



VOLUME 1 NOMOR 2 OKTOBER 2002

JURNAL TEKNIK



MEDIA PENGEMBANGAN ILMU DAN APLIKASI TEKNIK

Yusuf, E., Gianti P, M. Sujatmiko, C. Wahyudin, R.J. Hamid

**APLIKASI Group Technology pada Perancangan Alat Bantu Pegang
(Fixture) Untuk Proses Pembuatan Komponen**

Wiranegara H, Abdurahman, M

Analisis Kekuatan Lelah Pegas Sekunder Bogle NT-60

Romli, A, Arcana, I.P, Budianto, A

**Pemanfaatan Proses Ultrafiltrasi dalam Peningkatan Efisiensi Proses
di Pabrik Gula**

Sabil, R, I, Wahyudin, D, Christian, D, Rizeka, Nasution

**Korelasi Antara Nilai N-SPT dengan Nilai Kohesi dan Sudut Geser
dalam Pada Tanah Lempung**

Najmurrokhman, A

**Analisis Sistem Kendali Kekoh Pada Sistem Non Linier dengan
Pendekatan Pertidaksamaan Matriks Non Linier**

Tarigan, P., Juwita, L

**Pengerasan Permukaan Baja Perkakas HSS M41
dengan Teknik Pelapisan Metal Spray**

Jahny, Sast

**Mutu : Kurangi Varian
Warisan Deming Untuk Dunia Bisnis**

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI
BANDUNG - CIMAHI**



- | | |
|---|-----|
| Yusuf, E., Gianti P, M. Sujatmiko, C. Wahyudin, R.J. Hamid
APLIKASI Group Technology pada Perancangan Alat Bantu Pegang
(Fixture) Untuk Proses Pembuatan Komponen | 56 |
| Wiranegara H, Abdurahman, M
Analisis Kekuatan Lelah Pegas Sekunder Bogie NT-60 | 63 |
| Romli, A, Arcana, I.P, Budianto, A
Pemanfaatan Proses Ultrafiltrasi dalam Peningkatan Efisiensi Proses
di Pabrik Gula | 74 |
| Sabil, R, I., Wahyudin, D, Christian, D, Rizeka, Nasution
Korelasi Antara Nilai N-SPT dengan Nilai Kohesi dan Sudut Geser
dalam Pada Tanah Lempung | 82 |
| Najmurrokhman, A
Analisis Sistem Kendali Kokoh Pada Sistem Non Linier dengan
Pendekatan Pertidaksamaan Matriks Non Linier | 89 |
| Tarigan, P., Juwita, L
Pengerasan Permukaan Baja Perkakas HSS M41
dengan Teknik Pelapisan Metal Spray | 99 |
| Jahny, Sast
Mutu : Kurangi Varian
Warisan Deming Untuk Dunia Bisnis | 107 |



VOLUME 1 NOMOR 2 OKTOBER 2002

JURNAL TEKNIK



MEDIA PENGEMBANGAN ILMU DAN APLIKASI TEKNIK

- 56 Yusuf, E., Giano, P. M., Sojandito, C., Widyandito, L. J., Hanid
APLIKASI Group Technology pada Perancangan Alat Bantu Pengerjaan
(Tugas) Teknik Proses Pembuatan Komponen
- 63 Widyandito, L. J., Abdurrahman, M.
Analisis Kinetik Laju Pengerjaan Sederhana Bagian HT-60
- 74 Romli, A., Ardana, I. F., Budianto, A.
Pembuatan Proses Ilustrasi dalam Pembuatan Elongasi Proses
di Pabrik Gula
- 82 Sabli, L. I., Widyandito, D., Christian, D., Rizka, Nasution
Kerangka Kerja Model H-2PT dengan Model Koneksi dan Substansi
dalam Peta Tanah Lempung
- 88 Nopurandito, A.
Analisis Sistem Kontrol Motor Pada Sistem Non Linear dengan
Penerapan Teknik Pengendalian Non Linear
- 99 Tarigan, R., Luthi, J.
Pengaruh Pergerakan Bola Persegi H-2PT
dengan Teknik Pengendalian Non Linear
- 107 Jany, Sast
Mata: Koneksi Koneksi
Mata: Koneksi Koneksi



ISSN 1412 8810
Volume 1 NO. 2 Oktober 2002

JURNAL TEKNIK

Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknologi

Pengantar Redaksi

Pengantar Redaksi
Pembaca yang budiman,

Kami terbit untuk kedua kalinya, pada terbitan kali ini kami memuat artikel dari enam jurusan yang merepresentasikan disiplin ilmu pada masing-masing jurusan ditambah dengan resensi tentang sejarah mutu produk/jasa.

Jurusan Teknik Industri, diwakili oleh artikel yang berjudul "Group Technology", Teknik Mesin diwakili oleh artikel yang berjudul "Analisis Kekuatan Lelah Pegas..." dan seterusnya yang dapat anda lihat pada daftar isi.

Pada terbitan kedua ini, kami tidak mengkhuskan pada sebuah topik, akan tetapi yang kami tulis dalam Jurnal ini diusahakan sepenuhnya adalah hasil penelitian para staf pengajar maupun staf pengajar dengan asistennya yang ada di enam jurusan keteknikan.

Dengan demikian apa yang dimuat dalam jurnal ini, merupakan aplikasi ilmu-ilmu keteknikan seperti teknik elektro, teknik industri, teknik mesin, teknik metalurgi, teknik sipil, dan teknik kimia. Kami berharap jurnal ini dapat merepresentasikan penghargaan kami kepada para staf pengajar atas hasil karya dan dedikasi pada bidang ilmunya.

Penanggung Jawab :

Ir. Wasito (Dekan FT-UNJANI)

Pemimpin Umum :

Ir. Ronni Ibnu Sabil, MT (PD-I)

Pemimpin Usaha :

Ir. Unang Slamet (PD-II)

Pemimpin Redaksi :

Ir. Jahny Sast, MSc (PD-III)

Editor / Redaktur Pelaksana :

Ir. Moro Sujatmiko (Ketua)
Ir. Cucu Wahyudin, MT
Ir. Ni Ketut HD, MM
Ir. Antono Damayanto, MMBat
Ir. Febrianto
Pawawoi, ST
War'an, ST

Tata Usaha

Suwardi

Alamat Redaksi :

Jl. Gatot Subroto PO BOX 807
Telp. (022) 7312741
Fax. (022) 730 9433
Bandung
E-mail : moro@koran.com

**Diterbitkan oleh Fakultas Teknik
Universitas Jenderal Achmad Yani**

Oktober 2002

**Aplikasi Group Technology Pada Perancangan Alat Bantu Pegang (Fixture)
untuk Proses Pembuatan Komponen ;
Studi Kasus Perancangan fixture untuk pembuatan komponen pesawat di PT DI**

Oleh :

Edhy Yusuf, Gianti P, M. Sujatmiko, C. Wahyudin,* dan R.J. Hamid**

E-mail : Moro@koran.com

* Staff pengajar Jurusan TI-UNJANI Bandung, ** Karyawan PT Dirgantara Indonesia

Abstrak

Tahapan penting pada proses produksi komponen di suatu industri manufaktur adalah proses perancangan dan pembuatan fixture yang menjadi prasyarat untuk terlaksananya proses pembuatan komponen tersebut. Industri manufaktur sering menghadapi masalah dalam perancangan dan pembuatan fixture, karena untuk setiap pesanan komponen yang baru diterima harus dirancang dan dibuat fixturenya. Kegiatan perancangan fixture membutuhkan keahlian yang spesifik dan waktu yang panjang, yang berimplikasi pada lead time pembuatan komponen yang panjang.

Suatu komponen sering memiliki kesamaan bentuk geometris dengan komponen yang lain, sehingga fixture yang digunakan untuk proses pemesian komponen-komponen tersebut pun sering memiliki kesamaan. Fixture yang dirancang sangat berkaitan dengan jenis dan bentuk geometri komponen yang dibuat (bentuk, ukuran), jenis material serta proses pengerjaan dan jenis pemesian yang diperlukan. Kesamaan bentuk geometris komponen (produk) dan sifat-sifat lain yang berimplikasi pada kesamaan bentuk fixture yang digunakan diduga dapat digunakan untuk menyederhanakan proses perancangan fixture, yaitu dengan mengelompokkan komponen (produk) yang dibuat dengan menggunakan pendekatan group technology.

Penggunaan pendekatan group technology akan memudahkan perancangan fixture yang dibutuhkan, karena tidak perlu semua tahapan perancangan dilakukan. Pesanan untuk komponen baru yang diterima suatu industri manufaktur dikelompokkan ke dalam kelompok yang sudah dibuat, dan pada setiap kelompok tersebut telah diuraikan bentuk geometri dasarnya, jenis materialnya dan berbagai sifat yang menunjukkan kesamaan. Untuk setiap sifat tersebut (bentuk dasar geometri, jenis material, dsb) ditentukan bentuk fixturenya yang tepat. Oleh karenanya, proses perancangan fixture untuk komponen yang baru diterima dilakukan dengan mengkombinasikan bentuk dasar fixture yang telah dibuat untuk kelompok yang bersangkutan.

Penelitian aplikasi group technology pada perancangan fixture telah dilakukan untuk komponen pesawat terbang N250 dan Boeing 737, dan memberikan waktu perancangan fixture yang lebih pendek dibandingkan dengan perancangan tanpa menggunakan pendekatan group technology. Pendekatan ini diduga dapat juga digunakan untuk perancangan fixture pada industri manufaktur pembuat komponen umumnya, termasuk pada industri kecil pembuat komponen.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kelancaran proses dalam industri manufaktur, seperti PT Dirgantara Indonesia, tidak terlepas dari ketersediaan

alat bantu/tools yang handal dan mampu membantu mempercepat proses pengerjaan part pesawat terbang dengan kualitas tinggi dan biaya yang rendah. Kegiatan perancangan alat bantu/tools merupakan tahapan awal dari kegiatan produksi di PT Dirgantara Indonesia. Puluhan ribu alat

bantu/tools dibutuhkan untuk memproduksi satu jenis pesawat terbang, mulai dari kebutuhan *Master & Gages, Assembly Jigs, Bonding & Composite (Non Metal Part) tools, Ground support tools, sheet metal tools, machining tools*, dengan kompleksitas tools yang beragam. Faktor yang harus dipertimbangkan dalam pembuatan alat bantu diantaranya adalah tingkat rigiditas (kekompakan), toleransi, kemudahan dalam pengoperasiannya, ketelitian dan kehalusan alat bantu untuk dapat menghasilkan part pesawat yang memenuhi persyaratan kualitas yang diminta.

Sistem penyiapan *tool design* pada saat ini masih dilakukan secara konvensional, yaitu *tool design* dipersiapkan satu persatu sehingga sering terjadi pengulangan pembuatan *tool design* untuk part-part yang memiliki kemiripan. Adanya kemiripan sifat ini dapat dijadikan sebagai dasar untuk mempercepat proses perancangan tools, sehingga tidak terjadi pengulangan kegiatan perancangan untuk bentuk tools yang sama. Pendekatan yang dapat digunakan untuk memanfaatkan adanya kemiripan sifat adalah pendekatan *group technology*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengaplikasikan pendekatan *group technology* dalam pembuatan rancangan alat bantu (*fixture*), dan membandingkan waktu pembuatan *tool design* antara metoda konvensional dan metoda *group technology*.

Batasan Penelitian

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data yang terdapat di Departemen Design dan Process Engineering PT Dirgantara Indonesia untuk program pesawat N250 dan Boeing 737.
2. Penelitian dibatasi pada pembuatan perancangan alat bantu/tool untuk machining part.
3. Alat bantu pemegang untuk machining part hanya untuk alat bantu pemegang jenis *milling fixture, boring fixture dan drilling jig* dengan konsep rancangan dianggap tidak berubah.

4. Perancangan alat bantu/tool yang dihasilkan pada masa lalu dianggap dapat mewakili perancangan yang akan datang.
5. Pengujian pengklasifikasian dan pengkodifikasian dibatasi hanya terhadap 399 tool design yang ada untuk program N250 dan Boeing 737 sebagai uji sampel.

Metodologi Penelitian

Perancangan alat bantu merupakan tahap akhir dari suatu rangkaian kegiatan *software* dalam sistem produksi part, sebelum part tersebut diproduksi di lantai pabrik. Sistem perancangan alat bantu berawal dari *design part* (produk) dalam wujud *engineering drawing*, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan *machining plan* untuk menentukan langkah operasi pemrosesan terutama yang berkaitan dengan penggunaan alat bantu, menyiapkan konsep alat bantu, dan membuat rancangan alat bantu yang diinginkan sesuai tuntutan *machining plan*.

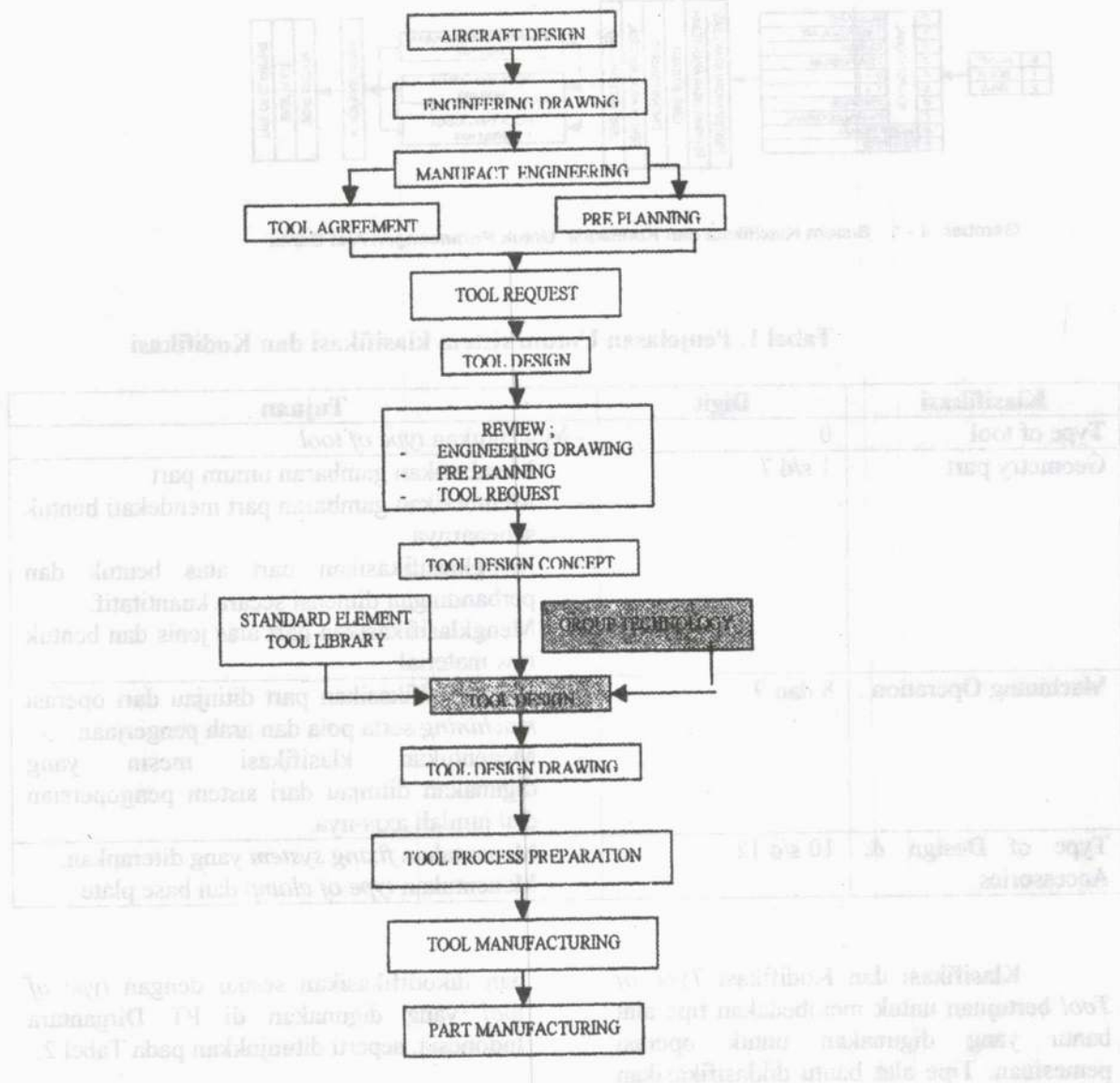
Masalah yang saat ini dijumpai dalam perancangan alat bantu adalah belum tersedianya konsep rancangan (*design*) yang standar, sering terjadinya duplikasi perancangan, dan sering terjadinya perancangan yang tidak perlu. Masalah-masalah tersebut menyebabkan produktivitas perancangan alat bantu menjadi rendah, sehingga untuk meningkatkan produktivitas perancangan alat bantu diperlukan metoda yang mampu memecahkan masalah tersebut. Pendekatan yang digunakan untuk memecahkan masalah tersebut adalah *group technology*, yang diantaranya memiliki keuntungan sbb ;

1. Dapat menghasilkan *fixing system* yang standard untuk berbagai bentuk part yang mirip.
2. Bentuk *base plate* dan *tipe clamping* dapat distandarkan.
3. Mengoptimalkan penggunaan *Computer Aided Design*.

4. Hasil perancangan alat bantu yang sudah ada dapat dijadikan acuan dalam perancangan alat bantu berikutnya.
5. Dapat membuat rancangan alat bantu universal baru.
6. Dapat membantu mempermudah perhitungan *cost of production* alat

bantu karena data merupakan pengembangan/modifikasi data lama.

Sistematika proses perancangan alat bantu dengan pendekatan *group technology* ditunjukkan pada Gambar 1.



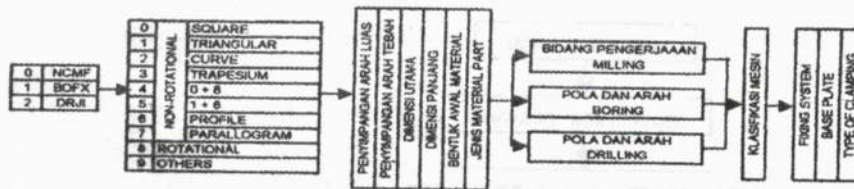
Gambar 1. Sistematika Proses Perancangan alat bantu dengan penerapan GT

Aplikasi Group Technology

Perancangan Sistem Klasifikasi dan Kodifikasi

Perencanaan sistem klasifikasi dan kodifikasi dibagi ke dalam empat bagian

utama, yaitu *type of tool*, *geometry part*, *machining operation*, dan *type of Design & Accessories*. Susunan dari sistem klasifikasi dan kodifikasi yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 4 - 1 Sistem Klasifikasi dan Kodifikasi Untuk Perancangan Alat Bantu

Tabel 1. Penjelasan Umum sistem klasifikasi dan Kodifikasi

Klasifikasi	Digit	Tujuan
Type of tool	0	- Menentukan <i>type of tool</i>
Geometry part	1 s/d 7	- Memberikan gambaran umum part - Memberikan gambaran part mendekati bentuk sebenarnya - Mengklasifikasikan part atas bentuk dan perbandingan dimensi secara kuantitatif. - Mengklasifikasikan part atas jenis dan bentuk raw material
Machining Operation	8 dan 9	- Mengklasifikasikan part ditinjau dari operasi <i>machining</i> serta pola dan arah pengerjaan. - Menentukan klasifikasi mesin yang digunakan ditinjau dari sistem pengopersian dan jumlah axis-nya.
Type of Design & Accessories	10 s/d 12	- Menentukan <i>fixing system</i> yang diterapkan. - Menentukan <i>type of clamp</i> dan base plate

Klasifikasi dan Kodifikasi *Type of Tool* bertujuan untuk membedakan tipe alat bantu yang digunakan untuk operasi pemesinan. Tipe alat bantu diklasifikasikan

dan dikodifikasikan sesuai dengan *type of tool* yang digunakan di PT Dirgantara Indonesia, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Type of tool (Digit 0)

Digit	Type of tool
0	Milling fixture (MLFX/NCMF)
1	Boring fixture (BOFX)
2	Drilling Jig (DRJI)

Klasifikasi dan kodifikasi bentuk utama part bertujuan untuk memberikan bentuk geometri utama part (*rotational, non rotational* dan lainnya), dan juga membedakan geometri part berdasarkan perbandingan dimensi secara kuantitatif serta jenis material yang digunakan. Klasifikasi dan kodifikasi geometri digunakan juga untuk menentukan tipe mesin yang dipakai, sistem penetap (*fixing sistem*) yang diterapkan, perat (*base plate*) yang digunakan dan sistem pencekaman (*clamping system*).

Klasifikasi dan kodifikasi part terdiri dari kodifikasi bentuk utama part (digit 1), klasifikasi dan kodifikasi penyimpangan dalam arah luas (digit 2), klasifikasi dan kodifikasi pada arah tebal (digit 3), klasifikasi dan kodifikasi untuk dimensi utama (digit 4), klasifikasi dan kodifikasi dimensi panjang (digit 5), klasifikasi dan kodifikasi bentuk awal (digit 6), klasifikasi dan kodifikasi jenis material part (digit 7), klasifikasi dan kodifikasi proses pemesinan yang terdiri dari pola dan arah pengerjaan (digit 8) dan jenis mesin (digit 9), serta klasifikasi dan kodifikasi alat bantu (digit 10, 11, dan 12).

Aplikasi *group technology* pada perancangan alat bantu dengan *computer aided design* CATIA

Penerapan *group technology* pada perancangan alat bantu dengan *computer aided design* CATIA terbagi dalam tiga

tahapan ; yaitu identifikasi part yang merupakan pengidentifikasian *engineering drawing part* menurut *design attributes* (digit 1 sampai 7). Jika *drawing part* dapat diidentifikasi maka tahap selanjutnya diteruskan, tetapi jika tidak teridentifikasi maka dibuat design baru yang selanjutnya dibakukan sebagai *file group technology*.

Engineering drawing part tersebut selanjutnya diidentifikasi lagi menurut operasi pemesinan (digit 8 dan 9). Tahap terakhir adalah identifikasi alat bantu.

Pengujian

Pengujian dilakukan terhadap 399 tools, yang terdiri dari;

- 181 gambar alat bantu *milling fixture* (MLFX/NCMF) yang diproses dari raw material,
- 52 gambar alat bantu *milling fixture* (MLFX/NXMF) yang diproses dari semi finish part,
- 58 gambar alat bantu *boring fixture* (BOFX),
- 108 gambar alat bantu *drilling jig* (DRJI).

ggh data tersebut telah melalui proses *pre planning* dan telah ditentukan jenis alat bantu yang diperlukan sesuai tuntutan proses pemesinan masing-masing part. Tabel 3 memperlihatkan contoh hasil identifikasi terhadap salah satu sampel uji (nomor urut 141)

Tabel 3. Contoh hasil identifikasi

Part Number				142 NA 1622 - 101									
Code :	0	2	3	3	8	9	0	0	1	3	2	0	1
Digit :	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DIGIT			CODE		LEGEND								
0	Type of Tool		0	NCMF									
1	Bentuk Utama Part		2	Curva									
2	Penyimpangan Arah Luas		3	Penyimpanagan salah satu Curva line -nya									
3	Penyimpangan Arah Tebal		3	Combine 0 + 1									
4	Dimensi Utama		8	Longitudinal $3 < P/L ; 50 < T$									
5	Dimensi Panjang		9	$P > 2000$									
6	Bentuk Awal Material		0	Bare Plate									
7	Jenis Material Part		0	Aluminium Alloy									
8	Operasi Pemesinan		1	Dua bidang timbal balik									
9	Jenis Mesin		3	3 Axis CNC									
10	Fixing System		2	$T/H + H/D + \text{Clamp} + \text{Stopper}$									
11	Base Construction		0	Plate									
12	Type of Clamping		1	Strap Clamp adjusted									

Dari hasil pengujian terhadap sistem klasifikasi dan kodifikasi dengan mengidentifikasikan ke dalam 399 tools sebagai sampel uji diperoleh hasil sebagai berikut :

a. Kelompok milling fixture (raw material)

Dari sejumlah 181 tools yang diidentifikasi terdapat 114 tools (63 %) yang termasuk similarities dan dapat dikelompokkan menjadi 16 kelompok famili yang memiliki anggota masing-masing. Rancangan alat bantu untuk masing-masing famili ini memiliki konsep dasar perancangan yang sama. Terdapat sebanyak 67 tools (37 %) varietas lainnya tidak dapat dikelompokkan satu sama lainnya sehingga rancangan alat bantu untuk kelompok ini dibuatkan rancangan tersendiri.

b. Kelompok milling fixture (semi finish part)

Dari sejumlah 52 tools yang diidentifikasi, terdapat 19 tools (37 %) yang termasuk similarities dan dapat dikelompokkan menjadi 8 kelompok famili yang memiliki anggota masing-masing. Terdapat 33 tools (63 %) varietes lainnya yang tidak dapat dikelompokkan satu sama lainnya.

c. Kelompok Boring fixture

Dari 58 tools yang diidentifikasi terdapat 25 tools (43%) yang termasuk similarities dan dapat dikelompokkan menjadi 10 kelompok famili yang memiliki anggota masing-masing. Terdapat 33 tools (57 %) varieties part lainnya yang tidak bisa dikelompokkan.

d. Kelompok Drilling Jig

Dari 108 tools yang diidentifikasi terdapat 41 tools (38%) yang termasuk

similarities dan dapat dikelompokkan menjadi 15 kelompok famili yang memiliki anggota masing-masing. Terdapat 67 tools (62 %) varieties part lainnya yang tidak bisa dikelompokkan.

