

**RANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PROSES  
POLIMERISASI FENOL FORMALDEHIDA  
(Design of Proses Control System for Phenol Formaldehyde Polymerization)**

*Hermawan Thaheer*

*Program Studi Teknik Industri Pertanian (Univ. Djuanda)*

## 1. PENDAHULUAN

Fenol formaldehida adalah senyawa polimer kimia yang dipergunakan secara luas untuk berbagai keperluan, seperti misalnya produk seni, komponen mesin, perekat ataupun produk plastik cetakan lain untuk kebutuhan sehari-hari. Bahan pra cetak polimer fenol formaldehida dinamakan resin. Resin fenol formaldehida dibuat dengan mereaksikan senyawa fenol dan formaldehida pada kondisi tertentu, dan dihentikan di tengah jalan.

Proses produksi dilakukan di dalam suatu reaktor yang dilengkapi dengan unit pemanas dan unit pendingin. Produksi resin, sebagaimana umumnya proses polimerisasi, dilaksanakan dengan sistem *batch*, karena riskan untuk dilakukan secara sinambung.

Reaksi fenol formaldehida bersifat eksotermis, di mana apabila tidak berhasil dikendalikan dapat menimbulkan dua kerugian yakni : 1) resin membeku menjadi plastik; dan 2) reaktor meledak.

Pabrik perekat fenol di Indonesia tercatat sekitar 12 perusahaan tergabung di dalam Asosiasi Industri Formaldehida Dan *Thermosetting Adhesive* (AIFTA). Tidak semua pabrik perekat di Indonesia mampu memproduksi resin fenol formaldehida karena prosesnya yang cukup riskan, apalagi sistem yang diadopsi oleh hampir semua pabrik di Indonesia masih sangat konservatif. Tingkat kegagalan produksi

merupakan salah satu alasan kurangnya minat industri perekat untuk membuat fenol formaldehida.

Semua pabrik perekat yang telah membuat fenol formaldehida di Indonesia masih menerapkan sistem pengendalian proses secara manual, sehingga tingkat keberhasilannya tergantung pada kesiagaan operator. Dua parameter yang paling dijaga pada reaksinya adalah temperatur dan pH, selama ini dikendalikan dengan piranti pasokan air pendingin dan kertas pH.

Rancangan pengendalian proses produksi resin fenol formaldehida bagi Industri perekat di Indonesia sudah masanya untuk diperbaiki, tanpa merubah rancangan proses asalnya. Pengendalian proses produksi resin fenol formaldehida bertujuan untuk menyempurnakan reaksi, mengurangi tingkat kegagalan, dan menekan biaya produksi.

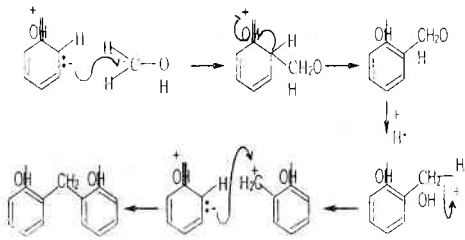
Apabila ditelaah lebih rinci, pengendalian proses di Industri resin fenol formaldehida ini secara teknis bertujuan :

1. Menjaga konsistensi mutu, melalui konsistensi proses yang terkendali;
2. Menjamin keselamatan kerja, melalui pengendalian resiko;
3. Menjamin kelestarian lingkungan, melalui pengurangan resiko limbah;
4. Menjamin keberhasilan proses produksi, agar produk tidak gagal.

## II. TEORI KIMIA KONDENSASI FENOL FORMALDEHIDA

### 2.1. Mekanisme Reaksi Polimerisasi

Kondensasi fenol dengan formaldehida pada mulanya terjadi karena adanya asam atau basa untuk membentuk suatu metilol-fenol atau alkohol fenolat, lalu menjadi dimetil fenol. Karbon yang diserang formaldehida pertama kali adalah karbon yang berada pada posisi 2-, 4-, atau 6- di dalam cincin fenol. Tahap berikutnya adalah reaksi yang melibatkan kelompok metilol dengan fenol atau metilol-fenol lain untuk memulai pembentukan polimer rantai lurus, lalu mengeras membentuk cabang-cabang.



