungan dan hasil pengelasan yang dilakukan pada pipa dari baja API 5L grade B diperlihatkan pada gambar 2.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2 Proses pengelasan pada pipa baja API 5L grade B

Sedangkan parameter pengelasan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter proses pengelasan pada pipa baja API 5L grade B

Benda uji	Proses	Logam Pengisi		Kuat Arus		Volt	Kecepatan W/le (cm/menit)	Kecepatan Pengelasan (cm/menit)
		Jenis	Ø (mm)	Tipe Polaritas	Ampere			
1	GMAW	ER 70S-6	0.8	DCEP	100	20	6.5	12
2	GMAW	ER 70S-6	0.8	DCEP	135	23	9.5	13
3	GMAW	ER 70S-6	0.8	DCEP	160	25	12.5	14

3.1.1 Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan setelah proses pengelasan selesai, dengan tujuan untuk melihat langsung cacat permukaan pada hasil pengelasan. Dari hasil pemeriksaan visual, ketiga pipa yang telah di las tersebut hasilnya bagus (tidak ada cacat) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Pengamatan visual yang dilakukan pada specimen 1,2, dan 3

3.1.2 Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik ditunjukkan pada Tabel 2, 3 dan 4.

Tabel 2 Data hasil uji tarik spesimen dengan arus 100 A

NO	Keterangan	I A	I B
1.	Lebar x tebal, mm	27.0 x 7.0	25.2 x 7.0
2.	Luas penampang, mm ²	189	176.4
3.	Beban ulur, kgf	7000	6000
4.	Kuat ulur, kgf/mm ² (Mpa)	37.0 (363)	34.0 (334)
3.	Beban maksimum, kgf	9600	8300
4.	Kuat tarik, kgf/mm ² (Mpa)	50.79 (498.28)	47.05 (461.58)

Tabel 3 Data hasil uji tarik spesimen dengan arus 135 A

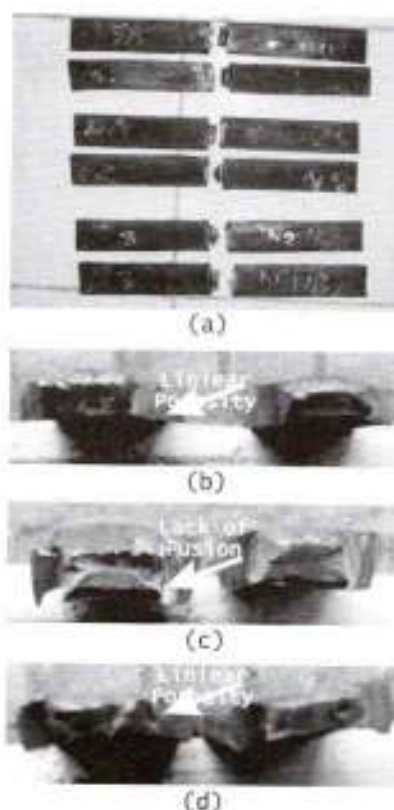
NO	Keterangan	II A	II B
1.	Lebar x tebal, mm	25.2 x 7.0	25.1 x 7.0
2.	Luas penampang, mm ²	176.40	175.7
3.	Beban ulur, kgf	6200	6400
4.	Kuat ulur, kgf/mm ² (Mpa)	35.1 (345)	36.4 (357)
3.	Beban maksimum, kgf	8900	8500
4.	Kuat tarik, kgf/mm ² (Mpa)	50.45 (495)	48.4 (475)

Tabel 4 Data hasil uji tarik spesimen dengan arus 160 A

NO	Keterangan	III A	III B
1.	Lebar x tebal, mm	26.4 x 7.0	2703 x 7.0
2.	Luas penampang, mm ²	184.80	191.10
3.	Beban ulur, kgf	6000	6000
4.	Kuat ulur, kgf/mm ² (Mpa)	32.5 (319)	31.4 (308)
3.	Beban maksimum, kgf	9400	8800
4.	Kuat tarik, kgf/mm ² (Mpa)	50.9 (499)	49.9 (489)