Analisis Efisiensi Waktu Perancangan

Dengan melakukan pengelompokkan, maka setiap famili yang dihasilkan cukup memiliki satu *New Design* yang dibuat, sedangkan untuk anggotanya hanya perlu dilakukan *minor modification* untuk mendapatkan rancangan baru masing-masing anggota. Waktu perancangan dengan menggunakan group technology adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Perbandingan hasil pengujian dengan GT dan tanpa GT

NO	Kelompok	Jumlah famili	Waktu dg GT (jam)	Waktu tanpa GT (Jam)	Penghematan waktu
1	Milling fixture (raw material)	16	5 410	8 869	39 %
2	Milling fixture (semi finish part)	8	2 267	2 665	14.9 %
3	Boring fixture	10	2 396.5	2 813	16 %
4	Drilling Jig	15	3 339.6	3 974.4	16 %

Pengembangan Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka diduga pendekatan *group technology* dapat pula diterapkan pada perancangan alat bantu di industri pembuat komponen skala industri kecil-menengah, dan hal ini akan dijadikan sebagai topik penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Bedworth, D.D., M.R. Henderson., P.M. Wolfe. 1991. Computer Integrated Design And Manufacturing. McGraw-Hill, USA.

Chang, T.C., R.A. Wysk., H.P. Wang. 1991. Computer Aided Manufacturing. Prentice Hall, New Jersey.

Lianto, B. 2001. Facility Layout Design dengan Group Technology (Studi Kasus pada industri furnititure). Prosiding Seminar Nasional Teknik dan Manajemen Produksi, ITS-Surabaya.

Toha, I.S., Harsono, T., Matthias, S., Mulyowidodo. 1997. Heuristik Penentuan Waktu Manufaktur Produk Untuk Sistem Manufaktur Make to Order Job Shop. Jurnal Teknik dan Manajemen Industri, ITB-Bandung.

ANALISIS KEKUATAN LELAH PEGAS SEKUNDER BOGIE NT-60

Oleh :

Haruman Wiranegara; Muflih Abdurahman
Jurusan Teknik Mesin – Fakultas Teknik UNJANI

ABSTRAK

Pegas (*spring*) adalah merupakan komponen yang sering digunakan dalam aplikasi teknik, seperti dalam teknik kereta api, teknik otomotif, dan lain sebagainya. Bogie NT-60 adalah komponen yang dipakai dalam kereta api, dimana pada Bogie tersebut terdapat banyak komponen diantaranya pegas. Jenis pegas yang dipakai yaitu pegas ulir (*helical spring*) yang menerima beban statik dan dinamik. Oleh karena itu pegas dituntut harus kuat terhadap kedua pembebanan ini.

Pendahuluan

Pada saat ini kebutuhan masyarakat akan sarana transportasi yang cepat, nyaman dan ekonomis semakin besar, tentu saja disertai dengan keamanan yang cukup tinggi. Dalam hal kenyamanan pada kereta api, didukung oleh beberapa komponen yang diantaranya adalah pegas yang terdapat pada Bogie. Pegas harus kuat dalam menerima pembebanan dan juga harus mampu mengatasi kejutan-kejutan yang diakibatkan antara lain oleh ketidakrataan rel kereta, pada saat kereta membelok, dan lain sebagainya. Disini para perancang harus memperhatikan dan memperhitungkan bahwa dalam mendesain sebuah pegas didasarkan pada faktor tersebut diatas.

Bogie

Bogie pada kendaraan rel mempunyai fungsi

1. Meningkatkan daya dukung kendaraan.
2. Memudahkan perjalanan pada waktu kendaraan rel berbelok.
3. Menahan dan menyalurkan beban badan kereta/gerbong ke roda-roda.
4. Memperkecil getaran dan tekanan gandar.

Sistem Pemegasan pada Bogie

Umumnya sistem pemegasan pada kendaraan rel (kereta api) untuk berbagai bogie terdiri dari sistem pemegasan primer dan sistem pemegasan sekunder. Pemegasan tersebut terdiri dari pegas dan peredam. Pegas tersebut dapat berupa pegas ulir, pegas daun, pegas torsi karet. Sedangkan peredam dapat berupa hidrolik dan peredam gesek.

Yang dimaksud sistem pemegasan primer adalah pemegasan periuk gandar (perangkat roda) dan rangka bogie. Fungsinya untuk menampung kejutan dan gaya-gaya yang terjadi pada kendaraan rel akibat ketidakrataan rel maupun sambungan rel.

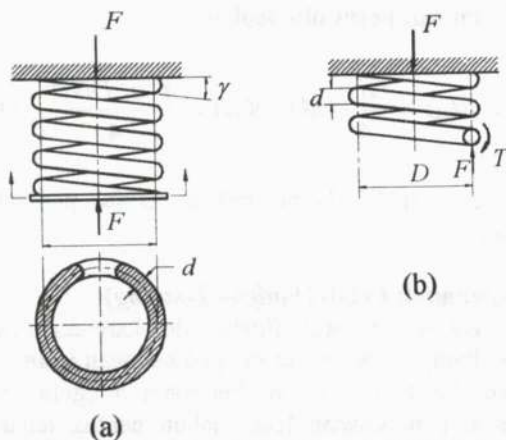
Pemegasan sekunder pada bogie kereta api menggunakan empat buah pegas luar dan empat buah pegas dalam pada setiap bogie. Pemegasan luar terletak pada sisi kiri dan kanan, akan tetapi saling berdampingan. Setiap pegas sekunder bagian luar akan terdapat pegas sekunder yang lain pada bagian dalam. Pemegasan sekunder (bagian luar dan bagian dalam) sangat berperan untuk menahan badan (*body*) kereta pada waktu kereta mengalami pembebanan.

Pegas (*Spring*)

Pegas adalah komponen elastis yang dipakai untuk mendesak gaya, atau torsi, dan untuk menyimpan atau menyerap energi. Pada umumnya, pegas dapat digolongkan atas pegas dawai (*wire springs*), pegas daun (*flat springs*), atau pegas berbentuk khusus, dan setiap golongan ini masih terdiri dari beberapa jenis. Pegas dawai mencakup pegas ulir dari kawat bulat atau persegi dan dibuat untuk menahan beban tarik, tekan, atau puntir.

Tegangan pada Pegas Ulir (*Stresses in Helical Springs*)

Gambar 1.a menunjukkan pegas ulir tekan dari kawat bulat yang dibebani dengan gaya aksial F . Kita nyatakan D sebagai diameter pegas rata-rata (*mean spring diameter*) dan d sebagai diameter kawat (*wire diameter*).



Gambar 1 Pegas Ulir (Helical Springs)

Sekarang bayangkan bahwa pegas tersebut dipotong pada suatu titik (Gambar 1.b), sebagian pegas disingkirkan digantikan oleh gaya dalam. Kemudian, seperti terlihat pada gambar, bagian yang terpotong tersebut akan mendesakkan suatu gaya geser langsung F dan suatu puntiran T pada bagian pegas yang tersisa.

Sekarang ditetapkan indeks pegas (*spring index*)

$$C = \frac{D}{d} \quad (1)$$

sebagai suatu ukuran dari kelengkungan gulungan.

Dengan mengacu pada gambar 1 dan menghubungkannya dengan indeks pegas didapat persamaan tegangan

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2)$$

dimana K_s disebut sebagai suatu faktor perkalian tegangan geser (*shear stress multiplication factor*), $K_s = 1 + (0,5/C)$.

Banyak penulis menyajikan persamaan tegangan sebagai

$$\tau = K \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (3)$$

dimana K disebut faktor koreksi Wahl (*Wahl correction factor*). Faktor ini mencakup geseran langsung, bersama pengaruh lain

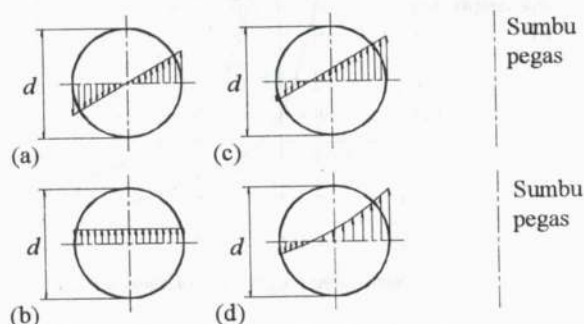
terhadap kelengkungan. Seperti diperlihatkan dalam Gambar 2, kelengkungan kawat memperbesar tegangan disebelah dalam dari pegas tetapi mengurangi tegangan hanya sedikit disebelah luarnya. Harga bisa didapat dari persamaan

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (4)$$

Dengan menyatakan $K = K_c K_s$, dimana K_c adalah khusus untuk pengaruh kelengkungan, kita mendapatkan

$$K_c = \frac{K}{K_s} \quad (5)$$

Penyelidikan menunjukkan bahwa tegangan geser kelengkungan ini sangat terpusat pada bagian dalam dari pegas.



Gambar 2 Superposisi tegangan pada suatu pegas ulir. (a) Tegangan puntiran murni. (b) Tegangan geser langsung. (c) Resultante dari tegangan-tegangan geser langsung dan puntiran. (d) Resultante dari tegangan-tegangan geser, puntiran, dan kelengkungan.

Lenturan dari Pegas Ulir (Deflection of Helical Springs)

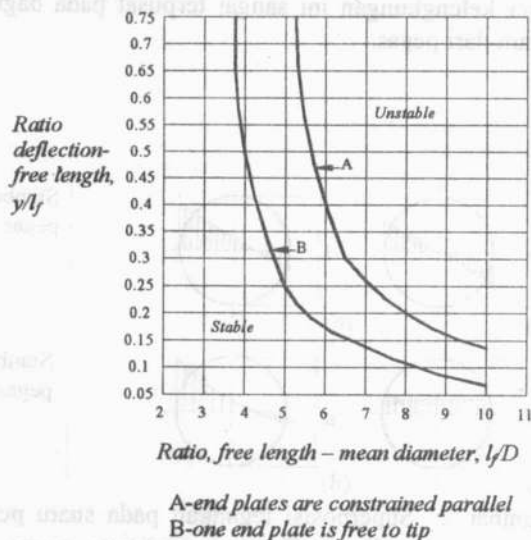
Persamaan defleksi untuk pegas ulir adalah

$$y = \frac{8FD^3N}{d^4G} \quad (6)$$

Untuk mendapatkan konstanta pegas, pakailah persamaan $k = F / y$ dan memakai harga y dari persamaan (6). Ini memberi

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (7)$$

Pegas gulungan yang panjang yang mempunyai panjang bebas yang empat kali lebih panjang dari diameter rata-ratanya bisa gagal karena tekukan (*buckling*). Gambar 3 akan sangat bermanfaat untuk memutuskan apakah suatu pegas tekan mempunyai kemungkinan untuk menekuk.



Gambar 3 Kondisi-kondisi tekuk (*buckling*) untuk pegas ulir tekan

Frekuensi Kritis dari Pegas Ulir (*Critical Frequency of Helical Springs*)

Untuk frekuensi dasar kita mendapatkan

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (8)$$

Wolfrod dan Smith menunjukkan bahwa frekuensi adalah

$$f = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (9)$$

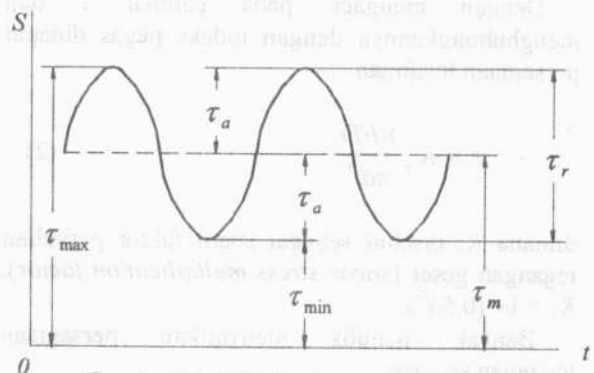
Berat dari pegas ulir adalah

$$W = AL\rho = \frac{\pi d^2}{4} (\pi DN)(\rho) = \frac{\pi^2 d^2 DN\rho}{4} \quad (10)$$

dimana ρ adalah berat (bukan massa) per satuan volume.

Pembebanan Lelah (*Fatigue Loading*)

Pegas dibuat untuk dipakai, dan karenanya pegas selalu hampir siap menerima pembebanan lelah. Dalam kasus poros dan beberapa anggota mesin lainnya, pembebanan lelah dalam bentuk tegangan bolak-balik yang lengkap adalah cukup biasa. Pegas ulir, dilain pihak, tak pernah dipakai sebagai pegas tekan dan sekaligus sebagai pegas tarik. Pada kenyataannya, pegas biasanya dipasang dengan suatu beban awal sedemikian sehingga beban kerja adalah suatu tambahan. Jadi diagram waktu-tegangan pada gambar 4 menyatakan kondisi yang biasa untuk pegas ulir. Kondisi terburuk, kemudian, akan terjadi bila disana tidak ada beban awal, yaitu, bila $\tau_{\min} = 0$.



Gambar 4 Hubungan tegangan – waktu

Dalam menganalisa pegas atas sebab dari suatu kegagalan lelah atau dalam perencanaan pegas untuk menahan kelelahan, adalah tepat untuk menggunakan faktor perkalian tegangan geser K_s baik pada tegangan rata-rata τ_m dan pada amplitudo tegangan τ_a . Alasan untuk ini adalah bahwa K_s sama sekali bukanlah suatu faktor pemusatan tegangan, tetapi semata-mata suatu alat yang memudahkan dalam menghitung tegangan geser pada bagian dalam dari gulungan

Sekarang kita menetapkan

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (11)$$

dan

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \quad (12)$$

Kemudian komponen tegangan adalah

$$\tau_a = K_s \frac{8F_a D}{\pi d^3} \quad (13)$$

$$\tau_m = K_s \frac{8F_m D}{\pi d^3} \quad (14)$$

Kegagalan puntir akan terjadi apabila

$$\tau_a = S_{se} \quad (15)$$

atau apabila

$$\tau_{\max} = \tau_a + \tau_m = S_{sy} \quad (16)$$

Persamaan batas ketahanan lelah untuk suatu elemen mesin adalah

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (17)$$

dimana

S_e = batas ketahanan dari elemen mesin

S'_e = batas ketahanan dari benda

Percobaan gelagar-berputar ($0,5 S_{ut}$)

k_a = faktor permukaan

k_b = faktor ukuran

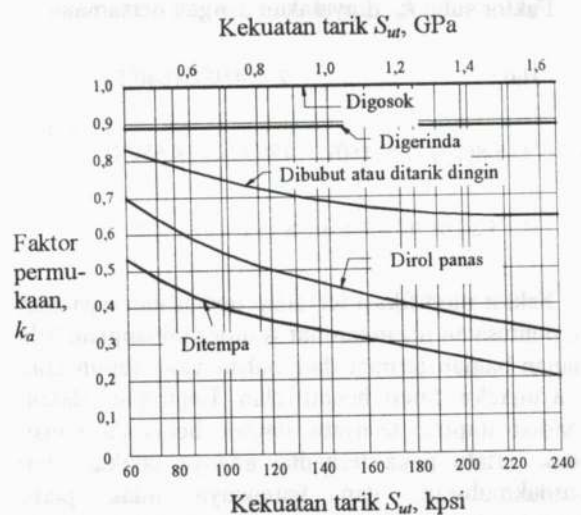
k_c = faktor keandalan

k_d = faktor suhu

k_e = faktor modifikasi terhadap pemusatan tegangan

k_f = faktor pengaruh serbaneka lainnya.

Faktor permukaan k_a , terlihat pada gambar 5, tergantung pada kualitas pengerjaan akhir dan kekuatan tarik. Faktor-faktor yang diperlihatkan pada grafik ini didapat dari percobaan.



Gambar 5 Faktor permukaan

Faktor ukuran k_b , untuk beban puntir adalah

$$d \leq 0,4 \text{ in} : k_b = 1,0 \quad (18)$$

$$0,4 < d < 2,0 : k_b = 0,9$$

atau dengan menggunakan persamaan (19) dibawah ini

$$k_b = \begin{cases} 0,869d^{-0,097} & 0,3 \text{ in} < d < 10 \text{ in} \\ 1 & d \leq 0,3 \text{ in} \text{ atau } d \leq 8 \text{ mm} \\ 1,189d^{-0,097} & 8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (19)$$

Faktor keandalan k_c , tabel 1 menunjukkan nilai-nilai faktor keandalan.

Tabel 1 Faktor keandalan

Keandalan R	Faktor Keandalan,
0,50	1,000
0,90	0,897
0,95	0,868
0,99	0,814
0,999	0,753
0,999 9	0,702
0,999 99	0,659
0,999 999	0,620
0,999 999 9	0,584
0,999 999 99	0,551
0,999 999 999	0,520

Faktor suhu k_d , dinyatakan dengan persamaan

$$k_d = \begin{cases} 1,0 & T \leq 450^\circ\text{C} (840^\circ\text{F}) \\ 1 - 5,8(10)^{-3}(T - 450) & 450^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C} \\ 1 - 3,2(10)^{-3}(T - 840) & 840^\circ\text{F} < T \leq 1020^\circ\text{F} \end{cases} \quad (20)$$

Faktor modifikasi terhadap pemusatan tegangan k_e , pemusatan tegangan harus dipertimbangkan bila bagian-bagian terbuat dari bahan yang rapuh atau bila mereka diberi beban lelah. Begitupun, dalam kondisi inipun, ternyata bahwa beberapa bahan tidak terlalu peka terhadap adanya takikan atau ketidakmulusan, dan karenanya tidak perlu memakai harga faktor pemusatan tegangan teoritis secara penuh. Untuk bahan ini sebaiknya memakai harga K_1 yang dikurangi. Faktor yang dihasilkan dinyatakan dengan persamaan

$$K_f = \frac{\text{batas ketahanan benda percobaan bebas takikan}}{\text{batas ketahanan benda percobaan bertakik}}$$

Faktor ini biasanya disebut faktor kelelahan pemusatan tegangan (*fatigue stress-concentration factor*). Faktor K_f disebut juga dengan faktor pengurang kekuatan lelah (*fatigue strength reduction factor*). Hubungannya dengan persamaan (17) adalah

$$k_e = \frac{1}{K_f} \quad (21)$$

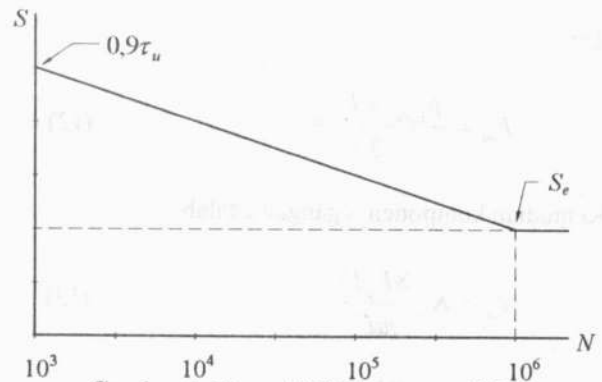
Faktor pengaruh lainnya k_f , disini penulis memasukkan faktor beban merupakan faktor pengaruh lain dalam persamaan (17). Nilai faktor beban untuk beban puntir adalah

$$k_f = \begin{cases} 0,58 & \text{untuk baja} \\ 0,8 & \text{untuk besi cor} \end{cases} \quad (22)$$

Setelah semua nilai faktor diketahui dan melakukan perhitungan terhadap batas ketahanan suatu elemen mesin, maka langkah selanjutnya adalah membuat gambar kurva $S-N$

(tegangan-siklus).

Kurva $S-N$ untuk spesimen dengan beban puntir bolak-balik digambarkan di bawah ini.

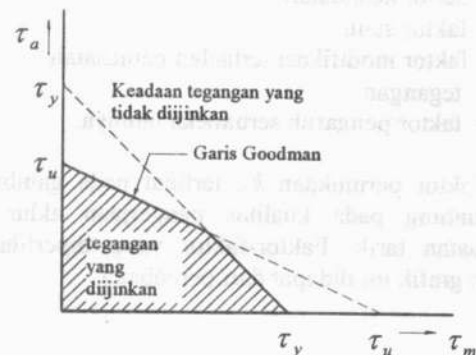


Gambar 5 Kurva $S-N$ (Tegangan-Siklus)

Jika τ_u tidak diketahui datanya, maka harga τ_u dapat ditaksir dari harga tegangan batas kekuatan tarik sebagai berikut

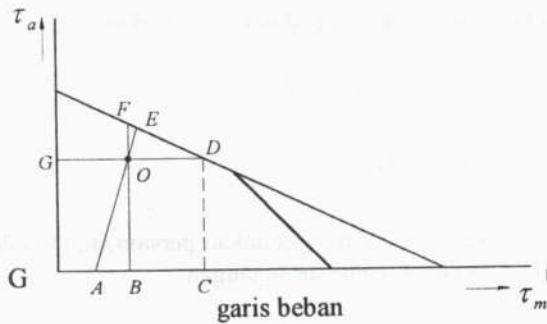
$$\begin{aligned} \tau_u &= 0,8S_{ut} && \text{untuk baja} \\ \tau_u &= 1,3S_{ut} && \text{untuk besi cor} \end{aligned} \quad (23)$$

Selanjutnya untuk menaksir kekuatan lelah tidak cukup dengan kurva $S-N$, karena meskipun tegangan amplitudo (tegangan bolak-baliknya) di bawah batas ketahanan lelah, terkadang tegangan rata-ratanya melebihi batas yield. Untuk ini akan lebih aman jika dihubungkan dengan kriteria patah lelah Goodman yang dimodifikasi. Kriteria ini dinyatakan dalam sebuah gambar berikut ini



Gambar 6 Diagram Goodman yang dimodifikasi

Kini kita tinggal menentukan faktor keamanannya. Faktor keamanan ini bisa dicari dari gambar diagram Goodman tersebut, namun harus dibuat dahulu garis yang melalui titik yang disebut titik tegangan yang terjadi (titik O), garis ini dinamakan garis beban (*load line*).