Gambar 1. Proses reaksi pembentukan inti polimer fenol formaldehida

Cincin fenol kurang aktif sebagai inti nukleofilik pada suatu pH asam karena menjadi produk hidroksida dan cincin protonasi. Aldehida diaktifkan dengan protonasi, sehingga berdampak kepada penurunan potensial reaktifitas.

Reaksi substitusi berlangsung perlahan dan diikuti kondensasi sebagai suatu hasil dari protonasi lanjut, membentuk sebuah ion bensilkarbonium yang bertindak sebagai nukleofil. Nukleofil atau inti polimer tersebut terus mengalami protonasi sehingga

disebut resin fenol formaldehida. Apabila reaksi tidak dihentikan, maka kondensasi berlanjut pada penggumpalan dengan penguapan sejumlah air atau bahkan keseluruhan, hasilnya adalah gumpalan plastik fenol formaldehida.

Reaksi dapat dilangsungkan baik dalam suasana asam maupun basa, perbedaan antara kedua katalis ini adalah : 1) pada laju serangan aldehida terhadap fenol; 2) dalam runtunan kondensasi alkohol fenolat, dan beberapa perluasannya; 3) kealamiahannya reaksi kondensasi. Pada katalis asam, pembentukan alkohol fenolat relatif lebih lamban, padahal tahap ini sangat menentukan laju reaksi keseluruhan.

Sepanjang reaksi antara fenol dan formaldehida akan terbebaskan panas sebesar 4.1 kkal/mol formaldehida yang ditambahkan, dan 16.9 kkal/mol dihitung dari air terbebaskan pada kondensasi lanjut. Dengan demikian total panas terbebaskan adalah 100 kalori per gram reaktan anhidrat.

### 2.2. Reaksi Pengerasan

Kondensasi inisiasi asam dari kelompok metilol dengan inti fenolat mungkin cukup eksotermis untuk mencapai ketinggian temperatur pengerasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengerasan resin fenol formaldehida terjadi dalam dua tahap. Pada tahap pertama terbentuk polimer ikatan eter, dengan membebaskan air, melalui kondensasi dua kelompok metilol. Tahap kedua dari pengerasan pada suhu tinggi ditampakkan dengan perubahan warna dari kuning pucat menjadi coklat tua. Terjadi pengurangan kelarutan di dalam alkali, kloroform, dan benzena.

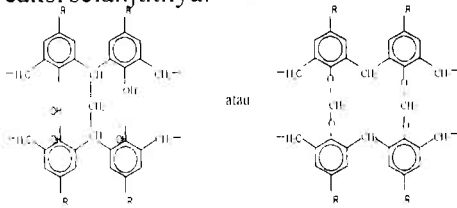
Tabel 1. Analisis penggunaan bahan pada produksi resin fenol formaldehida sistem curah, kapasitas 5 ton

No	Nama Bahan	BM	Rasio Molar	Larutan	Anhidrat
01	Formaldehida I (37%)	30	1 10	600.0 kg	222.00 kg
02	Formaldehida II (37%)	30	1 10	900.0 kg	333.00 kg
03	Fenol (80%)	94	1 00	3.253.38 kg	2.602.7 kg
04	HCOOH (30%)	46	sedikit	6.03 kg	4.22 kg

Produk pada awalnya terbagi menjadi dua yakni yang larut dan tak larut, porsi yang larut tersebut sudah mengandung ikatan eter. Bentuk akhir dari polimer fenol formaldehida adalah,

Reaksi terakhir ini melibatkan pembentukan air lebih lanjut, hal ini didukung oleh fakta bahwa polinuklear dimetilolfenol mengandung jembatan metilena, menampilkan sedikit formaldehida dan lebih banyak air per mol.