3.1.3 Pengujian *Nick Break*

Hasil pengujian *nick break* diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil pengujian *nick break*;

(a) spesimen hasil uji *nick break*

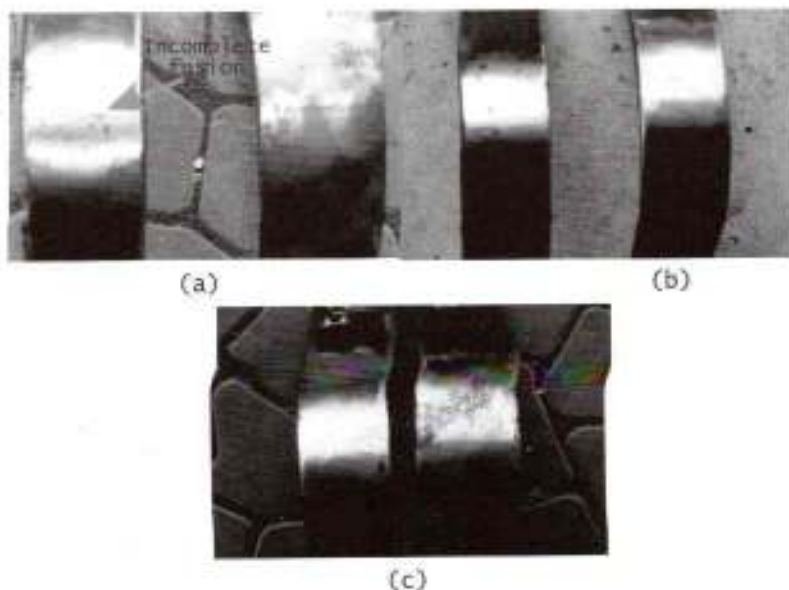
(b) permukaan patahan hasil uji *nick break* untuk arus 100 A

(c) permukaan patahan hasil uji *nick break* untuk arus 135 A

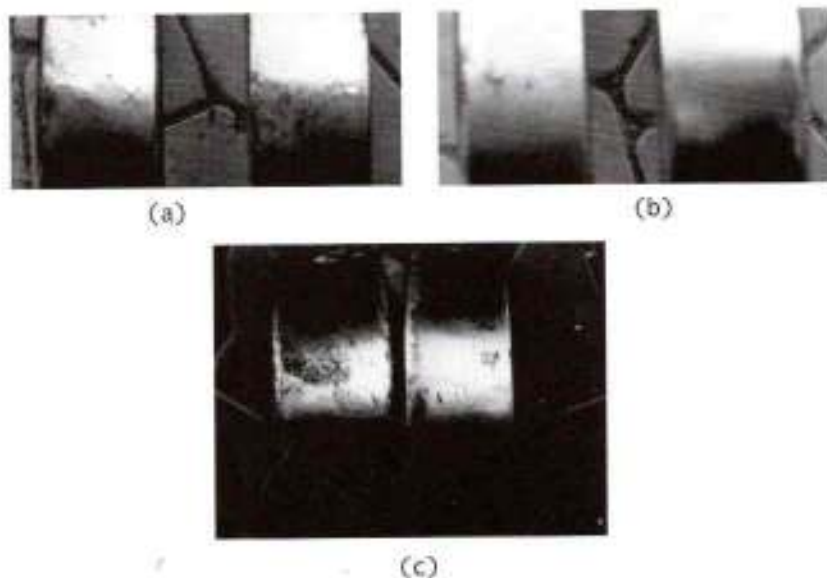
(d) permukaan patahan hasil uji *nick break* untuk arus 160 A

3.1.4 Pengujian Lengkung

Hasil pengujian lengkung diperlihatkan pada Gambar 5 untuk *face bend* dan Gambar 6 untuk *root bend*.