Secara grafis, faktor keamanan tersebut adalah :

$$FS = \frac{\overline{GD}}{\overline{GO}} \quad \text{untuk garis beban horisontal}$$

$$FS = \frac{\overline{AF}}{\overline{AO}} \quad \text{untuk garis beban awal} \quad (24)$$

$$FS = \frac{\overline{BF}}{\overline{BO}} \quad \text{untuk garis beban vertikal}$$

Data Pegas

Data untuk pegas luar :

- Panjang bebas pegas (l_f) = 330 mm
- Diameter kawat (d) = 35 mm
- Diameter lilitan (D) = 260 mm
- Jumlah lilitan total (N_T) = 6,5
- Jumlah lilitan tak aktif (N_D) = 1,5
- Arah lilitan = searah jarum jam
- Bahan pegas = SUP 9 dengan
 $S_{ut} = 125 \text{ kg/mm}^2$ ($1,23 \text{ E} + 9 \text{ N/m}^2$),
 $G = 8000 \text{ kg/mm}^2$ ($78,48 \text{ E} + 9 \text{ N/m}^2$),
 $\rho = 7,85 \text{ E} - 6 \text{ kg/mm}^3$ (7850 kg/m^3), $S_y =$
 110 kg/mm^2 ($1,08 \text{ GPa}$).
- Gaya pada pegas saat gerbong terisi penuh =
 2432 kgf

Pada saat pembebanan maksimum, dimana gerbong kereta terisi penuh yaitu sebesar 2432 kgf (23849,65 N), nilai tegangannya adalah sebagai berikut :

Data untuk pegas dalam :

- Panjang bebas pegas (l_f) = 330 mm
- Diameter kawat (d) = 25 mm
- Diameter lilitan (D) = 190 mm
- Jumlah lilitan total (N_T) = 7,5
- Jumlah lilitan tak aktif (N_D) = 1,5
- Arah lilitan = berlawanan jarum jam
- Bahan pegas = SUP 9 dengan
 $S_{ut} = 125 \text{ kg/mm}^2 \text{ (1,23 E + 9 N/m}^2\text{)},$
 $G = 8000 \text{ kg/mm}^2 \text{ (78,48 E + 9 N/m}^2\text{)},$
 $\rho = 7,85 \text{ E - 6 kg/mm}^3 \text{ (7850 kg/m}^3\text{)}, \quad S_y =$
 $110 \text{ kg/mm}^2 \text{ (1,08 GPa)}.$
- Gaya pada pegas saat gerbong terisi penuh = 2432 kgf

Perhitungan Tegangan pada Pegas Sekunder Bogie NT-60 Bagian Luar untuk Kasus Pembebanan Statik

Dari data pegas didapat bahwa defleksi (y) pada pegas adalah :

$$y = 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}$$

Dengan menggunakan persamaan (6) dimana

$$N = N_D - N_T = 5$$

maka gaya (beban) yang terjadi pada pegas tersebut adalah :

$$F = 10047.35 \text{ N}$$

Indeks pegas sekunder didapat dari persamaan (1)

$$C = 7,43$$

Tegangan yang terjadi pada pegas tersebut dengan menggunakan persamaan (2) dan dimana K_s didapat dari persamaan

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} = 1,07$$

$$\tau = 166,10 \text{ MPa}$$

Nilai konstantanya didapat dari persamaan (7)

$$K = 167,51 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Besar tegangan awal pada pegas sekunder ini adalah pada saat pegas terdefleksi sebesar 60 mm. Didapat nilai beban pada pegas saat terdefleksi itu adalah sebesar 1024,55 kgf (10047,35 N). Sedangkan untuk nilai tegangan maksimumnya adalah pada saat

$$\tau = 394,27 \text{ MPa}$$

Perhitungan Tegangan pada Pegas Sekunder Bogie NT-60 Bagian Dalam untuk Kasus Pembebanan Statik

Sama seperti halnya pada uraian di atas, bahwa pada pegas bagian dalamnya juga terjadi defleksi pada saat pembebanan sebesar 60 mm (0,06 m). Dengan menggunakan persamaan (6) dan dimana

$$N = N_D - N_T = 7,5 - 1,5 = 6$$

Maka gaya (beban) yang terjadi pada pegas adalah

$$F = 5584,96 \text{ N}$$

Nilai indeks pegasnya adalah

$$C = 7,6$$

Maka tegangan yang terjadi pada pegas sekunder bagian dalam ini adalah dengan menggunakan persamaan (2) dimana nilai $K_s = 1,07$

$$\tau = 185,14 \text{ MPa}$$

Sedangkan nilai konstantanya

$$K = 93,11 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pada saat pembebanan maksimum, dimana gerbong terisi penuh yaitu dengan beban sebesar 2432 kgf (23849,65 N), nilai tegangannya adalah sebagai berikut :

$$\tau = 790,61 \text{ MPa}$$

Perhitungan Tegangan dan Umur Pegas Sekunder Bogie NT-60 Bagian Luar untuk Kasus Pembebanan Lelah

pegas menerima beban dari gerbong dengan isi maksimum, yaitu seperti diketahui dalam data teknis sebesar 2432 kgf (23849,65 N).

Jadi gaya maksimum dan minimumnya adalah

$$F_{\min} = 10047,35 \text{ N}$$

$$F_{\max} = 23849,65 \text{ N}$$

Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12)

$$F_a = 6901,15 \text{ N}$$

$$F_m = 16948,5 \text{ N}$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan (13) dan (14), kita dapat tegangan-tegangan

$$\tau_a = 114,09 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 280,18 \text{ MPa}$$

Persamaan batas ketahanan suatu elemen mesin terhadap kelelahan adalah

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

dimana untuk pegas ini dibuat $k_a = k_c = k_d = 1$. Dari persamaan (4)

$$K = 1,20$$

Dari persamaan (5), faktor kelengkungan adalah

$$K_c = 1,12$$

Kepekaan takikan dari pegas hampir mendekati satu karena kekuatan tariknya yang begitu besar, maka $K_f = K_c$. Karenanya faktor modifikasi terhadap pemusatan tegangan adalah $k_e = 1/K_f = 1/1,12 = 0,89$. Faktor ukuran $k_b = 0,9$ karena diameter pegas berada pada

daerah $0,4 < d < 2,0$ inch. Faktor beban $k_f = 0,58$ untuk baja. Kekuatan lelah specimen standar $S'_e = 0,5S_{ut} = 615$ MPa.

Untuk menaksir kekuatan lelah pada pegas ini, mula-mula dibuat diagram $S-N$:

Pada $N = 10^3$

$$\tau_u = 0.8S_{ut} = 984 \text{ MPa}$$

$$(S_e)_{10^3} = 0.9\tau_u = 885,6 \text{ MPa}$$

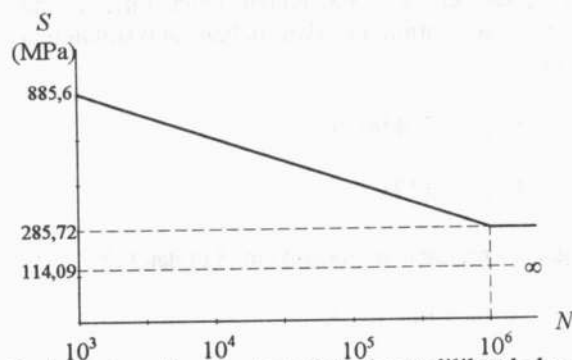
Pada $N = 10^6$

$$(S_e)_{10^6} = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_{se}$$

$$= (1)(0,9)(1)(1)(0,89)(0,58)(615)$$

$$= 285,72 \text{ MPa}$$

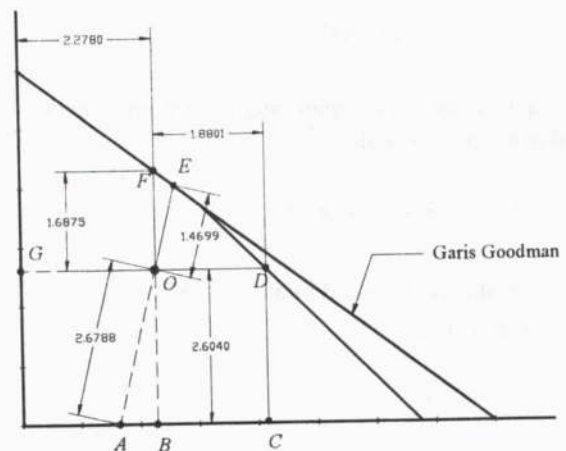
Gambar diagram $S-N$ nya adalah



Dari gambar diagram tersebut, dapat dilihat bahwa pegas sekunder ini pada tegangan amplitudo $\tau_a = 114,09$ MPa batas kelelahannya tak hingga.

Di bawah ini digambarkan suatu diagram Goodman yang dimodifikasi, dimana pada diagram ini faktor konsentrasi tegangan terhadap kelelahan $K_f = 1$ karena pegas sekunder ini tidak bertakik. Namun faktor konsentrasi tegangan yang terjadi pada pegas ini disebabkan karena kelengkungan, dimana nilainya sudah dihitung pada uraian sebelumnya dan sudah terduksi dalam nilai batas ketahanan kelelahan pegas sekunder ini.

Gambar diagram Goodmannya adalah



Untuk garis beban horisontal

$$FS = 1,82$$

Untuk garis beban awal

$$FS = 1,55$$

Untuk garis beban vertikal

$$FS = 1,65$$

Perhitungan Tegangan dan Umur Pegas Sekunder Bogie NT-60 Bagian Dalam untuk Kasus Pembebanan Lelah

Besar beban awal didapat pada saat pegas terdefleksi sebesar 60 mm (0,06 m) yaitu 569,51 kgf (5584,96 N), dan beban maksimumnya pada saat gerbong terisi penuh yaitu 2432 kgf (23849,65 N).

$$F_{\min} = 5584,96 \text{ N}$$

$$F_{\max} = 23849,65 \text{ N}$$

Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12)

$$F_a = 9132,35 \text{ N}$$

$$F_m = 4717,31 \text{ N}$$

Tegangan amplitudo dan tegangan rata-ratanya, dengan menggunakan persamaan (13) dan (14)

$$\tau_a = 302,73 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 487,87 \text{ MPa}$$

Persamaan batas ketahanan suatu elemen mesin terhadap kelelahan adalah

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

dimana untuk pegas ini dibuat $k_a = k_c = k_d = 1$.
Dari persamaan (4)

$$K = 1,19$$

Dari persamaan (5), faktor kelengkungan adalah

$$K_c = 1,11$$

Kepekaan takikan dari pegas hampir mendekati satu karena kekuatan tariknya yang begitu besar, maka $K_f = K_c$. Karenanya faktor modifikasi terhadap pemusatan tegangan adalah $k_e = 1/K_f = 1/1,11 = 0,90$. Faktor ukuran $k_b = 0,9$ karena diameter pegas berada pada daerah $0,4 < d < 2,0$ inch. Faktor beban $k_f = 0,58$ untuk baja. Kekuatan lelah specimen standar $S'_e = 0,5 S'_{ut} = 615 \text{ MPa}$.

Pada $N = 10^3$

$$\tau_u = 0,8 S'_{ut} = 984 \text{ MPa}$$

$$(S_e)_{10^3} = 0,9 \tau_u = 885,6 \text{ MPa}$$

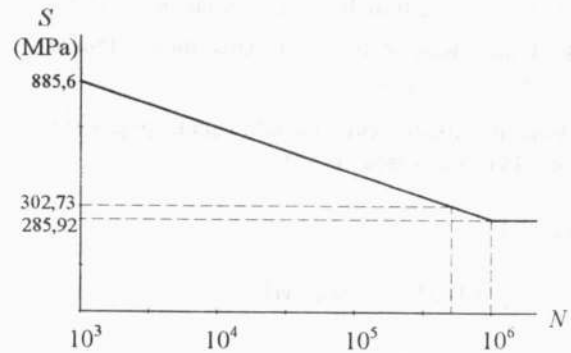
Pada $N = 10^6$

$$(S_e)_{10^6} = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_{se}$$

$$= (1)(0,9)(1)(1)(0,90)(0,58)(615)$$

$$= 285,92 \text{ MPa}$$

Gambar diagram $S-N$ nya adalah



Dari gambar diagram tersebut dapat dilihat bahwa tegangan amplitudo sebesar 302,73 MPa, umurnya hampir mendekati 10^6 .

Pada kasus pembebanan lelah ini, nilai bebannya adalah nilai beban maksimum. Namun pada kenyataannya selama kereta api beroperasi pegas terdefleksi berkisar antara 10 mm – 60 mm dari beban awal. Untuk analisis diambil defleksi terbesar selama kereta api beroperasi yaitu $y = 60 + 60 = 120 \text{ mm} = 0,12 \text{ m}$. Dengan menyelesaikannya memakai persamaan (6) didapat nilai beban maksimum

$$F = 11173,73 \text{ N}$$

Maka pada kasus pembebanan lelah ini, kisaran antara beban minimum dan beban maksimumnya adalah

$$F_{\min} = 5584,96 \text{ N}$$

$$F_{\max} = 11173,73 \text{ N}$$

Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12)

$$F_a = 2794,39 \text{ N}$$

$$F_m = 8379,34 \text{ N}$$

Tegangan amplitudo dan tegangan rata-ratanya

$$\tau_a = 92,63 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 277,77 \text{ MPa}$$

Gambar diagram $S-N$ nya adalah

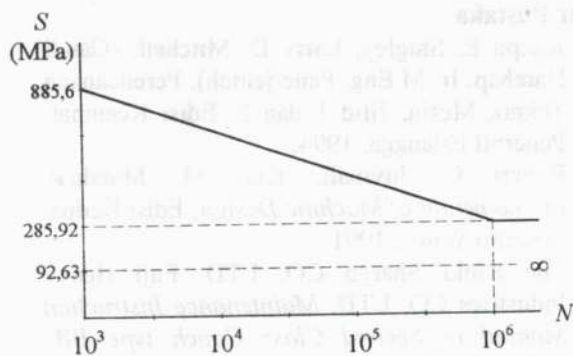
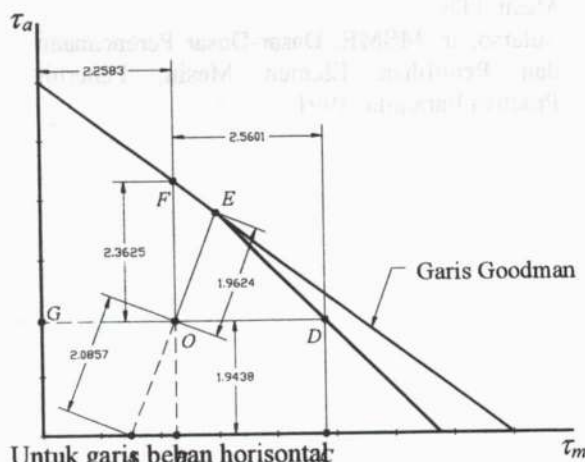


Diagram Goodmannya adalah



Untuk garis beban horisontal

$$FS = 2,13$$

Untuk garis beban awal

$$FS = 1,94$$

Untuk garis beban vertikal

$$FS = 2,22$$

Perhitungan Frekuensi kritis dari Pegas Sekunder Bagian Dalam dan Luar Bogie NT-60

Berat pegas sekunder bagian luar adalah

$$W = \frac{\pi^2 d^2 D N \rho}{4} = 30,81 \text{ kg}$$

Dengan menggunakan persamaan (8)

frekuensi kritis dari pegas sekunder ini adalah

$$f = 36,87 \frac{\text{cy}}{\text{s}}$$

Sedangkan untuk pegas sekunder bagian dalam

$$W = 13,79 \text{ kg}$$

dan frekuensi kritis dari pegas sekunder bagian dalam ini adalah

$$f = 41,10 \frac{\text{cy}}{\text{s}}$$

Analisis Terhadap Kemungkinan Buckling pada Pegas Sekunder Bagian Dalam dan Luar Bogie NT-60

Dengan mengacu pada gambar 3 dan menggunakan kurva A karena kedua ujung dari pegas ini tertahan pada bogie, maka untuk pegas sekunder bagian luar perbandingan defleksi dengan panjang awalnya adalah 0,18 dan perbandingan panjang awal dengan diameter lilitan pegas adalah 1,27. Hasil kedua perbandingan tersebut dimasukkan kedalam gambar 3, dan hasilnya ternyata berada pada daerah stabil.

Untuk pegas sekunder bagian dalam, perbandingan antara defleksi dengan panjang awal adalah 0,18 dan perbandingan antara panjang awal dengan diameter lilitan pegas adalah 1,74. Hasilnya sama dengan pegas sekunder bagian luar, yaitu berada pada daerah stabil.

Nilai Beban Maksimum yang Diiijinkan pada Pegas Sekunder Bogie NT-60

Suatu perkiraan yang lebih teliti dari kegagalan, diberikan oleh teori energi-distorsi, yang memperkirakan kekuatan mengalah dalam geseran sebesar

$$S_{sy} = 0,577 S_y$$

Maka untuk kekuatan mengalah pada pegas sekunder ini

$$S_{sy} = 623,16 \text{ MPa}$$

Dengan menggunakan persamaan (2), beban maksimum untuk pegas sekunder bagian luar adalah

$$F = 37695,22 \text{ N (3842,53 kgf)}$$

Sedangkan untuk pegas sekunder bagian dalam adalah

$$F = 18798,44 \text{ N (1916,25 kgf)}$$

Nilai tersebut di atas, adalah merupakan nilai beban maksimum terhadap pembebanan statis, sedangkan untuk pembebanan lelah dengan teori energi-distorsi nilai kekuatan mengalahnya adalah

$$S_{se} = 0,577 S_e$$

Maka nilai tegangan maksimum untuk pegas sekunder bagian dalam dan luar terhadap pembebanan lelah adalah

$$S_{se} = 164,98 \text{ MPa}$$

Suatu kegagalan lelah ditunjukkan bila

$$\tau_a = S_{se}$$

Sehingga dari persamaan tersebut diperoleh nilai faktor keamanan terhadap kegagalan lelah pada pegas sekunder bagian luar adalah

$$\frac{S_{se}}{\tau_a} = 1,45$$

Dan untuk pegas sekunder bagian dalam adalah

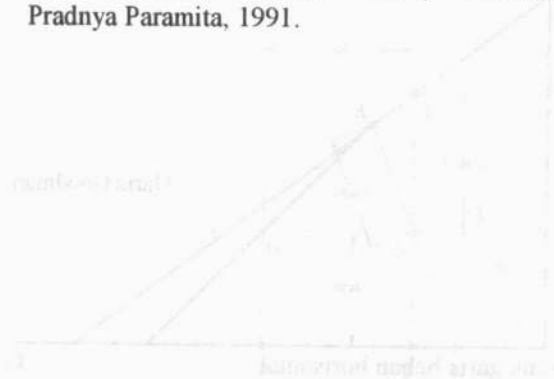
$$\frac{S_{se}}{\tau_a} = 1,78$$

Kesimpulan

Dari hasil-hasil tersebut diatas menunjukkan bahwa kedua pegas yang ditinjau dari pembebanan statis dan pembebanan dinamis adalah aman, artinya nilai-nilai yang terjadi berada dibawah nilai-nilai yang diijinkan.

Daftar Pustaka

1. Joseph E. Shigley, Larry D. Mitchell, (Gandi Harahap, Ir, M.Eng, Penerjemah), Perencanaan Teknik Mesin, Jilid 1 dan 2, Edisi Keempat, Penerbit Erlangga, 1994.
2. Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek, *Fundamental of Machine Design*, Edisi Kedua, Penerbit Wiley, 1991.
3. The Kinki Sharyo CO, LTD, Fuji Heavy Industries CO, LTD, *Maintenance Instruction Manual of Second Class Coach type BW*, Tokyo Car Corporation, 1978.
4. H. Darmawan Harsokoesoemo, Prof, Dr, Ir, Kriteria Patah Lelah untuk Perancangan Elemen Mesin, Diktat Kuliah, Jurusan Teknik Mesin ITB.
5. Sularso, Ir, MSME, *Dasar-Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*, Penerbit Pradnya Paramita, 1991.



Pemanfaatan Proses Ultrafiltrasi dalam Peningkatan Efisiensi Proses di Pabrik Gula

Oleh :

A. Romli, I. Putu. Arcana E.S, Ade Budianto

Jurusan Teknik Kimia Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Terusan Jend. Sudirman Po. Box 148 Cimahi Telp (022) 6642064

Fax (022) 6643006, e-mail: tk unjani@bdg .centrin.net.id

Abstrak

Pemurnian nira mentah di pabrik pada saat ini kebanyakan masih menggunakan proses klarifikasi konvensional. Proses ini kurang efisien karena membutuhkan energi yang cukup besar dan banyak menggunakan penambahan zat-zat kimia dalam proses klarifikasi yang mengakibatkan timbulnya limbah yang cukup besar. Energi yang besar ini digunakan untuk memanaskan nira, untuk menyediakan kebutuhan panas reaksi-reaksi kimia. Dengan hal tersebut perlu dicarikan proses alternatif yang bisa mengefisienkan proses pengolahan gula. Proses alternatif yang digunakan diantaranya yaitu dengan memanfaatkan proses ultrafiltrasi.

Proses ultrafiltrasi ialah proses pemisahan dengan menggunakan membran. Cara kerja proses ini menggunakan prinsip pemisahan berdasarkan beda berat molekul, operasi dapat dilakukan pada suhu ruang dan Tekanan merupakan faktor yang akan menggerakkan pelarut dan spesi tertentu lewat pori-pori membran.

Pemurnian nira mentah dengan proses ultrafiltrasi dapat menghasilkan transmisi sebesar 98 % dengan transmisi non sukrosa 28 % sedangkan proses pemurnian secara konvensional hanya menghasilkan transmisi sebesar 60 % dan transmisi non sukrosa 40 %. Hal ini menunjukkan bahwa proses ultrafiltrasi cukup prospektif untuk dipertimbangkan penggunaannya dalam industri pengolahan gula.

Kata kunci : nira, klarifikasi , konvensional, ultrafiltrasi, transmisi.

I. Pendahuluan

Unit klarifikasi atau pemurnian sangat penting dalam meningkatkan mutu produk gula yang bersih dan murni. Proses kimia dan fisika yang biasa dipakai dalam industri gula memiliki kekurangan-kekurangan. Limbah kimia yang dihasilkan sebagai produk samping akan mencemari lingkungan. Energi yang dibutuhkan di unit klarifikasi pun tinggi sehingga perlu biaya yang besar. Masalah tersebut perlu mendapatkan perhatian terutama dalam era industri yang menuntut penghematan energi dan industri berwawasan lingkungan. Penambahan senyawa-senyawa kimia pada proses klarifikasi yang mengakibatkan timbulnya limbah industri yang cukup besar. Proses pemurnian nira pada suhu tinggi berarti

membutuhkan biaya yang besar untuk konsumsi energinya. Suatu teknik pemurnian yang dapat menjadi alternatif pengganti unit klarifikasi konvensional adalah ultrafiltrasi.

Penggantian unit klarifikasi dengan ultrafiltrasi pada pembuatan gula tebu memiliki beberapa

keuntungan. Ultrafiltrasi dioperasikan tanpa menggunakan zat kimia pemisah. Pengoperasiannya juga lebih mudah karena menggunakan alat yang sederhana. Proses ini tidak memerlukan energi yang besar sehingga lebih ekonomis. Selain itu hasil produksi memiliki kualitas yang lebih daripada klarifikasi biasa seperti : kemurnian yang lebih tinggi, tingkat kekeruhan dan warna yang lebih rendah serta kesterilan produk yang lebih baik sebagai akibat pori membran yang kecil.

Kelebihan-kelebihan ini memungkinkan penggunaan teknik ultrafiltrasi sebagai alternatif pengganti unit klarifikasi dalam pemurnian gula tebu.

Proses ultrafiltrasi memiliki beberapa keunggulan, ternyata belum dapat diaplikasikan dalam skala

besar. Hal ini disebabkan oleh kelemahan yang ada yaitu gejala konsentrasi *polarisasi* dan *fouling*. Konsentrasi polarisasi terjadi karena pendeposisian zat-zat tersaring di permukaan membran akibat adanya fluks cairan, gejala ini merupakan gejala yang dapat balik, sedangkan *fouling* terjadi karena terdeposisinya zat-zat tersaring secara permanen.

Tujuan penelitian ini adalah: untuk mengetahui kinerja (performance) membran pada proses klarifikasi

nira mentah dengan menggunakan proses Ultrafiltrasi. Ruang lingkup penelitian ini adalah mempelajari

kemampuan membran dalam melakukan proses pemurnian nira mentah serta mengkaji konsentrasi polarisasi dan fouling dengan memvariasikan beberapa parameter operasi yaitu : tekanan antar membran dan pH umpan. Dalam percobaan ini akan digunakan membran dengan konfigurasi modul "*Spiral Wound*".