Formalin (larutan formaldehida 37%) tahap pertama dimasukkan ke dalam reaktor, ditambahkan fenol dan diaduk perlahan. Secara perlahan campuran dipanaskan hingga mencapai suhu 80-100 °C dengan mengalirkan steam ke dalam jacket. Tekanan uap yang dipergunakan hanya sekitar 1.2 kg/cm<sup>2</sup>, namun saat mencapai suhu 60°C harus segera dihentikan, sebab aktivasi awal ini telah menimbulkan reaksi berantai eksotermis. Panas dari reaksi akan dapat memanaskan reaksi selanjutnya.



Gambar 2. Bentuk polimer fenol formaldehida

Formalin tahap kedua dimasukkan setelah suhu reaktor mencapai 100°C, lalu temperatur dijaga dengan memasukkan air pendingin ke dalam jacket. Temperatur tidak boleh melebihi 110°C karena akan terjadi pendidihan dan meluap, sehingga membahayakan operasi.

Formalin tahap kedua ini dimasukkan, umumnya setelah 1 ¼-3 jam, tergantung ukuran masa yang bereaksi. Reaksi kedua ini akan berjalan lambat dan sekitar 5-10% formaldehida tak tereaksikan, maka selanjutnya dimasukkanlah asam formiat.

Hal yang perlu mendapat perhatian adalah evolusi panas selama reaksi, karena harus dikendalikan dengan seksama. Formulasi pada Tabel 1 diperkirakan akan menghasilkan panas:

$$100 \text{ kalori/g} \times (222.00+333.00+2,602.7) \times 1000 = 315,770,000.0 \text{ kalori}$$

Apabila tidak dikendalikan maka panas evolusi reaksi tersebut dapat meningkatkan suhu reaksi sebagai berikut,

$$315,770,000.0 = \text{Massa reaksi} \times C_{p_{\text{larutan}}} \times (T_{\text{maks}} - T_{\text{min}}) = (3,161,920.0)(0.6)(T_{\text{maks}} - 373^{\circ}\text{K})$$

$$T_{\text{maks}} = 539.44^{\circ}\text{K} = 266.44^{\circ}\text{C}$$

artinya reaksi akan memanaskan dari 100°C menjadi 266.44°C. Dengan formulasi yang sama dapat diperkirakan jumlah air pendingin yang harus disiapkan untuk mengendalikan panas tersebut adalah,

$$315,770,000.0 = \text{Massa air} \times C_{p_{\text{air}}} \times (T_{\text{maks}} - T_{\text{min}}) = \text{Massa air} \times 1 \times (539.44 - 300.00)$$

$$= \text{Massa air} \times 239.44$$

$$\text{Massa air} = 1,318,785.50 \text{ gram} = 1,318.79 \text{ liter} = 1.32 \text{ m}^3.$$

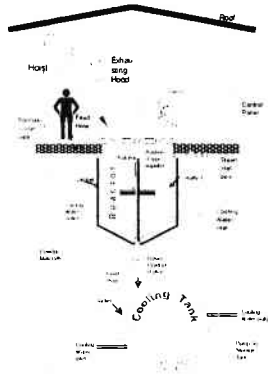
Total reaksi berlangsung antara 2 ½ - 3 ½ jam, maka pasokan air pendingin ke dalam jacket sekurang-kurangnya 0.528

m<sup>3</sup>/jam atau 0.15 cm<sup>3</sup>/detik.

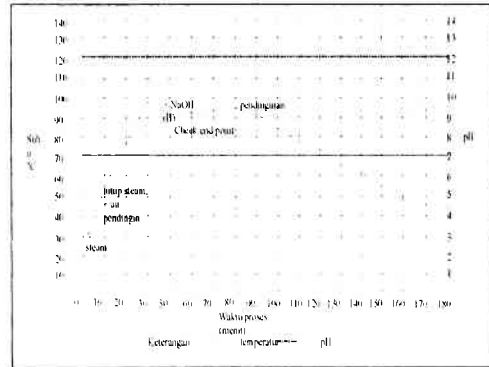
Metoda lain yang dapat dilakukan untuk mengendalikan pendidihan adalah dengan menggunakan penghampaan udara, akan tetapi tekanan di dalam reaktor menjadi sangat besar sehingga diperlukan rancangan reaktor yang lebih kokoh. Untuk menekan penguapan, umumnya dilakukan refluks menggunakan kondensor yang dipasang di atas reaktor.