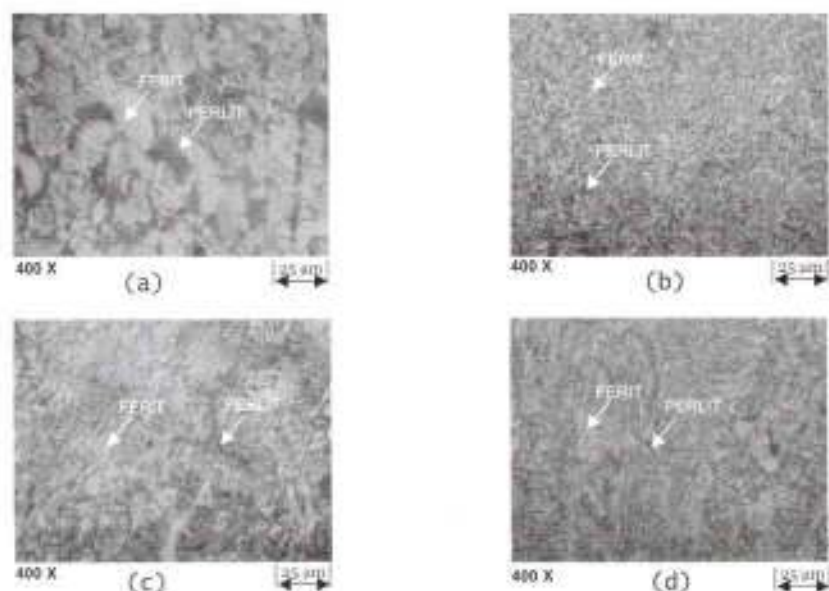
Gambar 5 Hasil pengujian lengkung *face bend* ;(a) untuk arus 100 A
(b) untuk arus 135 A(c) untuk arus 160 A



Gambar 6 Hasil pengujian lengkung *root bend* ;(a) untuk arus 100 A
(b) untuk arus 135 A(c) untuk arus 160 A

3.1.5 Pengujian Struktur Mikro

Hasil pengujian struktur mikro ditunjukkan pada Gambar 7 untuk arus 100 A.



Gambar 7 Hasil pengujian truktur mikro pipa baja API 51 grade B untuk arus 100 A ;
 (a) daerah based metal (b) daerah HAZ (c) daerah fusion line
 (d) daerah weld metal

3.2. Pembahasan

Hasil Proses las GMAW pada specimen I (100A) dan II (135 A) ini baik, itu terlihat dari pemeriksaan visual yang dilakukan secara fisik hasilnya baik, diantaranya tidak terdapat cacat porositas, cacat retak las, dan menghasilkan tembusan yang baik. Sedangkan pada specimen III (160 A) hanya terdapat dua layer, hal ini terjadi karena arus yang digunakan lebih besar sehingga secara otomatis *wire* akan semakin cepat mencair. Meskipun demikian, hasil dari pengelasan ini sangat baik, itu terlihat dari pemeriksaan visual yang dilakukan secara fisik hasilnya baik, diantaranya tidak terdapat cacat porositas, cacat retak las, dan menghasilkan tembusan yang baik.

Pada pemeriksaan Visual terhadap benda uji, tidak ditemukan cacat di permukaan benda uji yang dapat mempengaruhi hasil pengujian yang lain seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pemeriksaan secara visual

Spesimen Benda Uji	Rigi-rigi Las	Porositas	Retakan	KETERANGAN CACAT LAS		
				Under Cut (takik-takik)	Depormasi	Penetrasi
100A	Rata	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Baik
135A	Rata	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Baik
160A	Rata	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Baik

Dari ke tiga specimen yang telah di uji tarik, dapat diketahui bahwa semua specimen uji tarik putus/patah tidak pada daerah sambungan/lasan. Hal ini menunjukkan bahwa kuat tarik daerah lasan lebih besar daripada kuat tarik daerah *based metal* sehingga ketiga specimen memenuhi persyaratan uji tarik.