2. Tinjauan Pustaka

Proses Klarifikasi nira mentah di pabrik gula, yang memegang peranan penting untuk menjaga kualitas

gula, mengkonsumsi energi yang besar karena sebagian prosesnya beroperasi pada suhu tinggi. Selain itu

penambahan zat-zat kimia pada proses ini menghasilkan limbah yang cukup besar sebagai produk samping.

Adanya suatu teknik alternatif dalam pemurnian nira mentah yang mampu memaksimalkan pemakaian energi, mengefisienkan proses, dan mampu memaksimalkan limbah yang dihasilkan akan sangat berguna bagi perkembangan

industri gula di Indonesia. Oleh sebab itu penelitian ini berusaha mempelajari suatu alternatif teknik pemurnian nira mentah yang dapat memenuhi ketiga kegunaan diatas. Alternatif teknik tersebut adalah ultrafiltrasi.

Tebu merupakan salah satu bahan baku pembuatan gula. Zat-zat yang terkandung dalam tebu antara lain: air (69%-75%), sukrosa (8%-15%), gula reduksi (0,5%-2%), zat organik bukan gula (0,5%-1%), senyawa nitrogen (0,5%-1%), abu (0,3%-1,8%), dan serat (10%-16%).

Nira yang diperoleh dari tebu mengandung zat-zat dapat larut seperti sukrosa, partikel halus, zat antara,

dan albumin. Nira mentah mempunyai pH antara 4,9-5,6 dan bersifat kental dan keruh karena adanya partikel partikel koloid.

Nira mentah yang didapat dari proses penggilingan masih mengandung zat-zat pengotor yang tidak

dikehendaki. Zat-zat pengotor ini harus dipisahkan dari gula. Proses pemisahan nira dari zat pengotor dilakukan dalam unit klarifikasi. Proses pelaksanaan pemurnian ini dilakukan dengan cara kimia dan fisika.

Tahap pemurnian nira mentah mencakup pemurnian secara kimia dan fisika. Pemurnian secara kimia adalah pemurnian dengan menambahkan zat-zat kimia tertentu. Beberapa cara yang digunakan dalam industri adalah cara defekasi, sulfitasi, posfatasi, dan karbonatasi.

Defekasi merupakan usaha menambahkan kapur ke dalam nira mentah. Kualitas kapur yang

ditambahkan sangat penting. Sedangkan sulfitasi merupakan proses pemurnian dengan menambahkan gas SO_2 dan Ca(OH)_2 ke dalam nira mentah. SO_2 dipakai untuk menetralkan sisa kapur pada proses defekasi.

Penambahan Ca(OH)_2 bertujuan menetralkan asam dalam nira dan membantu pengendapan. Reaksi yang terjadi pada proses ini $T = 245^\circ\text{F}$, dan $P = 1 \text{ atm}$.

Endapan CaSO_3 yang dihasilkan akan menghasilkan kotoran pada nira yang akan diendapkan.

Posfatasi dilakukan dengan menambahkan asam posforit ke dalam nira mentah agar dihasilkan endapan

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang akan mengikat partikel koloid dan zat warna. Penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CO_2 yang akan menghasilkan CaCO_3 dan gum dilaksanakan pada proses karbonatasi.

Proses pemurnian secara fisika dilakukan setelah pemurnian secara kimia. Proses ini akan memisahkan pengotor dari nira bersih dengan dekantasi dan filtrasi. Dekantasi dimaksudkan untuk mengendapkan kotoran yang terdapat dalam nira. Pengendapan terjadi karena adanya pengaruh gaya berat partikel. Larutan yang telah dipisahkan disaring lagi melalui proses filtrasi untuk menghilangkan sisa kotoran yang masih ada. Larutan nira bersih dengan komponen utamanya selanjutnya dialirkan ke unit penguapan untuk tujuan penguapan.

Ultrafiltrasi biasanya digunakan untuk pemurnian secara simultan, pengkonsentrasian dan pemisahan suspensi makromolekul-makromolekul atau suspensi koloid. Prosesnya tidak melibatkan perubahan fasa atau perpindahan massa antarfasa.

Menurut Hwang dan Kammermeyer (1975) membran didefinisikan sebagai "Suatu lapisan pemisah yang terletak diantara dua fasa". Lakshminarayanaiah (1984) mendefinisikan membran dengan "Suatu fasa yang berlaku sebagai dinding untuk mencegah pergerakan aliran komponen tertentu namun membiarkan dan atau mengatur lewatnya sebagian atau lebih spesi tertentu," dengan

demikian suatu membran dapat berupa gas, cair, padatan atau kombinasi ketiganya. Susunan filter terbagi menjadi dua berdasarkan cara terjadinya penyaringan: "depth filter" dan "screen

filter". Pada depth filter terjadi pergerakan partikel dalam materi penyaring. Filter ini terdiri dari kumpulan serat matrik yang acak dan tak tentu arah.

Bahan membran dapat berasal dari alam maupun buatan. Membran buatan dapat dipersiapkan dari polimer, misalnya : selulosa, polikarbonat, polisulfon, atau modifikasi dari polimer-polimer yang sudah ada seperti sulfonat polisulfone. Keuntungannya adalah rendahnya tekanan operasi yang akan mengurangi harga peralatan operasi pompa. Tidak adanya perubahan fasa menyebabkan penghematan energi yang lebih besar dibandingkan proses evaporasi. Belum lagi biaya untuk instalasi mekanik dan sistem instalasi uap. Tidak ada aliran kukus dan kondensor yang diperlukan dalam ultrafiltrasi memberikan keuntungan dihindarinya polusi termal dan sistem pengolahan limbah dalam skala yang besar. Suhu operasi yang sedang tidak menyebabkan perubahan lingkungan sehingga tidak mengubah kondisi aliran selama operasi.

Beberapa keterbatasan dalam proses ultrafiltrasi adalah tidak dapat dilakukan dalam suasana berkonsentrasi tinggi. Daya tahan membran terhadap retentat terbatas sampai jumlah tertentu. Rendahnya fluks yang diperoleh karena terkonsentrasinya makromolekul dan tingginya viskositas retentat menyulitkan pemompaan. Masalah lain yang terjadi adalah peristiwa fouling dan proses pembersihan modul serta terbatasnya kondisi operasi.

Persamaan dasar yang digunakan untuk menghitung fluks adalah :

$$J = \frac{Q}{A} = \frac{C_p \Delta P}{32 \mu L} \quad (2.1)$$

Dimana J adalah fluks aliran, ε adalah jumlah pori per satuan luas membran, d_p adalah diameter pori, ΔP

merupakan tekanan operasi, Δx tebal membran dan μ viskositas pelarut.

Persamaan tersebut berlaku dalam kondisi ideal dengan asumsi pori berbentuk lingkaran, diameter pori berukuran sama, letak pori seragam. Pada kenyataannya kondisi tersebut jarang terjadi. Lagi pula ada pengaruh konsentrasi pada retentat dan pengaruh kimia yang terlibat dalam proses. Untuk itu ada suatu persamaan yang lebih umum dan sederhana untuk penentuan besar fluks aliran, yaitu :

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (2.2)$$

dimana R_m adalah tahanan intrinsik membran

Tahanan fluks dalam prakteknya tidak hanya disebabkan tahanan intrinsik membran. Dalam

perhitungannya tahanan fluks merupakan akumulasi tahanan-tahanan yang dapat timbul selama operasi. Tahanan ini bisa disebabkan karena terjadinya gejala konsentrasi polarisasi dan fouling.

Ada beberapa jenis alat yang dirancang dalam industri proses yang menggunakan membran. Pada dasarnya ada empat tipe yang umum dari peralatan yang dirancang untuk proses pemisahan menggunakan membran yaitu : "tubular", "hollow fiber", "plate dan frame", dan "spiral wound". Pemilihan terhadap konfigurasi modul yang akan digunakan dalam operasi disesuaikan dengan faktor ekonomis dengan

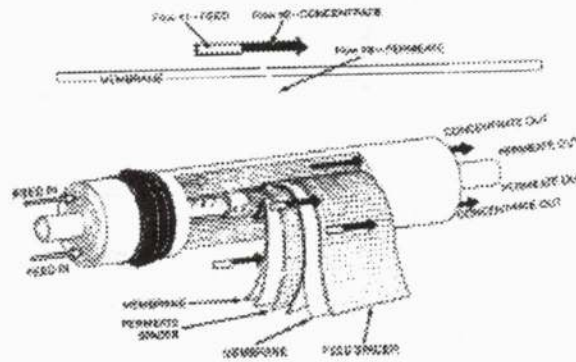
menggunakan suatu teknik yang tepat dalam pengoperasiannya.

Konfigurasi membran hollow fiber merupakan konfigurasi baru yang digunakan dalam perancangan proses ultrafiltrasi. Diameter hollow fiber berkisar antara 0,19-1,25 mm. Ketebalan fiber umumnya 200 μm .

Pada proses ultrafiltrasi dengan hollow fiber umpan dipompa melalui bagian dalam tabung. Membran terpasang di bagian luar pipa dan sekaligus berfungsi sebagai tabung. Aliran umpan yang melewati bagian tengah tabung akan dipisahkan permeatnya di seluruh permukaan tabung membran. Pemisahan dengan modul ini dapat berjalan secara efektif karena pemisahannya terdistribusi merata.

Plate membran berbentuk datar dihubungkan dengan lempengan logam terletak di antara plate dan ditempel untuk membentuk suatu tumpukan. Aliran dipompa sejajar melewati tumpukan plate membran. Pada jenis plate dan frame ini di antara kedua membran diletakan pembatas membran.

Modul spiral wound merupakan modul dengan membran berbentuk segiempat yang digulung mengelilingi suatu pipa secara berlapis-lapis. Di antara membran-membran itu ada suatu ruangan permeat. Satu gulungan diletakan seri dengan gulungan lain dan ditutupi dengan suatu pembatas berbentuk silindris. Aliran umpan masuk dari bagian ujung pipa silindris memanjang searah dengan aliran retentat. Sedangkan permeat masuk melewati membran secara radial dan dikumpulkan di bagian tengah pipa pengumpul permeat (lihat gambar 2).



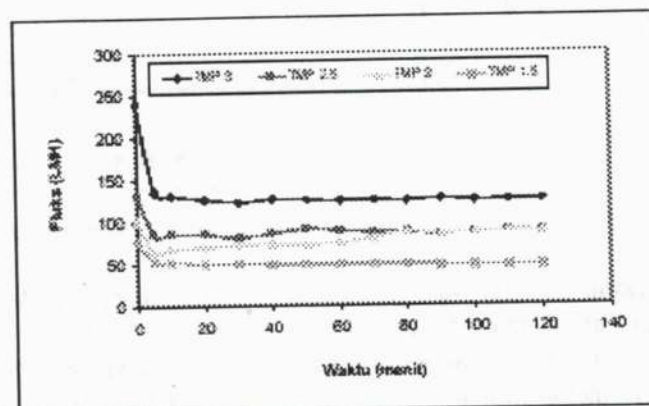
Gambar 2. Skema dan Prinsip Modul Spiral Wound

Masalah yang paling banyak membatasi pengaruh tekanan penggerak dalam proses membran khususnya aliran umpan multikomponen adalah fouling pada membran. Terjadinya gejala ini dapat terlihat pada penurunan laju alir, jika seluruh parameter operasi seperti tekanan, laju alir umpan, temperatur, konsentrasi umpan tetap. Masalah fouling yang menyebabkan lambatnya penerimaan proses ultrafiltrasi dalam bidang

industri.

3. Hasil dan Pembahasan

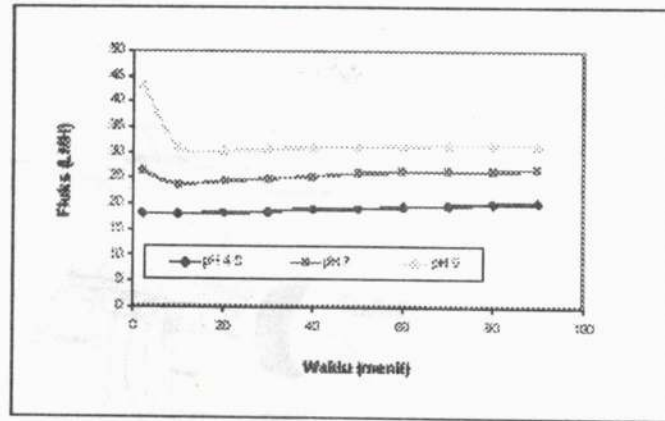
Hasil percobaan dengan memvariasikan tekanan dan pH operasi untuk setiap tempuhan percobaan pada kondisi laju alir yang ditetapkan.



Gambar 3.1. kurva fluks vs waktu pada berbagai tekanan dengan menggunakan larutan gula dengan konsentrasi 10%.

Percobaan dengan variasi tekanan : 1,5 bar; 2 bar ; 2,5 bar; dan 3 bar, terlihat bahwa fluks akan meningkat dengan meningkatnya harga tekanan . Fenomena lain yang dapat dilihat dalam gambar tersebut bahwa dengan semakin tingginya tekanan proses

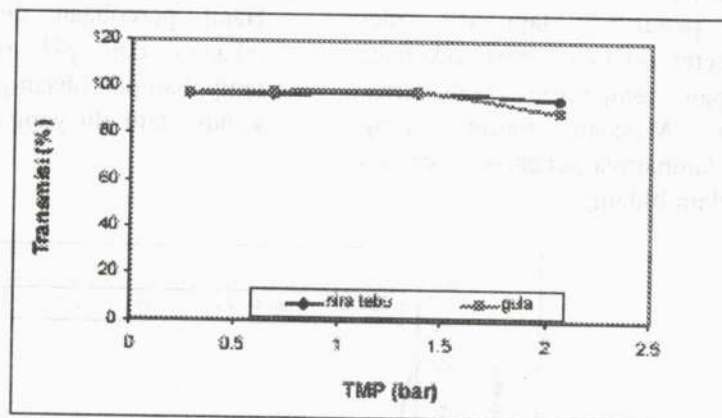
akan memberikan penurunan nilai fluks pada lima menit awal cukup landai dibandingkan dengan penurunan nilai fluks pada tekanan 3 bar yang memperlihatkan penurunan nilai fluks permeat yang sangat tajam.



Gambar 3.2. kurva fluks nira tebu vs waktu pada berbagai pH dengan tekanan 1.37 bar.

Pengaruh pH terhadap interaksi umpan dengan membran. Seperti terlihat fluks menurun dengan menurunnya harga pH. Hal ini terjadi karena adanya ion pada pH ini, ikatan-ikatan ion akan mendorong meningkatnya ukuran protein. Seperti

dikemukakan oleh Matthiasoon pada study static proses adsorpsi dengan menggunakan membran polysulfon dan selulosa asetat menemukan bahwa adsorpsi meningkat dengan menurunnya pH.



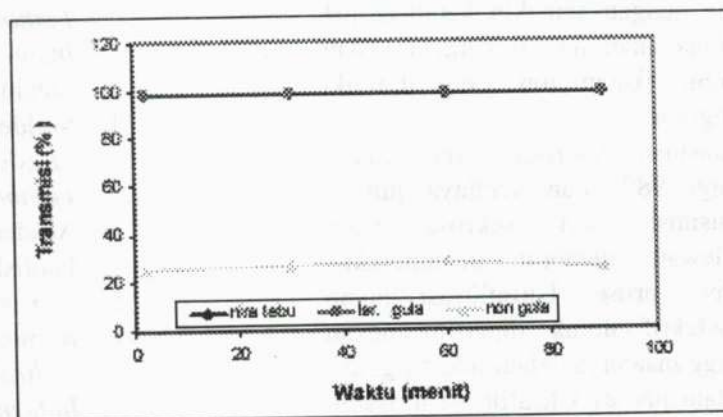
Gambar 3.3. kurva transmisi vs tekanan pada pH 9

Hubungan transmisi sukrosa dengan tekanan, dari sini kurva antara larutan gula dengan nira hasil ultrafiltrasi memiliki tren yang sama dan menghasilkan transmisi sukrosa yang cukup tinggi yaitu 98 %. Besarnya harga transmisi sukrosa terutama tekanan di bawah 1,37 bar yang memiliki harga cukup stabil dibandingkan dengan tekanan di atas 1,37 bar sampai dengan 2,07 bar. Keadaan ini

disebabkan pada tekanan yang kecil (di bawah 1,37) sangat memungkinkan terjadinya penurunan polarisasi konsentrasi maupun fouling dari permukaan membran. Lemahnya tekanan / gaya dorong yang diberikan akan menyebabkan komponen pengotor yang menempel pada permukaan membran akan dengan mudah dibersihkan / disapu oleh laju alir umpan. Sedangkan pada tekanan diatas 1,37 bar sampai 2,07

bar menyebabkan interaksi antara larutan umpan dengan membran semakin kuat.. Kondisi ini jelas memberikan peluang

terbentuknya fouling dan polarisasi konsentrasi yang tinggi.

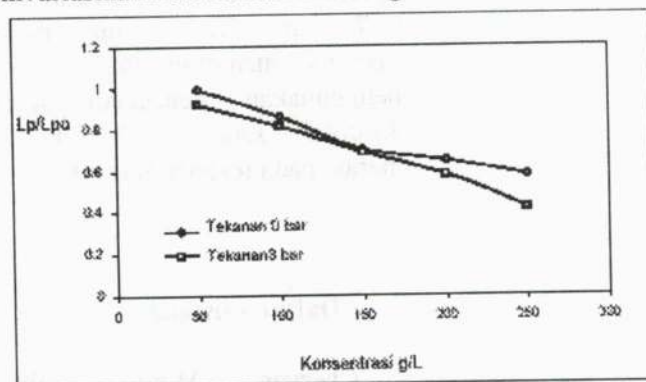


Gambar 3.4. Kurva transmisi vs waktu. pada tekanan 1.37 bar, dan pH 7

Hubungan antara transmisi dengan lamanya waktu operasi dapat dilihat pada gambar 3.4. Secara umum transmisi yang dihasilkan oleh larutan gula sebesar 98,61 % dan nira tebu sebesar 98,18 % dengan transmisi non gula sebesar 28 %. Transmisi yang relative besar dan konstan terhadap waktu operasi dengan transmisi non sukrosa yang cukup rendah mengidentitifikasikan bahwa proses Ultrafiltrasi yang cukup prospektif dimanfaatkan sebagai pengganti proses konvensional yang proses pemurniannya menghasilkan produk dengan kandungan sukrosa dan pengotor masing-masing 63,5 % dan 44,8 %.

Untuk mengetahui besarnya pengaruh tekanan yang diberikan terhadap fenomena fouling yang dihasilkan dalam setiap proses salah satunya dapat dilakukan dengan membandingkan Lpo dan Lpt (permeabilitas awal dan permeabilitas akhir) proses. Apabila harga Lpt/Lpo mendekati harga satu berarti penurunan fluks sangat kecil. Sebaliknya jika harga Lpt / Lpo yang diperoleh memiliki harga mendekati nol artinya penurunan fluksnya semakin besar.

Percobaan dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi larutan gula.



Gambar 3.5. Karakteristik Lpt/Lpo terhadap perubahan konsentrasi larutan gula

4. Kesimpulan

1. Kenaikan pH umpan akan semakin mempercepat penyumbatan pori membran akibat semakin banyaknya pengotor pada umpan karena jumlah kapur yang ditambahkan semakin banyak begitu juga dengan semakin kecilnya pH karena akan terjadi penggumpalan karena ikatan ion yang dimiliki pengotor.
2. Transmisi sukrosa yang cukup tinggi 98% dan kecilnya jumlah transmisi non sukrosa yang melewati membran menunjukkan bahwa proses Ultrafiltrasi cukup prospektif untuk dipertimbangkan penggunaannya dalam industri gula.
3. Dalam proses Ultrafiltrasi terhadap nira tebu dengan membran polisulfon dengan MWCO 100000 kondisi operasi optimum yang diperoleh adalah pH 7 dengan TMP 1,37 bar. Dan untuk proses recovery membran masih cukup menggunakan pencucian secara eksternal saja dengan kondisi operasi pada tekanan 0 (nol).

Daftar Pustaka

1. Cheryan, Munir, (1986), *"Ultrafiltration Handbook"*, (Technomic Publishing

Company Inc), Pensylvania USA.

2. D.F.Day,(1992),*"Ultrafiltration and The Sugar Industries"*,Journal ASSCT, volume1, hal 74-78.
3. Moedokusumo A, (1993), *"Pengawasan Kualitas dan Teknologi Pembuatan Gula di Indonesia"*, (Penerbit ITB), Bandung.
4. Mulder, Marcel, (1991), *"Basic Principles of Membrane Technology"*,(Kluwer Academic Publisher),Nederlands.
5. S. Kishihara, S. Fujii, and M. Komoto, (1983), *"Ultrafiltration of Cane Juice: Influence of flux and quality of permeate"*,(Departement of Agricultural Chemistry, Faculty of Agriculture Kobe University), Japan.
6. S. Kishihara, S. Fujii, and M. Komoto, (1983), *"Improvement of flux in Ultrafiltration of Cane Juice"*, (Departement of Agricultural Chemistry, Faculty of Agriculture Kobe University), Japan
7. Wenten I G, (1999), *"Teknologi Membran Industrial : Peristiwa Fouling"*, (Penerbit ITB), Bandung.

KORELASI ANTARA NILAI N-SPT DENGAN NILAI KOHESI DAN SUDUT GESER DALAM PADA TANAH LEMPUNG

Oleh

Ronni Ibnu Sabil¹⁾, Denny Wahyudin²⁾, Dian Christian²⁾, Elbi Jagat Rizeka²⁾, Mohammad Dasuki Nasution²⁾

¹⁾Tenaga pengajar pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani.

²⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani.

ABSTRAK

Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah merupakan parameter kekuatan geser tanah (*soil shear strength*), yang sering digunakan di dalam perancangan bangunan yang berkaitan dengan bidang geoteknik. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah tersebut diperoleh melalui tes triaksial, yang memerlukan biaya peralatan, metoda, waktu yang besar. Di samping itu, akurasi data yang diperoleh akibat metoda pengambilan contoh tanah, sangat bergantung pada tingkat ketergangguan contoh tanah yang akan ditinjau.

Oleh karena itu perlu ditelusuri hubungan antara nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah dengan parameter kekuatan tanah yang dapat diperoleh melalui tes lapangan yang lebih sederhana serta tidak dipengaruhi oleh ketergangguan tanah akibat cara pengambilan contoh. Salah satu metoda praktis untuk mengetahui kekuatan tanah di lapangan (*in situ*) adalah melalui *Standard Penetration Test (SPT)*. Dengan mengabaikan pengaruh riwayat pembebanan tanah, maka penelitian ini dilaksanakan untuk menelusuri hubungan antara sudut geser dalam tanah dan kohesi terhadap nilai N-SPT. Hasil studi penelitian terhadap tanah lempung jenis CH, dan OH, MH yang diambil dari Cibeber, Cimahi, Jawa Barat, menunjukkan adanya korelasi positif antara nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah terhadap N-SPT.

Kata kunci : Kohesi, Sudut Geser Dalam Tanah, Nilai N-SPT.

Pendahuluan

Semua bangunan prasarana wilayah seperti gedung, jalan, bendungan, saluran irigasi, bandar udara, pelabuhan, dan sebagainya tidak dapat terlepas dari tanah sebagai penyangganya. Oleh karena itu, penyelidikan sifat serta perilaku fisik tanah merupakan salah satu dari unsur masukan utama yang mutlak harus ada pada proses rekayasa rancang bangun prasarana wilayah.

Sifat fisik serta perilaku tanah tersebut diperlukan sebagai parameter perancangan agar bangunan prasarana yang berdiri di atasnya dapat berfungsi sesuai tujuan serta kriteria yang telah ditetapkan pada tahap perancangan.