### 2.3. Peralatan Proses

Telah diketahui bahwa tolok ukur yang paling kritis harus terus diamati dari waktu ke waktu dari proses ini adalah perubahan temperatur. Kenaikan temperatur selama proses terjadi akibat reaksi eksotermis antara fenol dan formaldehida, sementara panas reaksi justru akan meningkatkan kinetika reaksi. Dengan demikian dipergunakan dua alat kendali yakni pemasok panas dan pengendali panas. Perubahan panas dari waktu ke waktu sepanjang proses pembuatan resin fenol formaldehida ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Sketsa reaktor dan tangki pendingin untuk polimerisasi resin fenol formaldehida sistem batch



Gambar 4. Fluktuasi temperatur sepanjang proses pembuatan resin fenol formaldehida, data dari salah satu perusahaan resin dan formaldehida di Indonesia ( FOCUS Consultant, 1998)

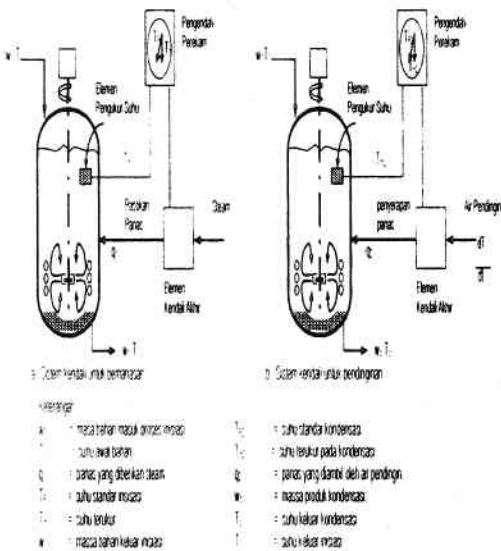
## 3. RANCANGAN SISTEM OTOMATISASI PENGENDALIAN PROSES

### 3.1. Otomasi Tolok Ukur Proses

Apabila diperhatikan dengan seksama, maka ada dua proses yang paling kritis pada proses pembuatan resin fenol formaldehida yakni :

1) aktivasi reaksi; dan 2) kondensasi. Kedua proses ini telah dianalisis memiliki titik kritis pada pengendalian panas.

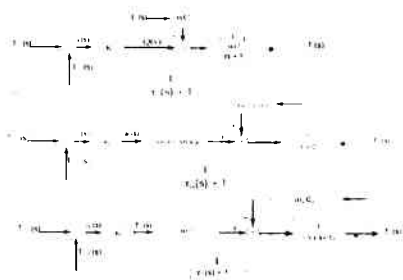
- a. Pengendalian piranti pemanas, untuk tahap aktivasi;
- b. Pengendalian piranti pendingin, untuk tahap kondensasi.



Gambar 5. Simulasi sistem pengendalian tolak ukur kritis pada proses pembuatan polimer resin fenol formaldehida

Dengan demikian, dari rangkaian panjang proses pembuatan resin urea formaldehida dapat dibuat dua langkah pengendalian yakni :

Untuk memahami kedua proses pengendalian tersebut disajikan Gambar 5 untuk piranti pemanasan dan piranti pendinginan. Secara sederhana kedua proses tersebut dapat dibuat diagram blok-nya, untuk tahap analisis awal, diagram blok sebagaimana disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok pengendalian proses pembuatan resin fenol formaldehida sistem curah

### 3.2. Prinsip Perancangan Piranti Kendali Reaktor

Perangkat keras yang dipergunakan untuk pengendali temperatur menggunakan air pendingin paling tidak adalah :

- transduser, merubah temperatur menjadi arus listrik;
- pengendali-pencatat, transformasi arus ke arus;
- konverter, merubah arus listrik menjadi tekanan;
- pengendali katup, merubah tekanan menjadi laju alir.