Dari ke tiga specimen yang telah di uji tarik, dapat diketahui bahwa semua specimen uji tarik putus/patah tidak pada daerah sambungan/lasan. Hal ini menunjukkan bahwa kuat tarik daerah lasan lebih besar daripada kuat tarik daerah *base metal* sehingga ketiga specimen memenuhi persyaratan uji tarik.

Pada uji *nick break* specimen I (100 A) terdapat cacat, *linier porosity* dengan panjang cacat 6.6 mm. Penyebab dari cacat ini adalah sebagai berikut:

1. Busur api (*arc*) terlalu pendek
2. Waktu pembekuan tidak cukup sehingga menyebabkan terperangkapnya gas dalam pengelasan.
3. Kesalahan memilih arus yang digunakan.

Cacat yang terjadi pada specimen IIA ini adalah cacat *lack of fusion* dengan panjang cacat yang terjadi adalah 20 mm. Penyebab dari cacat ini adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan pengelasan terlalu cepat sehingga mengakibatkan kurang bersatunya dagian las yang satu dengan yang lain atau logam induknya.
2. Penggunaan arus yang kurang benar karena jika arus kurang sesuai dalam pengelasan GMAW rentan terjadi kurang fusinya lasan yang satu dengan yang lain.
3. Ukuran elektroda yang tidak sesuai

Cacat yang terjadi pada specimen IIIA ini sama dengan cacat yang terjadi pada specimen IA dengan panjang cacat 6.0 mm.

Pada uji *face bend* dan *root bend* ditemukan beberapa cacat pada material uji. Pada specimen I (100 A), cacat yang terjadi adalah cacat *incomplete fusion* yang disebabkan karena arus yang terlalu kecil sehingga masukan panas tidak terlalu besar sehingga bagian logam las kurang bersatu dengan logam induk pada bagian muka atau akar dari sambungan. Juga terjadi cacat *porosity* dengan lebar cacat masing-masing adalah 2 mm dan 1.5 mm. Penyebab dari cacat *porosity* ini adalah akibat dari terlalu cepatnya pembekuan pada waktu mengelas sehingga ada gas yang terperangkap. Pada specimen IIA cacat yang terjadi sama dengan specimen I yaitu *porosity* dengan lebar cacat 3.0 mm. Sedangkan pada specimen III (160 A) tidak terdapat cacat.

Dari pemeriksaan struktur mikro tersebut di atas ternyata fasa yang dihasilkan antara specimen yang satu dengan yang lainnya adalah sama yaitu fasa ferit dan perlit.

Struktur butir yang terbentuk pada daerah HAZ mengalami perubahan struktur butir, hal ini disebabkan karena daerah HAZ mengalami pemanasan dan proses pendinginan yang cepat. Hal ini mengakibatkan butiran logam tidak banyak waktu untuk saling bergabung dengan butiran lainnya, sehingga akan terbentuk butiran yang kecil. Karena struktur butir pada daerah HAZ kecil, sehingga mengakibatkan kekuatannya dan kekerasannya menjadi lebih tinggi dibandingkan daerah base metal. Struktur mikro yang terbentuk pada daerah weld metal yang dihasilkan, bahwa pada daerah *weld metal* pernah mencair, artinya daerah ini pernah mencapai suhu yang tinggi serta mengalami proses pendinginan yang cepat, sehingga terbentuk struktur columur pada daerah lasan

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian terhadap specimen uji, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kuat tarik dari material las (benda uji) dapat berbeda-beda antara material yang satu dengan yang lainnya, hal ini karena disebabkan oleh perbedaan arus yang terjadi pada pengelasan. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian kuat tarik. Kuat