Kekuatan geser tanah, yang dinyatakan dalam nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah merupakan parameter utama di dalam

analisis daya dukung tanah terhadap beban yang terjadi di atasnya. Namun demikian untuk memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah tersebut diperlukan tes triaksial yang pelaksanaannya cukup rumit dan memerlukan biaya yang mahal. Di samping itu, ketersediaan peralatan triaksial ini sangat jarang.

Oleh karena itu perlu dicari metoda sederhana yang murah untuk dapat memperoleh nilai parameter kekuatan tanah dasar tersebut.

Penelitian ini merupakan studi penelusuran hubungan empirik antara nilai N-SPT dengan nilai kohesi tanah, dan nilai N-SPT dengan sudut geser dalam tanah melalui data tes di laboratorium dan tes lapangan. Penelusuran hubungan empirik dilakukan melalui analisis statistik berdasarkan kaidah analisis korelasi, dan regresi, dengan

mengabaikan pengaruh riwayat pembebanan tanah, dan variasi kadar air tanah.

Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh :

- ❖ Kepastian adanya korelasi antara N-SPT dengan kohesi
- ❖ Persamaan/rumus empirik antara N-SPT dengan kohesi
- ❖ Kepastian adanya korelasi antara N-SPT dengan sudut geser dalam tanah.
- ❖ Persamaan/rumus empirik antara N-SPT dengan sudut geser dalam tanah.

Persamaan empirik antara N-SPT dengan kohesi dan antara N-SPT dengan sudut geser dalam tanah dapat digunakan :

- ❖ untuk memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah cukup diperoleh dari nilai tes lapangan SPT yang lebih sederhana dan murah.
- ❖ untuk memperoleh nilai parameter kekuatan geser dalam tanah diperlukan waktu yang lebih cepat.
- ❖ masalah kesulitan peralatan triaksial di lapangan dapat teratasi.

Tinjauan Pustaka

Di dalam praktek rekayasa rancang bangun sipil, para pakar ilmu tanah (geotechnical engineer) banyak menggunakan tes tanah langsung di lapangan, salah satunya adalah Tes Penetrasi Standar (*Standard Penetration Test* yang sering dikenal sebagai *SPT*). Dari tes ini akan didapat parameter kekerasan tanah yang dinyatakan dalam N-SPT yaitu jumlah tumbukan yang diperlukan untuk menekan ujung alat sampai kedalaman tertentu. Nilai ini dijadikan dasar perancangan fondasi bangunan. SPT ini sangat sederhana dan tidak memerlukan biaya yang mahal di dalam pelaksanaannya.

Karena nilai SPT juga berkaitan dengan kekuatan tanah seperti halnya Tes Triaksial, maka sangat dimungkinkan terjadinya hubungan yang dekat antara kedua parameter tersebut. Jika ternyata memang terdapat hubungan yang erat, dengan nilai korelasi yang tinggi, maka untuk

memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah, dapat diperoleh dari nilai SPT. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian guna menelusuri persamaan empirik yang menyatakan hubungan antara N-SPT dengan kohesi tanah, dan hubungan N-SPT dengan sudut geser dalam tanah.

Kekuatan geser tanah (*soil shear strength*) adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. (Hardiyatmo, 1992).

Berdasarkan pengertian tersebut, jika tanah mengalami pembebanan, beban tersebut akan ditahan oleh :

- ❖ Kohesi tanah (dinyatakan dalam kohesi c) yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya.
- ❖ Gesekan antar butir (dinyatakan dalam sudut geser dalam tanah ϕ) yang bergantung pada susunan dan komposisi ukuran butiran tanah.

Menurut Coulomb (1776), kekuatan tanah tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (1)$$

Dengan : τ = kekuatan geser tanah

c = kohesi

σ = tegangan normal yang bekerja

ϕ = sudut geser dalam tanah

Parameter c dan f diperoleh dari pengujian laboratorium contoh tanah melalui tes geser langsung atau triaksial.

Tes penetrasi standar (*Standard Penetration Test*) merupakan tes tanah di lapangan untuk mengukur secara empirik langsung kekuatan tanah. Parameter kekuatan tanah dinyatakan dalam jumlah tumbukan yang diperlukan untuk menembus 30 cm tanah, yang dinyatakan dalam N-SPT.

Tes ini merupakan tes yang cepat dan lebih murah, walaupun tidak dapat menunjukkan keterkaitan teoritis fenomena keruntuhan tanah. (Seed, 1986)

Berbagai penelitian terdahulu telah dilakukan oleh para pakar geoteknik untuk menelusuri persamaan empirik hubungan antara hasil tes laboratorium dengan hasil tes lapangan. Penelitian itu diharapkan untuk

membantu mempermudah pelaksanaan proses perencanaan fondasi dan struktur bawah lainnya, yang berhubungan erat dengan bidang ilmu geoteknik.

Sampai saat ini, hubungan antara kohesi dan sudut geser dalam tanah belum pernah ditelusuri dengan menggunakan metoda-metoda empirik yang didasarkan pada kaidah analisis statistik.

Karena N-SPT, kohesi, dan sudut geser dalam tanah merupakan parameter kekuatan geser tanah, yang dipengaruhi oleh lekatan antar butir serta posisi antar butir tanah, maka kemungkinan besar ada korelasi positif antara ketiga parameter tersebut.

Beberapa dugaan yang digunakan adalah :

- 1). Semakin besar nilai N-SPT, maka semakin besar nilai kohesi tanah.
- 2). Semakin besar nilai N – SPT, maka semakin besar nilai sudut geser dalam tanah.
- 3). Hubungan empirik parameter tersebut akan dinyatakan dalam bentuk :

$$c = f(N-SPT) \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi = f(N-SPT) \dots\dots\dots (3)$$

METODA

Penelitian ini akan menggunakan metoda penyelidikan eksperimental, melalui tes langsung di laboratorium dan di lapangan.

Tes Laboratorium meliputi :

- ❖ Tes sifat fisik tanah meliputi, berat isi, berat jenis, kadar air, ukuran dan gradasi butir, serta tes batas-batas konsistensi tanah.
- ❖ Tes triaksial untuk memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah.

Tes Lapangan meliputi :

- ❖ Tes Pengeboran, untuk memperoleh gambaran visual deskriptif tentang jenis tanah yang diuji serta pengambilan contoh tanah untuk keperluan tes laboratorium.
- ❖ Tes penetrasi standar untuk memperoleh N-SPT.

Untuk dapat memenuhi persyaratan analisis statistik, maka sekurang kurangnya diperlukan nilai N-SPT, kohesi dan sudut geser dalam tanah masing-masing 20 (dua puluh) buah untuk jenis tanah yang berpasangan sama.

Contoh tanah akan diambil dari lima titik lokasi, dengan masing-masing titik akan diambil 4 kedalaman yaitu 1 meter, 2 meter, 3 meter dan 5 meter. Dengan demikian dari kelima titik tersebut akan diperoleh 20 contoh.

Dari data utama yang terkumpul akan dilakukan analisis sebagai berikut :

- ❖ Analisis Pendukung
Untuk deskripsi tanah, akan digunakan analisis USCS.
- ❖ Analisis Utama
Untuk memperoleh persamaan/rumus empirik hubungan antara N-SPT dengan kohesi dan sudut geser dalam, dari data yang terkumpul akan dilakukan regresi dengan berbagai persamaan pendekatan yaitu, linear, eksponensial, logaritmik. Untuk masing-masing persamaan pendekatan tersebut kemudian dipilih persamaan terbaik, yang menunjukkan korelasi dan signifikasi paling baik.

Pengambilan contoh akan dilakukan di lima titik di wilayah kampus Universitas Jenderal Achmad Yani Cimahi. Untuk masing-masing titik lokasi pengambilan, akan diambil contoh untuk lima kedalaman yaitu 1 meter, 2 meter, 3 meter, dan 4 meter.

Hasil Penelitian

Dari hasil pengujian sifat fisik, dengan menggunakan metoda klasifikasi USCS, tanah yang digunakan di dalam penelitian ini tergolong jenis lempung kepasiran dengan plastisitas tinggi, dan jenis lempung organik kepasiran.

Dari hasil tes triaksial dan SPT, diperoleh korelasi positif yang menunjukkan hubungan antara N-SPT dengan sudut geser dalam, dan nilai kohesi.

Persamaan empirik terbaik hubungan antara N-SPT dengan kohesi yang diperoleh dari studi ini adalah :

$$c = -0,0004 N_{spt}^2 + 0,0221 N_{spt} - 0,0003 \dots\dots\dots (4)$$

Dengan : c = nilai kohesi [kg/cm²]

N_{spt} = nilai N-SPT (tumbukan).

Persamaan tersebut diperoleh melalui regresi dengan koefisien korelasi 0,82

Hubungan empirik terbaik antara N-SPT dengan sudut geser dalam tanah yang diperoleh dari studi ini adalah :

$$\phi = - 0,0004 N_{spt}^2 + 0,2026 N_{spt} + 1,7092$$

..... (5)

Dengan : ϕ = sudut geser dalam tanah [o]

N_{spt} = nilai N-SPT(tumbukan)

Persamaan ini diperoleh dengan menggunakan regresi, dengan koefisien korelasi 0,72.

Persamaan (4) dan (5) diperoleh melalui studi penelitian yang didasarkan pada hasil pengujian tanpa memperhatikan riwayat pembebanan tanah dan variasi kadar air tanah untuk jenis tanah lempung OH, MH, dan CH. Oleh karena itu, penggunaan persamaan tersebut dibatasi untuk jenis-jenis lempung tersebut, dan sebatas untuk penaksiran awal nilai sudut geser dalam, dan kohesi dari nilai N-SPT.

Kesimpulan

Dari studi penelitian ini dapat diperoleh hasil sebagai berikut.

1. Dengan mengabaikan pengaruh riwayat pembebanan tanah, dan variasi kadar air, diperoleh hubungan antara kohesi, dan sudut geser dalam tanah dengan nilai N-SPT.
2. Hubungan antara kohesi dan sudut geser dalam tanah tersebut dapat didekati dengan persamaan kuadrat.
3. Persamaan yang diperoleh hanya dapat digunakan untuk melakukan penaksiran awal parameter kuat geser tanah untuk tanah jenis OH, MH, dan CH.
4. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk jenis tanah yang lain, dengan memperhatikan riwayat pembebanan, dan variasi kadar air.
5. Perlu dilakukan validasi pengujian untuk tanah dari lokasi lain.

Daftar Pustaka

1. Hardiyatmo, Hary Christady, 1992, *Mekanika Tanah 1*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
2. Robert D. Holtz and William D. Kovacs, 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall.
3. Ronni, I.S., 1993, *Assessment of Relationship Between Subgrade Modulus and CBR*, PPS-STJR, ITB, Bandung.
4. Seed, H.B., Tokimatsu, K., and Harder, L., 1984. *The Influence of SPT Procedures in Evaluating Soil Liquefaction Resistance*, Report UCB/EERC-84-15, Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley.
5. Skempton, A.W., 1986, *Standard Penetration Test Procedures and Effects in Sand of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation.*, *Geotechnique* 36: pp. 425-447.



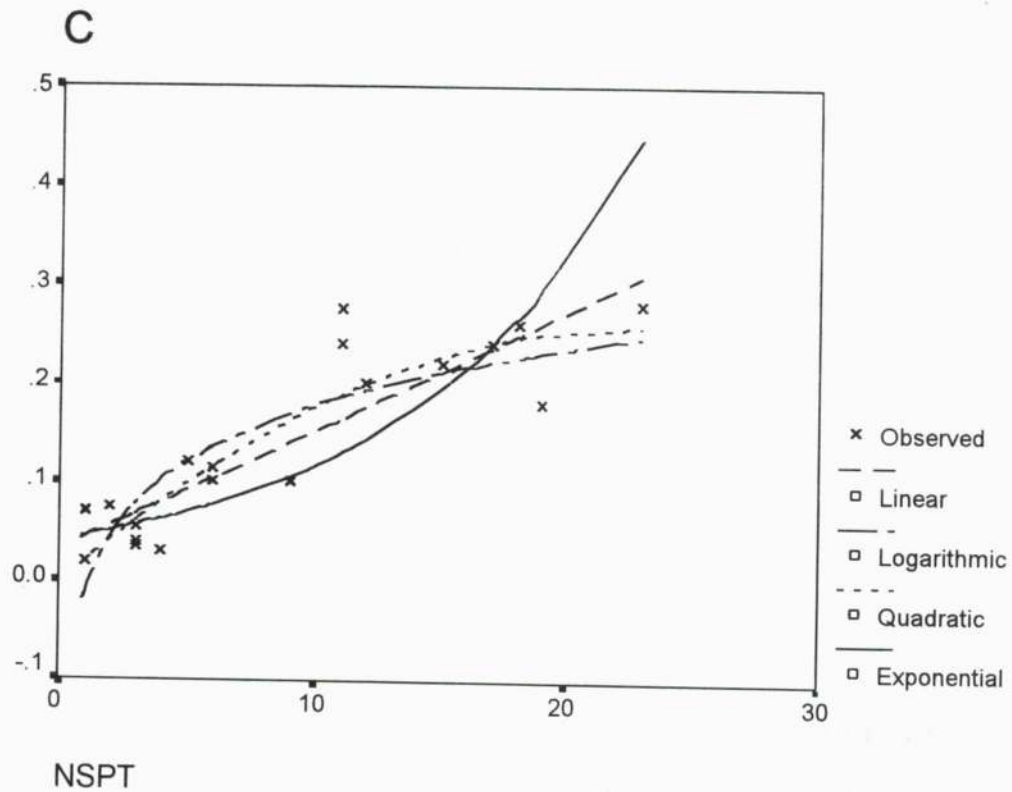
LAMPIRAN

Korelasi Nspt Dengan Kohesi (c)

MODEL: MOD_23.

Independent: NSPT

Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2
C	LIN	.780	18	63.74	.000	.0314	.0120	
C	LOG	.740	18	51.15	.000	-.0130	.0828	
C	QUA	.823	17	39.65	.000	-.0028	.0229	-.0005
C	EXP	.694	18	40.86	.000	.0415	.1034	



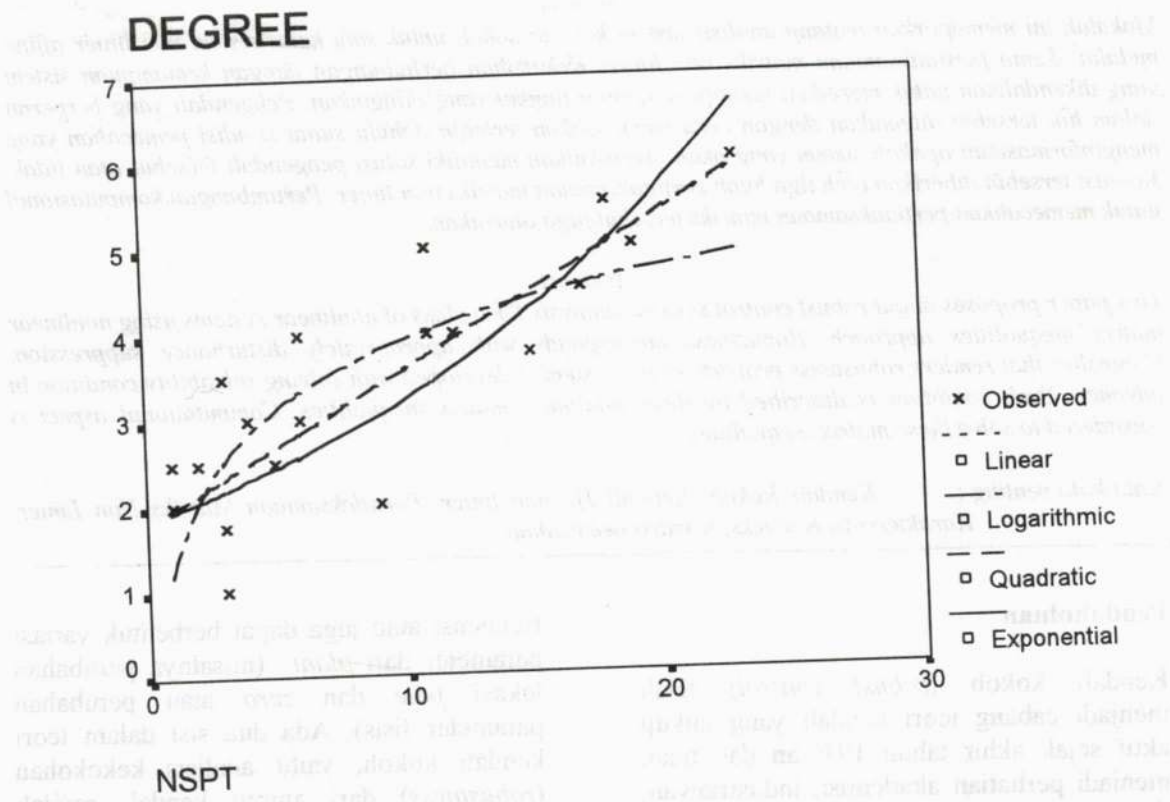
Gambar 1 Grafik Analisa Regresi Antara Kohesi (c) dan Nspt

Korelasi Nspt dengan Sudut Geser Dalam (ϕ)

MODEL: MOD_1.

Independent: NSPT

Dependent	Mth	Rsqr	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2
DEG	LIN	.719	18	46.10	.000	1.7389	.1932	
DEG	LOG	.599	18	26.89	.000	1.1761	1.2474	
DEG	QUA	.719	17	21.78	.000	1.7092	.2026	-.0004
DEG	EXP	.563	18	23.23	.000	1.8273	.0586	



Gambar 2 Grafik Analisa Regresi Antara Sudut Geser Dalam (ϕ) dan Nspt

ANALISIS SISTEM KENDALI KOKOH PADA SISTEM NON LINIER DENGAN PENDEKATAN PERTIDAKSAMAAN MATRIKS NON LINIER

Asep Najmurokhman
Jurusan Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani
e-mail : asepnajmu@lycos.com

Abstrak

Makalah ini memaparkan tentang analisis sistem kendali kokoh untuk satu kelas sistem non linier affine melalui skema pertidaksamaan matriks non linier. Kekokohan berhubungan dengan kemampuan sistem yang dikendalikan untuk meredam gangguan sampai tingkat yang diinginkan. Pengendali yang berperan dalam hal tersebut ditemukan dengan cara memecahkan terlebih dahulu suatu kondisi pemecahan yang menginformasikan apakah sistem yang akan dikendalikan memiliki solusi pengendali tersebut atau tidak. Kondisi tersebut diberikan oleh tiga buah pertidaksamaan matriks non linier. Pertimbangan komputasional untuk memecahkan pertidaksamaan matriks tersebut juga diuraikan.

Abstract

This paper proposes about robust control systems analysis for a class of nonlinear systems using nonlinear matrix inequalities approach. Robustness corresponds with appropriately disturbance suppression. Controller that renders robustness property of the system is developed with solving solvability condition in advance. Such condition is described by three nonlinear matrix inequalities. Computational aspect is considered to solve these matrix inequalities.

Kata-kata penting : Kendali Kokoh, Kendali H_∞ non linier, Pertidaksamaan Matriks Non Linier, Karakterisasi Konveks, Kondisi pemecahan

Pendahuluan

Kendali kokoh (*robust control*) telah menjadi cabang teori kendali yang cukup aktif sejak akhir tahun 1970-an dan telah menjadi perhatian akademisi, industriawan, dan pemerintahan. Menurut Dailey (1995), teori kendali modern menyandarkan pada model matematis dari *plant* (sistem) yang dikendalikan. Dalam dunia nyata, selalu ada ketidakpastian (*uncertainty*) dalam pemodelan tersebut yang menyebabkan terjadinya perbedaan antara respon aktual *plant* dengan respon dari modelnya. Lebih dari itu, *plant* dapat berubah akibat usia komponen subsistemnya atau karena perubahan kondisi operasinya. Tujuan dari kendali kokoh adalah membangun aturan kendali umpan balik (*feedback control laws*) yang kokoh terhadap ketidakpastian model dan perubahan dinamika *plant*.

Ketidakpastian dalam pemodelan dapat dinyatakan dengan beberapa cara, yaitu dengan bentuk batas variasi dalam respon

frekuensi atau juga dapat berbentuk variasi parameter dari *plant* (misalnya perubahan lokasi *pole* dan *zero* atau perubahan parameter fisis). Ada dua sisi dalam teori kendali kokoh, yaitu analisis kekokohan (*robustness*) dari aturan kendali setelah dirancang serta sintesis aturan kendali kokohnya. Dailey (1995) melaporkan analisis kekokohan melibatkan analisis nilai singular, analisis μ , pemodelan dengan transformasi fraksi linier (*linear fractional transformation-LFT*), dan analisis kestabilan kokoh dengan teorema Kharitonov, sedangkan sintesisnya meliputi sintesis H_∞ , *Q-design* dengan parameterisasi Youla, metode kuadrat linier, metode *mix-norm*, dan optimisasi numerik dari aturan kendalinya. Pada makalah ini akan digunakan metode H_∞ sebagai sintesisnya.

Pada tahun-tahun terakhir, konsep kendali H_∞ (konsep penguatan L_2 berhingga - *finite* L_2 -gain) sebagai ukuran kinerja sistem telah dikembangkan dalam perancangan sistem kendali untuk sistem linier maupun sistem

non linier. Pada sistem linier, ukuran kinerja penguatan berhingga merupakan cara yang efektif untuk menangani permasalahan pengendalian praktis [Green, et. al., 1995]. Penggunaan istilah $norm H_{\infty}$ untuk perancangan kendali kokoh (*robust control*) diantaranya digunakan oleh Maciejowski (1989). Permasalahan perancangan dalam praktek dapat diklasifikasikan menjadi :

- a. stabilisasi kokoh (*robust stabilization*) terhadap ketidakpastian yang tidak terstruktur
- b. pembentukan kinerja (*performance shaping*) untuk sistem nominal

Dengan memanfaatkan teknik penguatan kecil (*small gain*), stabilitas dari sistem yang terdiri atas model nominal dan deskripsi ketidakpastiannya dapat diuji [Green, et. al., 1995]. Ketidakpastian yang ada dalam sistem bisa berbentuk gangguan aditif atau multiplikatif serta bisa juga muncul sebagai gangguan di bagian masukan ataupun keluaran. Teorema penguatan kecil menjamin stabilitas dari sistem jika perkalian antara $norm H_{\infty}$ dari model gangguan dan $norm H_{\infty}$ dari model nominal kurang daripada satu [Green, et. al., 1995]. Dalam pembentukan kinerja, ada dua pendekatan untuk menghasilkan kinerja yang diharapkan. Pendekatan pertama, yang biasa disebut perancangan pembentukan lingkaran (*loop shaping design*), perancang membentuk sejumlah kuantitas lingkaran tertutup yang mencerminkan perilaku utama lingkaran tertutup dalam skema iteratif [Green, et. al., 1995]. Nilai singular dari fungsi sensitivitas dan fungsi komplementer sensitivitas adalah kuantitas yang biasa digunakan dalam pendekatan ini. Pendekatan kedua biasanya dilakukan dengan merumuskan kriteria kinerja yang dihasilkan sebagai kriteria peredaman gangguan (*disturbance attenuation criterion*) [Yuliar, 1996].

Pada sistem non linier, stabilitas kokoh dapat dicari secara prinsip dengan menerapkan teorema penguatan kecil [Hill, et. al., 1976]. Dalam praktek, informasi yang berkaitan ukuran dan lokasi ketidakpastian tidak cukup mudah diperoleh.

Terlebih lagi pada sistem non linier, hasil-hasil penguatan kecil hanya memberikan syarat cukup. Dengan demikian pengendali yang dihasilkan bersifat konservatif [Yuliar, 1996], sehingga membatasi penggunaan metode perancangan dengan penguatan berhingga non linier untuk stabilisasi kokoh. Pada kasus pembentukan kinerja, pendekatan pertama tidak mudah untuk diperluas pada sistem non linier karena kesulitan memahami tentang kuantitas yang mengkarakterisasi perilaku dominan dari sistem lingkaran tertutupnya. Pendekatan kedua dapat digunakan secara langsung pada sistem non linier. Beberapa literatur yang digunakan oleh Yuliar (1996) menggunakan kriteria kinerja penguatan berhingga (*finite gain performance criteria*) untuk memecahkan beberapa tipe dari masalah peredaman gangguan.

Makalah ini memaparkan analisis sistem kendali kokoh pada satu kelas sistem non linier yang bersifat *affine* dengan skema pertidaksamaan matriks non linier. Makalah ini memberikan kontribusi pada dua hal, yaitu :

- a. perumusan kondisi pemecahan (*solvability condition*) dalam masalah sistem kendali kokoh non linier dengan metode H_{∞}
- b. aspek komputasional dalam menyelesaikan kondisi pemecahan tersebut

Bagian lain makalah membahas hal-hal berikut. Mula-mula dibahas tentang konsep kendali H_{∞} dalam sistem kendali secara umum di bagian 2 kemudian dilanjutkan dengan formulasi kendali tersebut untuk sistem non linier di bagian 3. Bagian 3 ini juga memuat hasil utama makalah berupa teorema tentang karakterisasi konveks supaya masalah kendali H_{∞} non linier memiliki solusi (yang disebut dengan kondisi pemecahan). Pertimbangan aspek komputasional dalam memecahkan karakterisasi konveks diuraikan dalam bagian selanjutnya. Makalah diakhiri dengan catatan penutup yang berisi kesimpulan dan tindak lanjut penelitian.

KONSEP KENDALI H_∞ DALAM SISTEM KENDALI

Pendahuluan

Pada awal perkembangannya, masalah kendali H_∞ diformulasikan sebagai masalah perancangan sistem linier dalam domain frekuensi. Dari konsep ruang dalam geometri, H_∞ (ruang Hardy) adalah sekumpulan fungsi kompleks yang bersifat terbatas dan analitik di sebelah kanan sumbu imajiner pada bidang kompleks. Masalah kendali H_∞ dapat dirumuskan sebagai peredaman optimal dari norm L_2 untuk masukan eksogen (masukan yang spektrum dayanya tidak diketahui) terhadap keluaran yang dikendalikan dengan batasan stabilitas internal [van der Schaft, 1992].

Penyederhanaan karakterisasi ruang keadaan dari teori kendali H_∞ serta hubungannya dengan metode tradisional dalam kendali optimal seperti yang dipaparkan oleh Doyle, et. al., (1989) memicu teoretisi kendali untuk memperumum hasil kendali H_∞ linier dalam ruang keadaan untuk sistem non linier [van der Schaft, 1992; Lu, et. al., 1995; Yuliar, 1996]. Penggunaan istilah "kendali H_∞ non linier" hanya untuk memberikan arah penelitian (riset), karena lebih tepat disebut kendali penguatan- L_2 (L_2 -gain control), seperti dinyatakan oleh van der Schaft (1992-3). Pada dasarnya, asumsi yang dipakai untuk memperumum konsep linier ke non linier adalah bahwa umpan balik keluaran dinamis dari pengendali H_∞ mempunyai struktur pemisahan (*separation structure*) [Ball, et. al., 1993]. Dengan asumsi ini, syarat perlu dan cukup pada masalah kendali H_∞ agar dapat dipecahkan secara global atau lokal dikarakterisasi oleh pertidaksamaan atau persamaan Hamilton-Jacobi [Lu, et. al., 1995]. Selanjutnya, sebuah pengendali lokal dirancang berdasarkan solusi lokal yang dihasilkan pada pertidaksamaan atau persamaan Hamilton-Jacobi. Sedangkan syarat perlu supaya ada solusi global adalah dengan membangun dua bentuk pertidaksamaan Hamilton-Jacobi [van der Schaft, 1993; Lu, et. al., 1995].

Pencarian solusi pada masalah kendali H_∞ non linier biasanya memakai prinsip geometri [van der Schaft, 1992-3; Desoer, et. al., 1975; Isidori, et. al., 1992; Ball, et. al., 1993]. Pendekatan yang dilakukan oleh van der Schaft (1992,1993) untuk memecahkan persamaan Hamilton-Jacobi adalah dengan mencari hubungan persamaan tersebut dengan *invariant manifold* dari medan vektor Hamilton hiperbolik, sedangkan Isidori, et. al. (1992) memperluas hasilnya dengan menyimpulkan bahwa pengendali untuk kendali H_∞ non linier mungkin ditemukan apabila medan vektor Hamiltonnya tidak hiperbolik. Sementara itu, beberapa literatur membahas kendali H_∞ non linier dari perspektif konsep disipatif [Hill, et. al., 1976; van der Schaft, 1993; Hewer, et. al., 1989; Isidori, et. al., 1992; Ball, et. al., 1993], karena konsep penguatan berhingga yang mendasari konsep kendali H_∞ merupakan kasus khusus dari disipativitas sistem kendali [Yuliar, 1996; Gupta, 1996; Bambang, 1999].

Dengan berkembangnya metode analisis dan sintesis sistem kendali dengan skema pertidaksamaan matriks linier, makalah ini memaparkan suatu pendekatan alternatif dalam pemecahan masalah kendali H_∞ non linier dan mengkarakterisasi solusinya dengan kondisi konveks yang dinyatakan melalui pertidaksamaan matriks. Cara ini dimotivasi oleh hasil yang diperoleh pada kendali H_∞ bahwa masalah kendali H_∞ linier dapat dikarakterisasi sebagai masalah konveks (*convex characterization*) yang dinyatakan dengan pertidaksamaan matriks linier (PML) [Gahinet, et. al., 1994; Boyd, et. al., 1994; Apkarian, et. al., 1996]. Dengan demikian, konveksitas dari masalah kendali H_∞ non linier akan diuji dan kondisi solusinya dikarakterisasi dengan pertidaksamaan matriks yang disebut pertidaksamaan matriks non linier (PMNL).

Analisis Stabilitas Sistem Non Linier

Teori stabilitas merupakan subjek teori yang cukup tua, seiring dengan perkembangan teori persamaan diferensial

dalam kalkulus. Objek teori stabilitas adalah menarik kesimpulan dari perilaku sistem tanpa menentukan solusi trajektorinya secara eksplisit, terlebih lagi pada sistem non linier (persamaan diferensial non linier) yang sering kali cukup sulit untuk didapatkan solusi eksplisitnya. Untuk menguji stabilitas sistem non linier biasanya dilakukan dengan mengkonstruksi sebuah fungsi mirip-energi (*energy-like function*) skalar definit positif kemudian menguji variasi waktu fungsi tersebut dari nilai derivasinya. Fungsi tersebut disebut kandidat fungsi Lyapunov. Apabila turunan dari kandidat fungsi Lyapunov terhadap waktu sepanjang dinamika trajektorinya bernilai semi definit negatif maka fungsi tersebut disebut fungsi Lyapunov. Keberadaan fungsi Lyapunov menjamin stabilitas sistem. Banyak sekali definisi tentang stabilitas yang dipakai untuk mengkarakterisasi stabilitas sistem dinamik. Pada bagian ini akan dipaparkan definisi dan teorema yang penting tentang stabilitas yang digunakan dalam pembahasan selanjutnya. Definisi dan teorema lainnya bisa dilihat misalnya pada Vidyasagar (1994).

Definisi 2.1 Stabil (dalam pengertian Lyapunov) Misalkan dinamika sistem dinyatakan dengan persamaan diferensial

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t)) \quad \forall t \geq 0 \quad (2.1)$$

dengan $x(t) \in \mathbb{R}^n$ dan fungsi f merupakan fungsi kontinu yang memetakan ruang $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n$ ke ruang $\mathbb{R}^n$. Vektor $x_0 \in \mathbb{R}^n$ disebut ekuilibrium sistem (2.1) jika

$$f(t, x_0) = 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (2.2)$$

Ekuilibrium x_0 bersifat stabil jika untuk $\varepsilon > 0$ dan $t_0 \in \mathbb{R}^+$ terdapat $\delta = \delta(\varepsilon, t_0)$ sedemikian sehingga

$$\text{jika } \|x_0\| < \delta(\varepsilon, t_0) \text{ maka}$$

$$\|x(t)\| < \varepsilon, \quad \forall t \geq t_0 \quad (2.3)$$

Definisi 2.2 Stabil Asimtotik

Ekuilibrium sistem (2.1) bersifat stabil asimtotik apabila stabil dan

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0 \quad (2.4)$$

Dalam masalah penjejak (*tracking problem*) biasanya stabilitas asimtotik ini menjadi perhatian utama yaitu dengan menjadikan *error* sebagai keadaannya.

Definisi 2.3 Stabil eksponensial

Ekuilibrium sistem (2.1) bersifat stabil eksponensial apabila terdapat bilangan positif a dan b sedemikian sehingga

$$\|x(t)\| \leq a \|x_0\| \exp(-bt), \quad \forall t \geq 0 \quad (2.5)$$

Dalam sistem linier, apabila matriks fungsi transfer dari sebuah sistem lingkaran tertutup linier bersifat stabil secara eksponensial maka sistem tersebut dikatakan stabil secara internal (*internally stable*) [Maciejowski, 1989]. Pengertian stabilitas internal menjadi fokus penting di dalam merumuskan kendali H_∞ .

Selanjutnya, beberapa teorema berikut dipakai untuk menguji stabilitas sistem.

Teorema 2.1 Stabil (dalam pengertian Lyapunov)

Ekuilibrium sistem (2.1) bersifat stabil, jika terdapat fungsi definit positif $V: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ dan dapat diturunkan secara kontinu sedemikian sehingga

$$\dot{V}(t, x) \leq 0, \quad \forall t \geq t_0 \quad (2.6)$$

dengan V dievaluasi sepanjang trajektori persamaan (2.1).

Teorema 2.2 Stabil asimtotik

Ekuilibrium sistem (2.1) bersifat stabil asimtotik, jika terdapat fungsi definit positif $V: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, dapat diturunkan secara kontinu, dan termasuk fungsi *decreasent* sedemikian sehingga $-\dot{V}(t, x)$ merupakan fungsi definit positif.

Teorema 2.3 Stabil eksponensial

Ekuilibrium sistem (2.1) bersifat stabil eksponensial, jika terdapat bilangan positif a, b, c , dan $p \geq 1$ serta adanya fungsi definit positif $V: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sedemikian sehingga

$$a \|x\|^p \leq V(t, x) \leq b \|x\|^p, \quad \forall t \geq 0 \quad (2.7)$$

$$\dot{V}(t, x) \leq -c \|x\|^p$$

Pada analisis stabilitas dengan menggunakan teorema-teorema di atas, jika ada fungsi V yang memenuhi sifat-sifat yang disebutkan pada teorema maka fungsi V disebut fungsi Lyapunov. Teorema tentang stabilitas merupakan syarat untuk stabilitas sistem. Untuk menerapkan teorema tersebut pada uji stabilitas sistem, tentukan dulu fungsi skalar definit positif $V(t, x)$. Pada tahap ini, $V(t, x)$ disebut kandidat fungsi Lyapunov. Selanjutnya diuji apakah persyaratan untuk $\dot{V}(t, x)$ dipenuhi atau tidak. Jika persyaratan untuk $\dot{V}(t, x)$ dipenuhi maka $V(t, x)$ disebut fungsi Lyapunov dan dengan demikian sistem bersifat stabil. Di lain pihak, jika persyaratan untuk $\dot{V}(t, x)$ tidak dipenuhi maka tidak ada kesimpulan yang dapat diambil tentang stabilitas sistem.

FORMULASI MASALAH KENDALI H_∞ PADA SISTEM NON LINIER

Formulasi umum

Tinjau sistem ruang keadaan non linier umum sebagai berikut

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, w) \\ y &= g(x, u, w) \\ z &= h(x, u, w)\end{aligned}\quad (3.1)$$

dengan dua variabel masukan u dan w , dua variabel keluaran y dan z , serta variabel keadaan sistem x . Variabel u menandai vektor masukan kendali, w adalah masukan eksternal (bisa berupa gangguan yang harus dihilangkan atau sinyal referensi yang harus diikuti), y adalah keluaran yang terukur, dan z adalah keluaran yang akan dikendalikan (berupa kesalahan penjejak (*tracking error*) atau variabel biaya (*cost variable*)). Pada perumusan masalah kendali ini diasumsikan terdapat ekuilibrium x_0, u_0, w_0 , yaitu $f(x_0, u_0, w_0) = 0$ dan setelah proses transformasi atau pergeseran koordinat diasumsikan $x_0 = 0, u_0 = 0$, dan $w_0 = 0$.

Misalkan γ adalah bilangan positif yang tetap. Masalah kendali H_∞ pada sistem non linier (untuk tingkat peredaman gangguan γ) adalah menemukan sebuah pengendali (*controller*)

$$\begin{aligned}\xi &= k(\xi, \gamma) \\ u &= m(\xi, \gamma)\end{aligned}\quad (3.2)$$

dengan vektor keadaan pengendali ξ dan memenuhi hubungan $k(0,0) = 0$ serta $m(0,0) = 0$, sedemikian sehingga sistem lingkaran-tertutup (*closed-loop*) dari (3.1)-(3.2) mempunyai penguatan- L_2 kurang dari atau sama dengan γ , yaitu

$$\int_0^T \|z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt \quad (3.3)$$

untuk seluruh fungsi $w(t)$ yang termasuk ke dalam kelas fungsi kudrat yang dapat diintegrasikan (*square-integrable function*) dan $T > 0$, serta $z(t)$ adalah respon sistem lingkaran tertutup (3.1)-(3.2) untuk masukan $w(t)$ dan kondisi mula $x(0) = 0$ dan $\xi(0) = 0$.

Lebih lanjut untuk sistem non linier, pertidaksamaan integral (3.3) dapat diperketat dengan mensyaratkan untuk seluruh kondisi mula $x(0)$ dan $z(0)$ pada sistem lingkaran tertutup (3.1)-(3.2) terdapat bilangan taknegatif K , sedemikian sehingga

$$\int_0^T \|z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt + K \quad (3.4)$$

untuk seluruh fungsi $w(t)$ yang termasuk ke dalam kelas fungsi kudrat yang dapat diintegrasikan (*square-integrable function*) dan $T > 0$, serta $z(t)$ adalah respon sistem lingkaran tertutup (3.1)-(3.2) untuk masukan $w(t)$ dan kondisi mula $x(0) = 0$ dan $\xi(0) = 0$. Formulasi (3.4) memperketat pengertian penguatan- L_2 berhingga dan menjembatani ke arah teori sistem disipatif [van der Schaft, 1994].

Akhirnya, masalah kendali optimal H_∞ pada sistem non linier adalah menemukan bilangan positif terkecil $\gamma_{\min}$ sedemikian sehingga masalah kendali suboptimal dapat dipecahkan untuk seluruh $\gamma > \gamma_{\min}$ [van der Schaft, 1994]. Dalam perspektif sistem non linier, masalah kendali ini tidak mudah dipecahkan untuk seluruh kelas sistem non linier. Oleh karena itu, dalam makalah ini akan dibahas masalah kendali H_∞ untuk satu kelas sistem non linier yang bersifat *affine*.

Analisis Penguatan- L_2 dan Kinerja H_∞

Sebagaimana disebutkan pada bagian 3.1, pengertian penguatan- L_2 memegang peranan penting dalam masalah kendali H_∞ . Pada bagian ini akan dibahas analisis penguatan- L_2 dalam sistem kendali. Materi berikut ini diambil dari Lu (1995) tetapi karakterisasinya diformulasi ulang dengan pertidaksamaan matriks non linier (PMNL).

Tinjau representasi sistem non linier *affine* berikut

$$G_1 : \begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)w \\ z = h(x) + k(x)w \end{cases} \quad (3.5)$$

dengan $x \in \mathbb{R}^n$ adalah vektor keadaan, $w \in \mathbb{R}^p$ dan $z \in \mathbb{R}^q$ adalah vektor masukan dan keluaran. Fungsi f, g, h , dan k adalah fungsi kontinu yang bernilai vektor atau matriks, serta $f(0) = 0, h(0) = 0$. Sistem berevolusi pada subhimpunan terbuka konveks $X \subset \mathbb{R}^n$ yang mengandung titik asal. Dengan demikian, $0 \in \mathbb{R}^n$ adalah titik ekuilibrium sistem saat $w = 0$.

Bentuk khusus dari (3.5) adalah

$$G_2 : \begin{cases} \dot{x} = A(x)x + B(x)w \\ z = C(x)x + D(x)w \end{cases} \quad (3.6)$$

dengan $x \in \mathbb{R}^n$ adalah vektor keadaan, $w \in \mathbb{R}^p$, dan $z \in \mathbb{R}^q$ adalah vektor masukan dan keluaran. A, B, C, D adalah fungsi yang bernilai matriks dengan dimensi yang bersesuaian.

Definisi 3.1 Penguatan- L_2

Sistem (3.5) atau (3.6) dengan keadaan awal $x(0) = 0$ mempunyai penguatan- L_2 (L_2 -gain) kurang dari atau sama dengan γ untuk $\gamma > 0$ jika

$$\int_0^T \|z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt \quad (3.7)$$

untuk semua $T \geq 0$ dan $w(t) \in L_2[0, T]$ sepanjang keadaan $x(t) \in X$ untuk $t \in [0, T]$.

Berdasarkan Lu, et. al. (1995), sistem mempunyai penguatan- $L_2 \leq \gamma$, jika dan hanya jika ada sebuah fungsi $V: X \rightarrow \mathbb{R}^+$ dengan $V(0) = 0$ (V disebut fungsi penyimpanan (*storage function*)) sedemikian sehingga

$$V(x(T)) - V(x(0)) - \int_0^T (\gamma^2 \|w(t)\|^2 - \|z(t)\|^2) dt \leq 0$$

dengan $w(t) \in L_2[0, T]$ dan $x(t) \in X$ untuk $t \in [0, T]$.

Proposisi berikut memberikan karakterisasi penguatan- L_2 dalam bentuk pertidaksamaan matriks non linier (PMNL) untuk sistem non linier yang bersifat stabil asimtotik.

Proposisi 3.1 Karakterisasi PMNL untuk stabilitas asimtotik sistem

Tinjau sistem G_1 dengan $R(x) = \gamma[I - \gamma^2 k^T(x)k(x)] > 0$. Sistem G_1 bersifat stabil asimtotik dan mempunyai penguatan- $L_2 \leq \gamma$, jika terdapat fungsi definit positif $V: X \rightarrow \mathbb{R}^+$ sedemikian sehingga

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x}(x)f(x) + \gamma^{-1}h^T(x)h(x) & \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial x}(x)g(x) + \gamma^{-1}h^T(x)k(x) \\ \frac{1}{2} g^T(x) \frac{\partial V}{\partial x}(x) + \gamma^{-1}k^T(x)h(x) & \gamma^{-1}k^T(x)k(x) - \gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.8)$$

Bukti proposisi di atas telah dilakukan oleh Najmurokhman (2002a).

Dengan argumen komplemen Schur, karakterisasi (3.8) dapat dituliskan dalam bentuk

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) & \frac{1}{2} \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) & h(x)^T \\ \frac{1}{2} g(x)^T \frac{\partial V(x)}{\partial x} & -\gamma I & k(x)^T \\ h(x) & k(x) & -\gamma I \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Apabila ditinjau sistem non linier khusus G_2 , dan ambil bentuk $\square$ EMBED Equation.2 $\square \square \square$ dengan $P(x) = P^T(x): X \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ maka pertidaksamaan matriks (3.9) menjadi (variabel x tidak dituliskan untuk ringkasnya penulisan)

$\square$ EMBED Equation.2 $\square \square \square$

Kondisi cukup agar PMNL di atas terpenuhi adalah

$\square$ EMBED Equation.2 $\square \square \square$ (3.10)

untuk semua $x \in X$.

Teorema berikut mengkarakterisasi penguatan- L_2 untuk sistem non linier *affine*.

Teorema 3.1

Tinjau sistem G_2 yang diberikan pada (3.2). Untuk fungsi yang bernilai matriks $P(x) = P^T(x): X \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, dua pernyataan berikut ekuivalen :

(i) $P(x)$ memenuhi (3.10)

(ii) $P(x)$ memenuhi

$$\begin{bmatrix} A^T(x)P(x) + P(x)A(x) & P(x)B(x) & C^T(x) \\ B^T(x)P(x) & -\gamma I & D^T(x) \\ C(x) & D(x) & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.11)$$

untuk semua $x \in X$.

Jika ada fungsi $V: X \rightarrow \mathbb{R}^+$ sedemikian sehingga

$\frac{\partial V}{\partial x}(x) = 2x^T P(x)$ maka sistem mempunyai

penguatan- $L_2 \leq \gamma$ dan bersifat stabil asimtotik.

Bukti untuk teorema di atas telah dilakukan oleh Najmurokhman (2002a).

Karakterisasi PMNL untuk sistem yang mempunyai penguatan- $L_2 \leq 1$ seperti diperlihatkan oleh Lu, et. al. (1995) merupakan bentuk khusus dari (3.11). Dengan mengamati teorema 3.1 dapat dinyatakan bahwa keberadaan fungsi $P(x)$ yang memenuhi PMNL (3.11) tidak cukup menjamin sistem mempunyai penguatan- $L_2 \leq \gamma$. Pada teorema tersebut, persyaratan tambahannya adalah terdapatnya fungsi definit positif $V: X \rightarrow \mathbb{R}^+$ sedemikian sehingga $\frac{\partial V}{\partial x}(x) = 2x^T P(x)$. Dengan demikian, penguatan- $L_2 \leq \gamma$ untuk sebagian nilai variabel tidak

menyebabkan sistem aslinya (untuk semua $x \in X$) mempunyai penguatan- $L_2 \leq \gamma$.

Definisi berikut diberikan oleh Lu, et. al. (1995) untuk memberi identitas sistem yang memiliki penguatan- $L_2 \leq \gamma$.

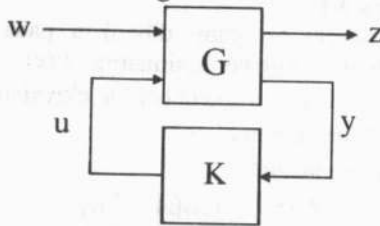
Definisi 3.2 Kinerja H_∞

Sistem G_2 mempunyai **kinerja H_∞ kuat** (*strong H_∞ -performance*) jika ada fungsi definit positif $P(x) = P^T(x)$ yang memenuhi pertidaksamaan (3.10) atau (3.11) untuk seluruh $x(t) \in X$ sedemikian sehingga $\frac{\partial V}{\partial x}(x) = 2x^T P(x)$ untuk suatu fungsi definit positif $V: X \rightarrow R^+$.

Dengan demikian, jika sistem mempunyai **kinerja H_∞ kuat**, sesuai dengan teorema 3.4, maka sistem mempunyai penguatan- $L_2 \leq \gamma$.

Karakterisasi PMNL pada sintesis kendali H_∞ non linier

Konfigurasi umpan balik pada sintesis kendali H_∞ digambarkan sebagai berikut



Gambar 3.1 Sistem kendali lingkaran tertutup

dengan G adalah kendalian (*plant*) non linier dengan dua masukan, yaitu masukan eksternal (gangguan) w dan masukan kendali (*control input*) u , serta dua keluaran, yaitu keluaran terukur (hasil pengukuran) y dan keluaran yang diatur z . K adalah pengendali (*controller*) yang dirancang. Persamaan ruang keadaan dalam bentuk *affine* diberikan oleh

$$G: \begin{cases} \dot{x} = A(x)x + B_1(x)w + B_2(x)u \\ z = C_1(x)x + D_{11}(x)w + D_{12}(x)u \\ y = C_2(x)x + D_{21}(x)w + D_{22}(x)u \end{cases} \quad (3.12)$$

dengan A, B_i, C_i , dan D_{ij} adalah fungsi kontinyu, x, w, u, z , dan y mempunyai dimensi masing-masing n, p_1, p_2, q_1 , dan q_2 . Dinamika pengendali K direpresentasikan oleh

$$K: \begin{cases} \dot{\xi} = A_K(\xi)\xi + B_K(\xi)y \\ u = C_K(\xi)\xi + D_K(\xi)y \end{cases} \quad (3.13)$$

dengan A_K, B_K, C_K , dan D_K adalah fungsi kontinyu. Sistem umpan balik (3.12)-(3.13) diasumsikan berlaku pada ruang $X \times X_0$ dengan X dan X_0 merupakan himpunan konveks terbuka dan mengandung titik asal. Keadaan awal dari kendalian dan pengendali adalah $x(0) = 0$ dan $\xi(0) = 0$.