- tarik yang paling baik adalah pada arus 160 A (specimen III) dengan *heat input* 17,14 kJ/cm yaitu dengan kekuatan tarik rata-rata adalah 494 MPa.
- Uji *nick break* sangat berguna untuk melihat cacat yang terjadi di daerah lasan, itu terbukti dapat diketahui cacat yang terjadi pada daerah lasan tersebut adalah cacat lack of fusion dan cacat *linier porosity*. Cacat terjadi pada specimen I A, II A, dan III A.
 - Arus berpengaruh pada proses las GMAW. Hal ini terbukti pada specimen III (160 A) tidak terdapat cacat retak baik pada bagian *root bend* maupun *face bend*, berbeda pada uji lengkung pada specimen I (100 A) dan specimen II (135 A) yang terdapat cacat retak.
 - Variasi masukan panas sangat berpengaruh terhadap fasa-fasa yang terbentuk. Pada seluruh benda uji (*base metal*, *HAZ*, *fusion line* dan logam induk) fasa yang terbentuk sama yaitu fasa ferit dan fasa perlit. Perubahan ukuran butir ke arah lebih halus meningkat seiring dengan menurunnya masukan panas. Selain itu jumlah fasa perlit pun ikut meningkat seiring dengan meningkatnya masukan panas. Pada benda uji dengan masukan panas $HI = 10$ (kJ/cm), $HI = 14,33$ (kJ/cm) dan $HI = 17,14$ (kJ/cm) terbentuk fasa ferit berbentuk columb yang mengarah ke all weld metal.
 - Hasil dilusi yang terjadi antara material yang satu dengan yang lainnya berbeda. Semakin besar arus yang digunakan maka dilusi yang terjadi akan semakin besar. Hasil uji yang optimal didapat pada specimen III dan *heat input* 17,14 kJ/cm yaitu dengan hasil pencampuran logam pengisi dan logam induk adalah 31,11%.

5 Daftar Pustaka

- Salmon, G, Charles. Dan Johnson, E, John. "Struktur Baja, Desain Dan Perilaku", Edisi Ketiga, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992.
- Soeryanto, Eduard, MBa. "Discontinuity", Asosiasi Pengelasan Indonesia, Batam, 2000
- Sonawan, Heri. Dan Suratman, Rochim. "Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam", Alfabeta, Jln. Gegerkalong Hilir 84/88, Bandung, 2004.
- Widharto, Sri. "Inspeksi Teknik", Buku 3, Pradnya Paramita, Jln. Kebon Sirih 46, Jakarta, 2002.
- Wirjosumarto, Harsono, Prof. DR. Ir. Dan Okumura, Toshie, Prof. DR. "Teknologi Pengelasan Logam", Pradnya Paramita, Jakarta, 1979.
- "Teknologi Las – Proses", Pendidikan Dan Pelatihan Inspektur Las (Welding Inspector), B4T, 2006.
- Kenyon, W, dan Ginting, Dines, Ir. "Dasar-Dasar Pengelasan". Erlangga, Jakarta, 1985.
- Dieter, E G eorge, "Metalurgi Mekanik", Erlangga, Jakarta, 1996.
- Kosasih, Rancangan WPS dan PQR Sertifikasi Bidang Mekanikal, Kualifikasi Welding Inspektur/Supervisor, 30 September, 2000, B4T, Bandung.
- API Standard 1104, "Welding Of Pipelines And Related Facilities", 1999.
- ASME Section II, "Spesification For Welding Rods, Electrode, and Filler metals", 1998.
- ASME section IX, "Welding And Brazing Qualifications", 2001.
- AWS D1.1, "Structural Welding Code-Steel", 2002.
- Metal Handbook, Vol. 7, "Atlas of Microstructure of Industrial Alloy", 8

JURNAL TEKNIK PETUNJUK UNTUK PENULIS

Umum, Jurnal Teknik menerima artikel yang orisinal dari berbagai penelitian yang berhubungan dengan ilmu teknik metalurg dan material, teknik kimia, teknik mesin, teknik industri, teknik sipil, teknik elektro dan teknologi informasi.