Masalah kendali H_∞ adalah menemukan pengendali umpan balik K sedemikian sehingga sistem lingkaran tertutup mempunyai kinerja H_∞ dan bersifat stabil asimtotik. Pengendali K yang menghasilkan sifat sistem lingkaran tertutup seperti itu disebut pengendali H_∞ kuat (*strong H_∞ -controller*) [Lu, et. al., 1995].

Seperti dinyatakan oleh Lu, et. al. (1995), sintesis kendali H_∞ non linier mengasumsikan hal-hal berikut :

- A1. Rank $\begin{bmatrix} B_2^T(x) & D_{12}^T(x) \end{bmatrix}^T = p_2$ untuk seluruh $x \in X$
- A2. Rank $\begin{bmatrix} C_2(x) & D_{21}(x) \end{bmatrix} = q_2$ untuk seluruh $x \in X$
- A3. $D_{11}(x)D_{11}^T(x) < \gamma^2 I$ untuk seluruh $x \in X$
- A4. $I - D_K(\xi)D_{22}(x)$ mempunyai invers untuk seluruh $(x, \xi) \in X \times X_0$.

Asumsi A1 dan A2 digunakan sebagai alasan teknis, asumsi A3 diperlukan agar masalah kendali H_∞ mempunyai solusi, sedangkan asumsi A4 menjamin keberadaan struktur umpan balik.

Tinjau sistem (3.12)-(3.13), definisikan $B(x) = \begin{bmatrix} B_2^T(x) & D_{12}^T(x) \end{bmatrix}$ dan $C(x) = \begin{bmatrix} C_2(x) & D_{21}(x) \end{bmatrix}$ serta misalkan $N_{B(x)}$ adalah distribusi pada X yang menghilangkan vektor baris $B(x)$, atau $N_{B(x)}$ adalah matriks yang kolom-kolomnya membentuk basis dari ruang *null* $B(x)$. Teorema 3.2 berikut merupakan hasil utama makalah yang memberikan karakterisasi konveks (dalam bentuk PMNL) bagi syarat perlu agar masalah kendali H_∞ non linier umpan balik keluaran mempunyai solusi.

Teorema 3.2 Karakterisasi konveks

Diberikan sistem (3.12)-(3.13). Masalah kendali H_∞ umpan balik keluaran mempunyai solusi apabila ada fungsi kontinyu bernilai matriks definit positif Y dan Z dengan $Y, Z: X \rightarrow R^{n \times n}$ sedemikian sehingga PMNL berikut terpenuhi

$$\begin{pmatrix} N_{B(x)} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} A(x)Y(x)+Y(x)A^T(x) & Y(x)C_1^T(x) & B_1(x) \\ C_1(x)Y(x) & -\gamma I & D_{11}(x) \\ B_1^T(x) & D_{11}^T(x) & -\gamma I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_{B(x)} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (3.14)$$

$$\begin{pmatrix} N_{C(x)} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} A^T(x)Z(x)+Z(x)A(x) & Z(x)B_1(x) & C_1^T(x) \\ B_1^T(x)Z(x) & -\gamma I & D_{11}^T(x) \\ C_1(x) & D_{11}(x) & -\gamma I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_{C(x)} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} Y(x) & I \\ I & Z(x) \end{pmatrix} \geq 0 \quad (3.16)$$

Bukti teorema di atas telah dilakukan oleh Najmurokhan (2002c).

Teorema 3.2 merupakan kondisi pemecahan (*solvability condition*) masalah kendali H_∞ non linier dengan umpan balik keluaran untuk sistem non linier *affine*. Teorema tersebut menyatakan bahwa masalah kendali dengan umpan balik keluaran pada sistem non linier *affine* mempunyai solusi apabila terdapat dua fungsi kontinu bernilai matriks definit positif $Y(x)$ dan $Z(x)$ yang memenuhi PMNL (3.14), (3.15), dan (3.16). Pasangan fungsi yang bernilai matriks $Y(x)$ dan $Z(x)$ yang memenuhi PMNL (3.14), (3.15), dan (3.16) membentuk sebuah himpunan konveks, sehingga teorema 3.2 menyatakan karakterisasi konveks untuk syarat perlu agar masalah kendali H_∞ non linier dengan umpan balik keluaran dapat dipecahkan.

Masalah komputasional dalam kendali H_∞ non linier

Pada bagian ini akan dibahas metode komputasional dalam analisis kinerja H_∞ . Sebagaimana dijelaskan pada bagian 3.2, analisis kinerja H_∞ untuk sistem non linier Untuk lebih konkrit, perhatikan PMNL berikut

$$\begin{bmatrix} A^T(x)P(x)+P(x)A(x) & P(x)B(x) & C^T(x) \\ B^T(x)P(x) & -I & D^T(x) \\ C(x) & D(x) & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.17)$$

dengan asumsi fungsi-fungsi bernilai matriks $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, dan $D(x)$ bersifat kontinu pada himpunan X . Matriks-matriks tersebut diasumsikan membentuk himpunan konveks

$$\Omega(x) \in \text{Co}\{A_i, B_i, C_i, D_i\}_{i \in \{1,2,\dots,L\}} \quad \forall x \in X$$

untuk sembarang A_i, B_i, C_i, D_i dengan $I - D_i^T D_i < 0$ untuk $i \in \{1,2, \dots, L\}$ dan L bilangan bulat positif. Co adalah singkatan dari *convex hull*.

Jika terdapat sebuah matriks definit positif konstan $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sedemikian sehingga

$$\begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i & P B_i & C_i^T \\ B_i^T P & -I & D_i^T \\ C_i & D_i & -I \end{bmatrix} < 0 \quad \forall i \in \{1,2,\dots,L\}$$

yang merupakan himpunan pertidaksamaan matriks linier yang dapat dipecahkan dengan metode optimisasi konveks [Boyd, et. al., 1994] maka solusi P juga memenuhi

$$\begin{bmatrix} A^T(x)P(x)+P(x)A(x) & P(x)B(x) & C^T(x) \\ B^T(x)P(x) & -I & D^T(x) \\ C(x) & D(x) & -I \end{bmatrix} < 0$$

untuk seluruh $x \in X$.

Dengan demikian, fungsi Lyapunov yang bersesuaian dengan stabilitas sistem G_2 (3.6) berbentuk $V(x) = x^T P x$.

Metode pencarian solusi PMNL di atas memberikan pendekatan yang baik untuk mendapat solusi lokal. Tetapi, pendekatan ini memberikan hasil yang bersifat konservatif jika himpunan keadaan X cukup besar.

CATATAN PENUTUP (*Concluding Remarks*)

Telah diuraikan analisis sistem kendali kokoh untuk sistem non linier dengan pendekatan pertidaksamaan matriks nonlinier. Keberadaan solusi dari kondisi pemecahan yang diuraikan dalam makalah menjamin adanya pengendali yang memberikan sifat kekokohan sistem yang dikendalikan. Masalah komputasional untuk memecahkan pertidaksamaan matriks juga diberikan. Karena sifat non linieritas yang mengarah ketakberhinggaan perhitungan maka

solusi pertidaksamaan matriksnya bersifat tidak langsung (*ad hoc solution*).

Tindak lanjut dari penelitian berikutnya diarahkan untuk membuat simulasi numerik dari hasil-hasil yang telah diuraikan dalam makalah serta pembentukan kendali (*controller*) yang mengokohkan sistem untuk hampir seluruh parameter atau keadaan (*state variable*) sistem. Aplikasi dari penelitian ini untuk sistem non linier nyata sangat menarik, khususnya sistem non linier yang bisa didekati dengan sifat *affine*, seperti sistem elektromekanik (robotika) dan sistem kendali terbang (*flight control*).

Ucapan terima kasih (*Acknowledgements*)

Makalah ini merupakan hasil awal *on going research* penulis yang didukung oleh LPPM UNJANI untuk Tahun Akademik 2002/2003.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Apkarian, P. et. al., "LMI Techniques in Control Engineering from Theory to Practice : Workshop Note CDC 1996", Kobe, Japan, 1996.
- [2] Ball, J.A., Helton, J.W., and Walker, M.L., 1993, "H_∞ Control for Nonlinear Systems with Output Feedback", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-4 vol. 38, 546-559.
- [3] Bambang, R.T., Najmurokhman, A., and Yuliar, S., 2000, "Dissipative Control for A Class of Nonlinear Systems Using State-Dependent LMI", *Proc. of 19th IASTED Conf. Modelling, Identification and Control, Austria*.
- [4] Bambang, R.T., 1999, "Dissipative Control of Linear Parametrically Varying Systems Using Output Feedback : An LMI Approach", *Proc. of 18th IASTED Conf. Modelling, Identification and Control, Austria*.
- [5] Boyd, S. et. al., 1994, "Linear Matrix Inequality in System and Control Theory", SIAM Series vol. 15, Philadelphia, USA.
- [6] Dailey, R., 1995, "Robust Control", makalah dalam *Workshop Tutorial : Modern Control Systems* (editor : Karl John Astrom, et. al.)
- [7] Desoer, C.A. and Vidyasagar, M., 1975, "Feedback Systems : Input-Output Properties", Academic, New York, USA.
- [8] Doyle, J.C. et. al., 1989, "State-Space Solutions to Standard H₂ and H_∞ Control Problems", *IEEE Trans. AC* vol. AC-34, 831 – 847.
- [9] El Ghaoui, L., et. al., 2000, "Advances in Linear Matrix Inequality Methods in Control", SIAM Series, Philadelphia, USA.
- [10] Gahinet, P. et. al., 1995, "LMI Control Toolbox", Mathworks Inc., Natick, MA, USA.
- [11] Gahinet, P. and Apkarian, P., 1994, "A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control", *Int. Journal of Robust and Non Linear Control* vol. 4, 421-448.
- [12] Green, M. and Limebeer, D.J.N., 1995, "Linear Robust Control", Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [13] Gupta, S., 1996, "Robust Stabilization of Uncertain Systems Based on Energy Dissipation Concepts", NASA Contractor Paper 4713.
- [14] Hill, D.J. and Moylan, P.J., 1976, "Stability of Nonlinear Dissipative Systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-5, 708-711.
- [15] Isidori, A. and Astolfi, A., 1992, "Disturbance Attenuation and H_∞ Control via Measurement Feedback in Nonlinear Systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-9 vol. 37, 1283-1293.
- [16] Kang, W., 1995, "Nonlinear H_∞ Control and its Application to Rigid Aircraft", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-7 vol. 40, 1281-1285.
- [17] Lu, W.M. and J.C. Doyle, 1995, "H_∞ Control of Non Linear Systems : A Convex Characterization", *IEEE Trans. AC* vol. AC-40, 1668 – 1675.
- [18] Maciejowski, J.M., 1989, "Multivariable Feedback Design", Addison-Wesley, Workingham, England.
- [19] Najmurokhman, A., 2000, "Sintesis Kendali Disipatif Untuk Sistem Non Linier Dengan Pendekatan Pertidaksamaan Matriks Non Linier", *Tesis Magister*.
- [20] Najmurokhman, A., 2001, "Sintesis Kendali H_∞ Untuk Sistem Linier", *Majalah Kopertis "Wawasan Tridharma" No. 5 Tahun XIV, Februari 2001*.
- [21] Najmurokhman, A., 2002a, "Karakterisasi Konveks Melalui Pertidaksamaan Matriks Non Linier Pada Analisis Stabilitas Kendali H_∞ Untuk Sistem Non Linier", *Jurnal Fakultas Teknik Unjani No. 1 Tahun I Mei 2002*.
- [22] Najmurokhman, A., 2002b, "Analisis dan Sintesis Kendali H_∞ Untuk Sistem Non Linier Dengan Pendekatan Pertidaksamaan Matriks Non Linier", *Proceeding of Seminar*

on Intelligent Technology and Its Application (SITIA2002), May 2002.

- [23] Najmurokhman, A., 2002c, "Laporan Kemajuan (*Progress Report*) Penelitian", LPPM UNJANI.
- [24] van der Schaft, A.J., 1992, "L₂-Gain Analysis of Non linear Systems and Non Linear State Feedback H_∞-Control", *IEEE Trans. AC* vol. AC-37, 770 – 784.
- [25] van der Schaft, A.J., 1993, "Nonlinear State Space H_∞-Control Theory", makalah dalam buku *Essay on Control : Perspectives in The Theory and its Applications* (eds. H.L. Trentelman and J.C. Willems), Birkhauser.
- [26] Yuliar, S. , 1996, "Dissipative Systems Theory : Analysis and Synthesis", *Disertasi*

Doktor, Australian National University, Canberra, Australia.

Biodata penulis

Penulis adalah staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro UNJANI. Memperoleh gelar sarjana teknik dan magister teknik dari Institut Teknologi Bandung masing-masing tahun 1996 dan 2000 dalam bidang kendali dan sistem. Minat penelitiannya menyangkut tentang analisis dan sintesis kendali sistem non linier dengan pendekatan pertidaksamaan matriks non linier. Selama setahun (2002-2003), penulis bergabung sebagai anggota peneliti di Nakajima Laboratory, Institute of Medical Sciences, Tokai University JAPAN untuk terlibat dalam penelitian tentang *telemedicine*.

Pengerasan Permukaan Baja Perkakas HSS M41 dengan Teknik Pelapisan Metal Spray

Oleh :

Tarigan, P., L. Juwita

Jurusan Metalurgi –Fakultas Teknik UNJANI

ABSTRAK

Paduan intermetalik Fe-Al memiliki sifat yang kuat & keras dan sifat ini sangat membantu meningkatkan ketahanan aus permukaan terutama komponen yang bergesekan seperti halnya pahat potong, pada proses pemesinan. Sehubungan dengan hal tersebut telah dilakukan percobaan awal dalam rangka melihat kemungkinan terbentuknya lapisan Fe-Al pada permukaan, mengukur tebal lapisan yang terjadi dan mengukur besarnya peningkatan kekerasan dan ketahanan aus yang terjadi terhadap lapisan tersebut. Disamping itu penelitian ini juga bertujuan untuk mempelajari dan memahami mekanisme yang terjadi dalam terbentuknya lapisan tersebut.

Untuk tujuan ini dilakukan penelitian dengan menggunakan spesimen baja perkakas FISS M-41 sebagai material dasar dan menggunakan material pelapis Al-Si. Material aluminium tersebut disemprotkan kepermukaan baja dengan menggunakan metoda "metal spray". Setelah itu spesimen dilaku. panas pada temperatur 850 °C, dengan waktu (Holding Time) yang bervariasi yaitu ; 4 jam, 6 jam dan 8 jam. Setelah itu dilakukan pemeriksaan metalografi, uji kekerasan dan uji keausan.

Hasil penelitian menunjukkan, kekerasan dan ketahanan aus yang paling tinggi diperoleh pada kondisi laku

panas: temperatur 850 °C dan waktu 8 jam. Tebal lapisan yang terbentuk sekitar 0,81mm, kekerasan 1120 HV, prosentase keausan 0,147 % dan meningkatkan umur sampel dari 1,84 hari menjadi 14,125 hari.

ABSTRACT

Intermetallic compound Fe-AL has good strength and hardness properties. Those properties were required to improve the wear resistance of component which its application always contact with another part like cutting tool in machining processes. This experiment was carried out to improve the wear resistance of metal, which in this case is high speed steel (HSS M41). This preliminary experiment was focused on to form the Intermetallic compound Fe-Al layer in the surface of the steel, This layer was obtained by metal spray technique in which Al-Si spray to the surface of base metal HSS M41 and then heat treated at 850 °C. The holding time of heat treatment for 4 hours, 6 hours and 8 hours respectively was used.

Experimental results showed holding time of heat treatment process was influenced to forming the intermetallic layer, thickness and hardness was specimen with heat treated at 850 OC and holding time 8 hours exhibit the maximum hardness of 1120 HV and also increase the life time from 1.84 days to 14.125 days. The thickness of intermetallic layer was 0.81 mm.

Kata kunci : Metal Spray, Heat Treatment, Diffusion and Wear Resistance

Pendahuluan

Waktu proses pemotongan berlangsung akan terjadi geseran antara pahat dan benda kerja pada proses pemesinan. Geseran tersebut akan mengakibatkan keausan pada bidang-bidang utama dari pahat. Sehubungan dengan kondisi kerja tersebut,

maka material pahat harus memiliki sifat; kuat, keras tetapi tidak rapuh, kekuatan dan kekerasannya harus tetap tinggi walaupun temperatur pemotongan tinggi (2).

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut ada beberapa metoda yang dapat ditempuh diantaranya adalah; memilih material pahat yang memenuhi sifat yang diinginkan, melakukan pengerasan permukaan dan membentuk lapisan

pada permukaan benda kerja. Masing - masing metoda tersebut memiliki keunggulan dan penelitian ini merupakan studi awal dalam hal pembentukan lapisan pada permukaan, sehingga permukaan memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang lebih tinggi. Pada penelitian ini digunakan metoda Metal Spray untuk menempelkan material pelapis (AL-Si) pada permukaan dan kemudian diproses laku panas, untuk memperoleh lapisan Intermetalik Fe-Al pada permukaan.

Percobaan

Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut,

Proses pelapisan dengan metoda metal spray dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu : Setelah proses laku panas dilakukan pemeriksaan metalografi dengan menggunakan mikroskop metalurgi, untuk mengamati struktur lapisan yang terbentuk antara material dasar dan material lapisan. Larutan etsa yang digunakan adalah Nital 2 %. Untuk mengamati perubahan sifat mekanik dari spesimen maka dilakukan uji kekerasan Mikro Vickers dengan beban 300 gram. Uji kekerasan dilakukan mulai dari material dasar setiap 0,03 mm sampai material pelapis.

Disamping uji kekerasan dilakukan uji keausan dan uji keausan.

dilakukan berdasarkan standar ASTM B-611-76 dengan ukuran spesimen ; panjang 20 mm, lebar 14 mm, diameter lubang 2,5 mm dan kedalaman lubang 6 mm.

Kondisi pengujian adalah; Kecepatan putaran piring 100 rpm dan beban sebesar 10 Kg, pH lumpur alumina 2,5.

Data dan Pembahasan

Pemeriksaan Metalografi

Hasil uji metalografi dilakukan terhadap spesimen yang belum diproses laku panas dan spesimen yang telah mengalami proses laku panas. Hasil pemeriksaan metalografi ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Dari gambar tersebut dapat dilihat terbentuknya lapisan baru diantara material dasar dengan material pelapis dan lapisan tersebut muncul setelah spesimen mengalami proses laku panas.



Gambar 2. Gambar hasil metalografi specimen hasil metal spray yang belum dilaku panas

Persiapan permukaan.

Persiapan permukaan dilakukan dengan tujuan menghilangkan oksida besi, lemak dan kotoran-kotoran lain yang ada pada permukaan. Untuk itu persiapan permukaan dilakukan dengan beberapa tahap yaitu pemolesan mekanik, pencucian dan *grit blasting*. Pemolesan mekanik dilakukan dengan menggunakan kertas amplas, pencucian dilakukan dengan air panas (60-80 °C) dan *grit blasting* dilakukan dengan menggunakan material abrasif jenis aluminium oksida dan titanium oksida dengan ukuran 30 mesh.

Pemanasan awal

Pemanasan awal dilakukan terhadap spesimen yang akan di metal spray pada temperatur 150° C. Tujuan pemanasan awal ini adalah ; untuk menghilangkan kelembapan pada permukaan material dasar yang akan dilapis dan menghilangkan tegangan sisa serta meminimalkan efek pemuaian material pada waktu proses pelapisan.

Proses pelapisan.

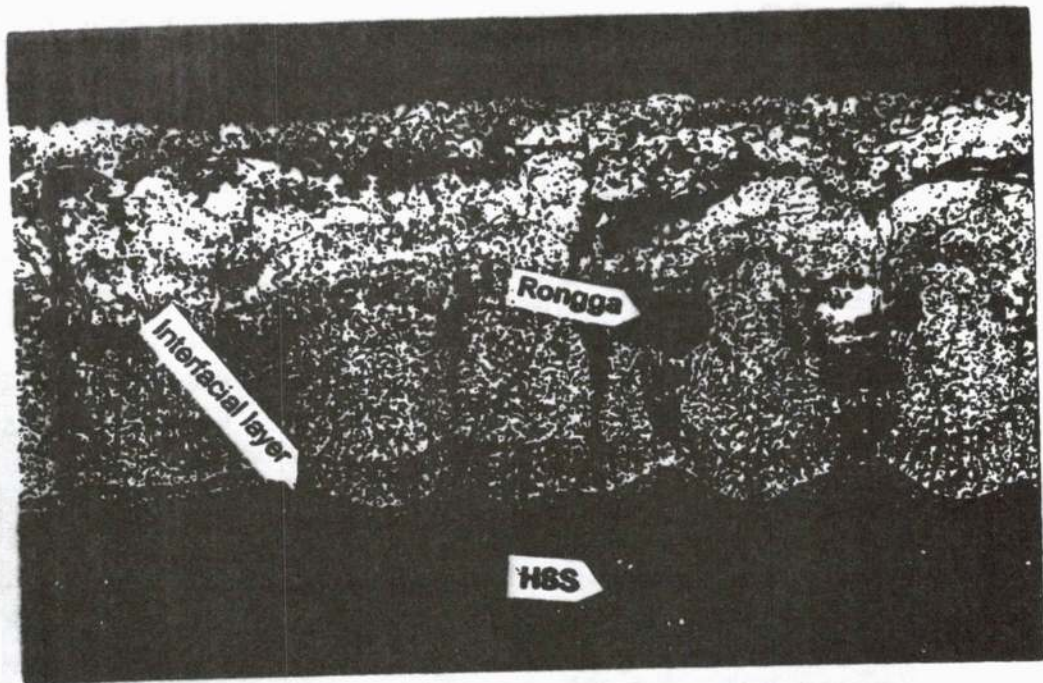
Proses pelapisan yang dilakukan dalam penelitian ini, disesuaikan dengan standar operasi proses plasma spraying untuk serbuk jenis 52 CN-S dari Metco. Standar proses tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Parameter Proses Plasma Spray

Gas	Ar/1-12
Pressure	Primary 100 Psi /Secondary 50 Psi
Flow	Primary 80 /Secondary 15
Power	500 ampere/ 70 Volt
Spraying Distance	150 mm
Spray Rate	4,5 Kg/hr

Perlakuan Panas.

Proses perlakuan panas dilakukan pada temperatur 850°C dengan waktu yang bervariasi yaitu ; 4 jam , 6 jam dan 8 jam. Tungku yang digunakan dalam proses laku panas ini adalah tungku vakum dengan tekanan 0,03 Torr. Tujuan penggunaan tungku vakum adalah untuk mengurangi kemungkinan terbentuknya oksida pada lapisan.