Artikel yang diterima hanya yang belum dipublikasikan. Penggunaan ilustrasi atau table yang telah dipublikasikan, merupakan tanggung jawab penulis untuk perizinan dari penerbit.

Artikel dapat dikirimkan kepada redaksi:

**Drs. Danang K.
Fakultas Teknik Bandung
Jl. Gatot Subroto (Samping PT. PINDAD)
Bandung 40280**

Tiga eksemplar artikel tercetak dikirim ke redaksi Jurnal teknik yang diketik pada satu sisi halaman kertas A, (21,0 cm x 29,7 cm).

Format penulisan artikel mengikuti aturan sebagai berikut:

Batas kiri = 4 cm, batas atas = 4 cm, dengan batas tinggi pengetikan 19 cm dan batas lebar pengetikan 12,5 cm.

Ukuran huruf untuk judul 14 pt (tebal), ukuran huruf penulis 10 pt (tebal) ukuran huruf unruk alamat institusi 10 pt.

Ukuran huruf untuk abstrak dan kata kunci 10 pt, ukuran huruf untuk sub dan isi/teks 11 pt

Tipe huruf dari Microsoft word = Times New Roman

Judul dan penulis diketik dengan bentuk sebagai berikut:

Analisa Kerusakan pada Turbin *Bucket* yang terbuat dari Material *Nickel Based Alloy MAR-M-246*

Leni Juwita¹ & Mabe Siahaan²

¹Jurusan Teknik Metalurgi
Fakultas Teknik – Universitas Jenderal Achmad Yani

²LAPAN - Bandung

Panjang maksimum artikel 10 halaman termasuk gambar dan table. Gambar dibuat dalam warna hitam putih dengan kualitas yang bagus.

Abstrak dari tulisan dibuat dalm bentuk bahasa Indonesia. Panjang maksimum dari abstrak adalah 200 kata. Kata kunci (5 – 10 kata) yang mengikuti abstrak ditulis berdasarkan urutan huruf.

Daftar Pustaka di tulis dalam artikel mengikuti contoh dibawah ini:

Jurnal

1. Irawan N.M., *Judul tulisan*, Nama Jurnal 2, 10-24(1996)

Buku

2. Irawan, N. M., & Hendra T., *Judul buku*, ed. 3, Penerbit (2000)

Website

3. Nama penulis (jika ada), *Judul tulisan* (jika ada), Organisasi, alamat website, (2 Juni 1999)

Penulis yang artikelnya dimuat mendapat 2 cetak lepas, 1 eksemplar Jurnal Teknik



**JURNAL
TEKNIK
TEKNIK**

Vol. VIII, No. 1, April, 2009

DAFTAR ISI

1. Pengembangan Algoritma Penjadwalan *Preventive Maintenance* dengan Menggunakan Metoda *Nippon-Denso* dan *Analytic Hierarchy Process* di PT. Pupuk Kujang I B
Cucu Wahyudin 1
2. Modelling a Brushless DC Motor Power Source Based Two-Finger Gripper
Safreni Candra Sari 15
3. Pengaruh Kondisi Air Terhadap Laju Korosi pada Baja Tulangan
Bambang Hari Prabowo, Lela Mukmilah 25
4. Implementasi Algoritma Koreksi *Differential GPS* Dengan Metode Diferensial Tunggal Secara *Post-Processing*
Pujo Laksono 33
5. Penerapan Kendali Logika Fuzzy+*Proportional Integral* pada Modul *Process Control Simulator PCS 327 MK2*
Wrastawa Ridwan 38
6. Pengaruh Variasi Arus GMAW pada Sambungan Pipa Baja API 5L Grade B terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro
Adi Ganda P., Pawawoi 47