Gambar 3. Gambar hasil metalografi spesimen yang telah mengalami proses laku panas. Temperatur : 8500C dan waktu : 8 jam. Pembesaran 100 X, Larutan etsa menggunakan : Nital 2 %

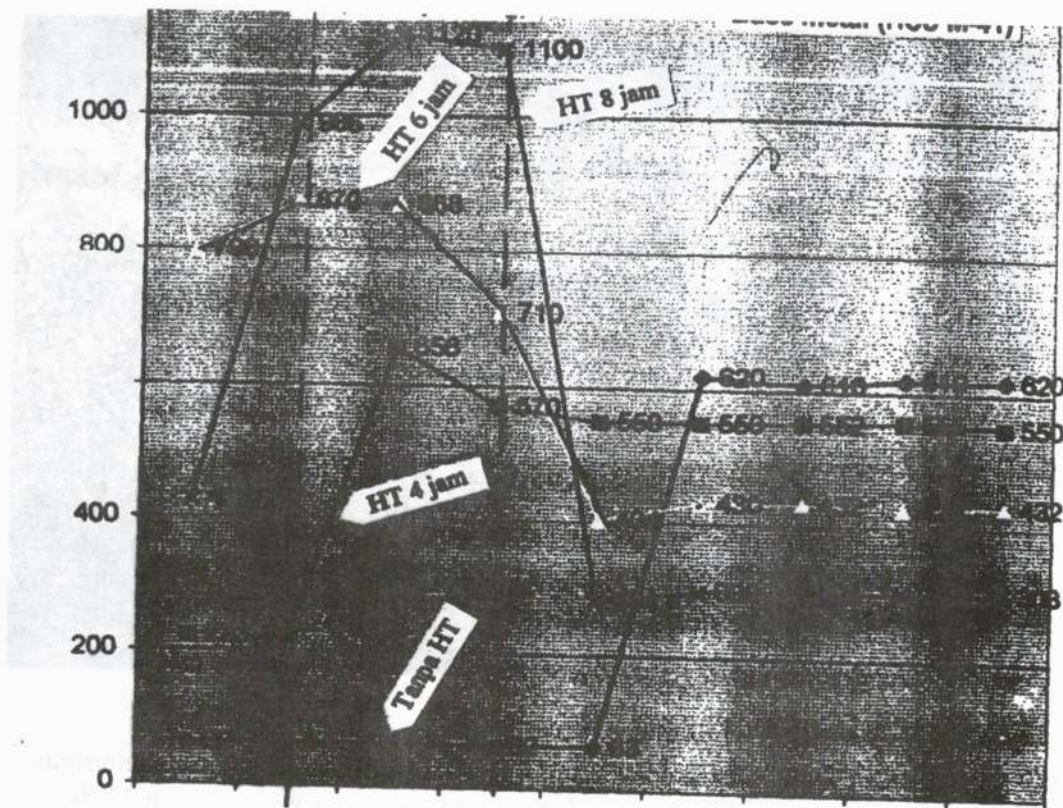
merupakan fungsi dari temperatur dan waktu, hal ini dapat dimengerti karena proses terbentuknya lapisan tersebut adalah proses difusi. Dari referensi 9, diperoleh data laju difusi Fe dalam Al lebih tinggi dibandingkan dengan Al dalam Fe, berarti Fe yang ada pada logam dasar akan berdifusi ke material pelapis untuk membentuk lapisan intermetalik Fe-Al. Dari pemeriksaan metalografi yang telah dilakukan tidak dapat mengidentifikasi intermetalik yang terbentuk karena menggunakan mikroskop optik dan untuk pemeriksaan tersebut direncanakan akan menggunakan elektron mikroskop.

Uji Kekerasan

Data hasil uji kekerasan ditampilkan pada Gambar 4. Dari gambar tersebut dapat

dilihat bahwa tebal lapisan yang terjadi bervariasi dengan fungsi waktu perlakuan panas (Holding Time) yang digunakan. Kekerasan maksimum yang diperoleh terjadi pada waktu perlakuan panas 8 jam, kekerasan lapisan yang terjadi adalah 1120 HV. Dari referensi 1 diperoleh data bahwa fasa intermetalik dengan kekerasan 1120 adalah $Al_{12}Fe_3Si$, sedangkan fasa $FeAl_3$ memiliki kekerasan 730 HV dan fasa tersebut diperoleh pada waktu pemanasan 4 jam dan 6 jam.

Disisi lain perlakuan panas dengan waktu 8 jam, mengakibatkan kekerasan material benda kerja menurun cukup berarti dari 617HV menjadi 312 HV. Hal ini dapat dikakibatkan, butir yang membesar dan terjadinya perubahan karbida kompleks (annealing effect) pada material HSS M4 1.



Gambar 4. Graft hasil uji kekerasan specimen dengan berbagai waktu perlakuan panas

Uji Keausan.

Pengujian keausan dilakukan berdasarkan ASTM B611-76. Dari pengujian ini ditentukan umur dan prosentase keausan dengan lama pengujian 30 menit.

Umur dihitung berdasarkan rumus berikut ini :

$$\text{Umur} \sim (Bo/Bo-BI) \times 30 = \dots \dots \dots$$

... (Menit),

Sedangkan prosentase keausan ditentukan dengan rumus Prosentase keausan = ((Bo-BI)/Bo) x 100 %

Dimana; Bo = Berat awal, BI=Berat ahir. Data uji keausan dapat dilihat pada Tabel berikut. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa waktu perlakuan panas 8 jam memiliki laju keausan yang paling kecil sebesar 0,147% dan umur 14,125 hari, sedangkan tanpa lapisan prosentase keausan adalah 1,13 % dan umumnya 1,84 hari. Dari data ini dapat disimpulkan

bahwa adanya lapisan Fe-Al dapat meningkatkan umur sebesar 7,7 kali.

Tabel 2. Komposisi Kimia Baja Perkakas HSS M-14

C	Mn	Si	W	Mo	Cr	V	Co
1,09	0,39	0,342	6,588	3,80	4,18%	2,14%	4,98

Tabel 3 Komposisi Kimia Material Pelapis 52 CN-S (Standar Metco)

No	Elemen	% Berat
01	AL	88
02	Si	12

Tabel 4 Data Hasil Uji Keausan

Kondisi	Tanpa Perlakuan Panas	Perlakuan Panas T= 8500C, t= 4 Jam	Perlakuan Panas T = 8500C, t= 6jam	Perlakuan Panas T= 8500C, t 8jarn
Berat awal	5,30 gr	7,18 gr	7,28 gr	6,77 gr
Berat akhir	5,28	7,11	7,26	6,76
Umur	1,84 hari	2,1 hari	7,5 hari	14,125 hari
Prosentase Keausan	1,13%	0,97%	0,27%	0,147%

Kesimpulan dan Saran

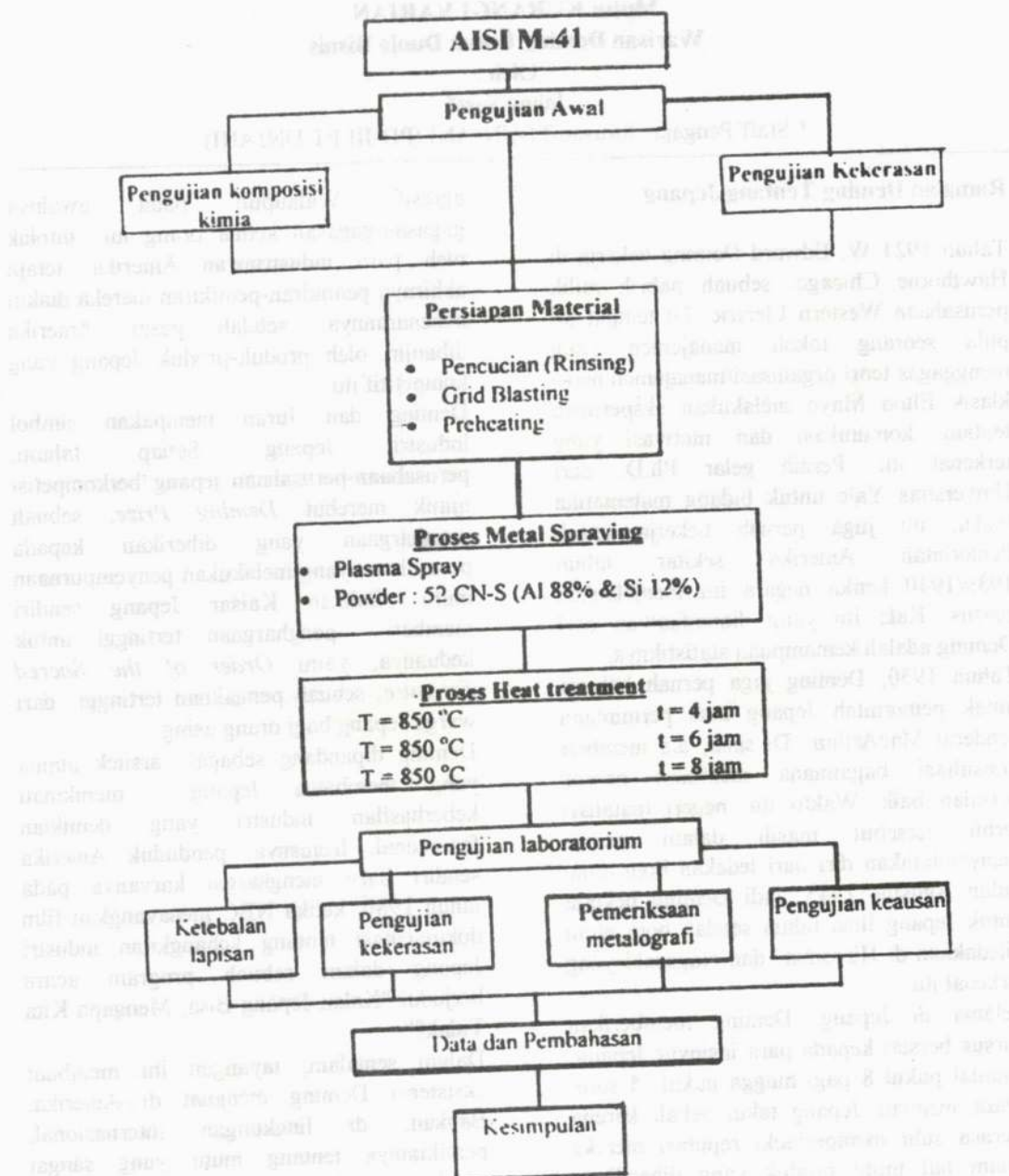
Dari penelitian awal yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan dan saran.

1. Proses metal spray dan diikuti dengan proses perlakuan panas, dapat digunakan untuk meningkatkan kekerasan pada permukaan baja perkakas HSS M14.
2. Lapisan Fe-Al terbentuk setelah spesimen mengalami proses laku panas, dan parameter yang digunakan pada perlakuan panas akan menentukan tebal dan kekerasan lapisan yang terbentuk.
3. Pada penelitian ini parameter yang menghasilkan kekerasan dan ketebalan lapisan paling tinggi adalah; Temperatur 850°C dan waktu pemanasan (Holding Time) 8 jam. Dengan parameter perlakuan panas tersebut diperoleh kekerasan maksimum 1120 HV dan menurunkan prosentase keausan serta menaikkan umur sampel dari 1,84 hari menjadi 14,125 hari.
4. Pada proses perlakuan panas temperatur 850°C dan waktu pemanasan (Holding Time) 8 jam, terjadi penurunan kekerasan sampel yang cukup berarti dari 617HV menjadi 312 HV oleh karena, itu disarankan melakukan penelitian untuk mencari parameter perlakuan panas yang optimal.

Daftar Pustaka

1. Davis JR, " Aluminumrn and Aluminum Alloys", ASM specialty handbook, Material Park, Ohio, USA 1993.
2. Begemen ML, "Manufacturing Processes", Jhon Wiley, London 1957
3. Calister, Jr, " Material's Science and Engineering an Introduction" Jhon Wiley & Son Inc, 1985
4. Smallman RE, " Modern Physical Metallurgy", Betterworths, London, 1976.
5. ASM Metal Handbook, "Surface Cleaning, Finishing and Coating", Vol.5, Ninth Edition 1982
6. ASM Metal Handbook, " Properties and Selection Stainless Steel, Tool Material and Special Purpose Metal ", Vol.3, Ninth Edition 1982.
7. Robert GA, Harnaker JR, Jhonson AR, " 11 Tool Steel", ASM Handbook, Third Edition 1962
8. Saubari A K" Pelapisan Al Pada &kja Dengan Proses Metal Spray", Departemen Teknik Mesin ITB 1991
9. Schaffer J.P," The Science and Design of Engineering Material", WCB/Mc Graw-Hill, 1999

Kondisi	Tempo Pembekuan Panas	Tempo Pembekuan Panas	Tempo Pembekuan Panas	Tempo Pembekuan Panas
Kondisi Normal	1,20 gr	1,18 gr	1,18 gr	1,18 gr
Kondisi Normal	2,28	2,11	2,25	2,25
Kondisi Normal	1,84 jam	2,1 jam	2,2 jam	1,4-1,5 jam
Kondisi Normal	1,13%	0,97%	0,97%	0,143%



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Mutu: KURANGI VARIAN
Warisan Deming Untuk Dunia Bisnis

Oleh :

Jahny Sast*

* Staff Pengajar Jurusan TI-UNJANI (PD-III FT UNJANI)

Ramalan Deming Tentang Jepang

Tahun 1921 W. Edward Deming bekerja di Hawthorne Chicago, sebuah pabrik milik perusahaan Western Electric. Di tempat ini pula seorang tokoh manajemen yang menggagas teori organisasi/manajemen neo-klasik Elton Mayo melakukan eksperimen tentang komunikasi dan motivasi yang terkenal itu. Peraih gelar Ph.D. dari Universitas Yale untuk bidang matematika fisika, itu juga pernah bekerja untuk Pemerintah Amerika sekitar tahun 1939/1940 ketika negara itu menjalankan sensus. Kala itu yang dimanfaatkan dari Deming adalah kemampuan statistiknya.

Tahun 1930, Deming juga pernah bekerja untuk pemerintah Jepang atas permintaan Jenderal MacArthur. Di sana, dia memberi konsultasi bagaimana membuat sensus berjalan baik. Waktu itu, negeri matahari terbit tersebut masih dalam proses nienyembuhkan diri dari ledakan bom atom bulan Agustus 1945. Jadi Deming bekerja untuk Jepang lima tahun setelah bom atom diledakkan di Hiroshima dan Nagasaki yang terkenal itu.

Selama di Jepang, Deming memberikan kursus berseri kepada para insinyur Jepang, dimulai pukul 8 pagi hingga pukul 5 sore. "Para insinyur Jepang takut sekali karena merasa sulit memperbaiki reputasi mereka dalam hal mutu produk yang dihasilkan, kenang Deming. "Saya katakan kepada mereka, Anda pasti bisa dan mampu, melakukan sesuatu Yang betul-betul baru untuk memperbaiki reputasi produksi-produk industri Jepang."

Deming meramal, dalam lima tahun mendatang, para industriawan manca negara akan minta disuplai produk-produk Jepang, karena mereka berhasil memperbaiki mutu produknya, akan tetapi ternyata ramalan itu "meleset". Bukan lima tahun seperti apa yang diramalkan Deming, , tetapi cukup empat tahun saja! Edward Deming, juga dikenal sebagai pendiri gerakan sadar mutu. Bersama rekan Amerikanya, Joseph Juran, bergiat menanamkan filosofis mutu secara

agresif. Walaupun pada awalnya gagasan-gagasan kedua orang ini ditolak oleh para industriawan Amerika, tetapi akhirnya pemikiran-pemikiran mereka diakui kebenarannya, setelah pasar Amerika dibanjiri oleh produk-produk Jepang yang kompetitif itu.

Deming dan Juran merupakan simbol industri Jepang. Setiap tahun, perusahaan-perusahaan Jepang berkompetisi untuk merebut *Deming Prize*, sebuah penghargaan yang diberikan kepada perusahaan yang melakukan penyempurnaan mutu. Bahkan Kaisar Jepang sendiri memberi penghargaan tertinggi untuk keduanya, yaitu *Order of the Sacred Treasure*, sebuah pengakuan tertinggi dari warga Jepang bagi orang asing.

Deming dipandang sebagai arsitek utama yang membawa Jepang menikmati keberhasilan industri yang demikian fenomenal. Ironisnya, penduduk Amerika sendiri baru menghargai karyanya pada tahun 1980, ketika NBC menayangkan film dokumentasi tentang kebangkitan industri Jepang dalam sebuah program acara berjudul "Kalau Jepang Bisa, Mengapa Kita Tidak?"

Dalam semalam, tayangan itu membuat eksistensi Deming menguat di Amerika. Bahkan, di lingkungan internasional, pemikirannya tentang mutu yang sangat revolusioner itu mendapatkan pengakuan. "Setiap proses produksi tidak dapat terhindar dari kemungkinan bermutu rendah.

Penyebabnya tidak lain adalah gagasan membuat varian", tegas Deming. "Karenanya, bila ingin menghindari produk bermutu rendah , Anda mesti mampu me-manage varian produk. Itulah jalan menuju peningkatan mutu.

Era Ketiga Revolusi Industri

Di sela-sela kesibukannya berseminar diberbagai tempat, Deming masih menyempatkan diri untuk mengajar seminggu sekali di Universitas Kolumbia, New York. Dalam setahun tidak kurang dari

20 seminar dan *work shop* menjadikannya sebagai pembicara, sedangkan setiap seminar dan *work shop* berlangsung rata-rata empat hari. Jadi bisa dibayangkan!

Tahun 1970, perusahaan besar seperti Ford Motor Company juga memakai pemikiran Deming sebagai kunci yang membuat industri mereka dapat bertahan. Salah satu perusahaan yang memproduksi alat-alat kantor, Nashua Corporation dan New Hampshire, merupakan perusahaan barat pertama yang mengadopsi pemikiran pria kelahiran tahun 1900 itu. Padahal, Nashua merupakan satu dari 500 perusahaan terbaik versi majalah terkemuka "Fortune". Tahu apa yang dihasilkan dari adopsi itu? Nashua berhasil mempercepat proses penerimaan order-nya dari delapan hari menjadi satu jam. Keluhan pelanggan juga turun drastis, 70 %.

William E. Conway, presiden Nashua, menyebut Deming sebagai "Panutan dalam Era Ketiga Revolusi Industri". Dikatakannya, Deming telah mengembangkan suatu model kontrol statistik terhadap mutu sehingga manajemen bisnis menjadi diperbarui. "Industriawan Jepang benar-benar memanfaatkan model itu sejak paruh kedua abad ke-20," ujarnya. Sementara itu, di Inggris, Sir John Egan memberi komentar dalam buku Deming yang diterbitkan pada 1986 "Out of the Crisis". Pemikiran Deming, khususnya dalam buku itu perlu dibaca oleh setiap eksekutif puncak di Inggris. Sebab, hal itu akan merangsang Anda untuk memikirkan dengan lebih serius, kemampuan kompetisi perusahaan Anda di tingkat dunia," demikian antara lain bunyi tulisan itu.

Empat lingkaran

Resep dan formula apakah yang diberikan Deming kepada para insinyur Jepang? Mereka menyebutnya "Lingkaran Deming (Deming Circle). Empat faktor yang berada dalam "lingkaran" itu adalah; Perencanaan (Plan), Pelaksanaan (Do), Pemeriksaan (Check), dan Tindakan (Action). Deming sendiri menyebut empat hal ini sebagai lingkaran manajemen atau dikenal juga dengan siklus PDCA.

Deming juga menekankan pentingnya aspek filosofik dalam manajemen. "Pelanggan harus dilihat sebagai tahap yang paling

penting dalam rangkaian kegiatan produksi," pesannya. "Bila puas, pelanggan akan mengulangi dan menambah permintaan. Mereka juga akan mengajak teman-temannya untuk menggunakan jasa atau produk kita," kata Deming. "Akan lebih bagus lagi bila kita menyempatkan diri untuk bertatap muka dengan pelanggan. Cari tahu kebutuhan mereka pada tahun-tahun mendatang, dan pikirkan langkah antisipasi yang perlu dipersiapkan."

Empat Belas Alat Manajemen Bisnis

Deming mengemukakan empat belas butir pemikiran untuk para manajer, Henry Neave (penulis buku *The Deming Dimensions*) menyebutnya sebagai "bukan teknik atau instruksi", tapi lebih sebagai alat untuk membuat pikiran terbuka pada hal-hal baru. Bisa saja itu bersifat sangat berbeda dibandingkan yang sudah ada. Tapi, butir-butir pemikiran itulah yang akan membawa Anda kepada organisasi bisnis dan manajemen SDM yang lebih baik.

Neave juga mengomentari keempat belas butir pemikiran Deming, termasuk pernyataan Deming seperti; "Saya sudah membuktikan diri mampu menyampaikan pesan dalam kata-kata yang ringkas. Maka, Anda pun harus bisa atau berusaha mengurangi varian dalam proses produksi Anda.

Berikut ini adalah keempat belas butir pemikiran Deming:

1. Penyempurnaan produk dan pelayanan yang berkesinambungan
2. Mengadopsi filosofik yang dipegang oleh orang-orang Jepang.
3. Menempatkan kesadaran mutu di tingkat pertama.
4. Hilangkan gagasan melakukan tender demi penghematan biaya. Pentingkan dulu mutu, kemudian pikirkan masalah harga.
5. Sempurnakan terus setiap tahapan proses mulai dari perencanaan, produksi, dan pelayanan.
6. Melembagakan kebiasaan-kebiasaan memberi pelatihan dengan metode mutakhir. Setiap orang di perusahaan harus merasakam itu, termasuk manajemen puncak.
7. Tekankan kepada setiap orang untuk memiliki kemampuan memimpin. Hal ini akan menolong pencapaian hasil kerja yang lebih baik.

8. Buang rasa takut, tingkatkan efektivitas komunikasi dua arah.
9. Setiap hambatan yang mengganggu peran departemen teknis dan para staf harus diketahui secara rinci.
10. Kurangi tekanan kerja karena hal itu akan memancing permusuhan.
11. Hindari penetapan target secara kaku. Lebih baik, pikirkan kelengkapan fasilitas dan gaya kepemimpinan yang lebih tepat untuk diterapkan.
12. Hilangkan setiap hambatan yang ada, ciptakan suasana saling menghargai, contohnya melalui penilaian prestasi tahunan berdasarkan pencapaian sasaran (management by objectives)
13. Pacu semangat belajar dan keinginan memperbaiki diri.
14. Sampaikan dan perjelas komitmen eksekutif puncak terhadap upaya penyempurnaan mutu, produktivitas, dan tanggung jawab mereka untuk secara konsisten menerapkan komitmen tersebut.

sumber: Guide to the Management Gurus

PETUNJUK BAGI PENULIS

1. Naskah belum pernah diterbitkan dalam media cetak lain, diketik dengan spasi rangkap pada kertas HVS (A4) menggunakan pengolah kata Microsoft Word (MS-Word), maksimal 15 halaman.
2. Artikel yang dimuat dalam Jurnal Teknik ini meliputi tulisan hasil penelitian, gagasan konseptual, kajian dan aplikasi teori, tinjauan konseptual, dan resensi buku dalam bidang sains & teknologi.
3. Artikel (hasil penelitian) memuat:
 - Judul
 - Nama Penulis(tanpa gelar akademik)
 - Abstrak (bahasa Indonesia/bahasa Inggris)
 - Kata-kata kunci
 - Pendahuluan (memuat latarbelakang masalah dan sedikit tinjauan Pustaka, serta masalah/tujuan penelitian).
 - Metode Penelitian
 - Hasil Penelitian
 - Pembahasan
 - Kesimpulan dan saran
 - Daftar Pustaka
 - Biodata Penulis
4. Artikel (konseptual/setara hasil penelitian) memuat:
 - Judul
 - Nama Penulis(tanpa gelar akademik)
 - Abstrak (bahasa Indonesia/bahasa Inggris)
 - Kata-kata kunci
 - Pendahuluan
 - Subjudul (sesuai dengan kebutuhan)
 - Penutup (kesimpulan dan saran)
 - Daftar Pustaka
 - Biodata Penulis
5. Artikel 2 (dua) eksemplar dan disketnya dikirim paling lambat 1 (satu) bulan sebelum bulan penerbitan kepada:

Redaksi Jurnal Teknik
Jl. Gatot Subroto PO BOX 807
Bandung
Tlp : (022)7312741
Fax : (022) 730 9433
E-mail : moro@koran .com

6. Kepastian pemuatan atau penolakan naskah akan diberitahukan secara tertulis. Penulis yang artikelnya dimuat akan mendapat imbalan Rp 50.000,- dan I (satu) buah Jurnal Teknik sebagai bukti. Artikel yang tidak dimuat tidak akan dikembalikan, kecuali atas permintaan penulis.