Pada proses pengendalian suhu untuk pemanasan, maka sensor digunakan sebagai alat pengendali katup steam dan pengaliran kondensat (uap jenuh). Proses aktivasi dilakukan untuk mengangkat suhu awal reaksi agar mencapai temperatur 60 °C. Panas dapat dialirkan melalui pipa steam masuk ke dalam jacket.

Pemasukan asam untuk penyempurnaan reaksi pengerasan dapat dilakukan secara manual atau menggunakan pencacah waktu, sehingga rancangan asam-basa bisa tetap terpakai meskipun konsepsinya bukan untuk pengatur pH.

Pengendalian pengadukan dilakukan bukan hanya mengatur putaran pengaduk, tetapi juga pemilihan *impeller* dan penggunaan *baffle* terjadi, sementara pipa steam sudah terlanjur tertutup dan air pendingin telah dialirkan. Kondisi semacam ini harus segera dipanaskan kembali, artinya ada mekanisme penutupan kran air pendingin dan pembukaan steam valve.

Proses pembuatan fenol formaldehida memiliki karakteristik pertumbuhan viskositas sepanjang reaksi. Substrat awal yang dimasukkan memiliki karakteristik *newtonian*, tetapi terus

tumbuh menjadi non newtonian. Kenaikan viskositas berkaitan erat dengan pertumbuhan polimer.

Pengendalian pengadukan pada produksi fenol formaldehida dapat didekati dengan dua tolok ukur kendali yaitu : 1) viskositas; dan 2) kadar polimer. Sensor yang ditempatkan paling tidak harus dapat mengidentifikasi salah satu tolok ukur tersebut.

Sensor pengukur kandungan polimer didasarkan pada pemencaran cahaya. Absorbansi didefinisikan sebagai logaritma rasio intensitas dari sinar yang tertahan dengan sinar yang diteruskan. Teori efek tyndall dipergunakan untuk mempelajari defraksi cahaya yang ditembakkan ke produk resin, semakin banyak polimer terbentuk maka semakin besar cahaya yang tertahan.

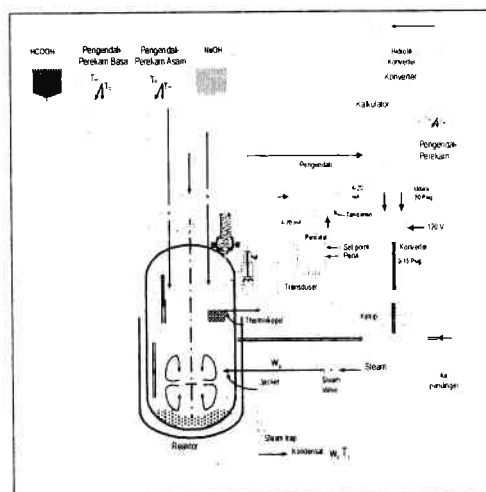
Apabila secara ekonomis memungkinkan, maka pengendalian beberapa indikator proses pada reaktor polimerisasi fenol formaldehida dapat dilakukan secara serempak. Masing-masing memiliki sensor, display, dan konverter yang berbeda tetapi dapat masuk ke dalam satu port input komputer yang sama.

Perangkat penguat dan konverter yang berbeda tentu akan menambah biaya, sementara proses itu sendiri telah diketahui indikator kritisnya, dengan demikian dapat saja dipilih beberapa indikator yang dikendalikan dengan komputer, lainnya tetap dikendalikan secara manual.

### 3.3. Bidang Temu Kendali Reaktor dan Komputer

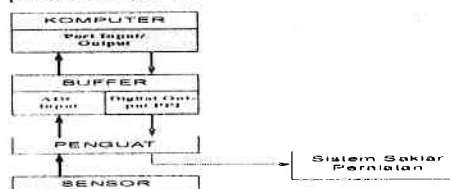
Pengendalian berbasis komputer hanya dapat dilakukan setelah terjadi komunikasi antara proses di dalam reaktor

dengan sistem pengolahan data komputer. Dari proses dapat diidentifikasi beberapa indikator penting yang menjadi tolok ukur keberhasilannya yakni : 1) temperatur; 2) waktu; 3) pH; dan 4) kepekatan polimer.



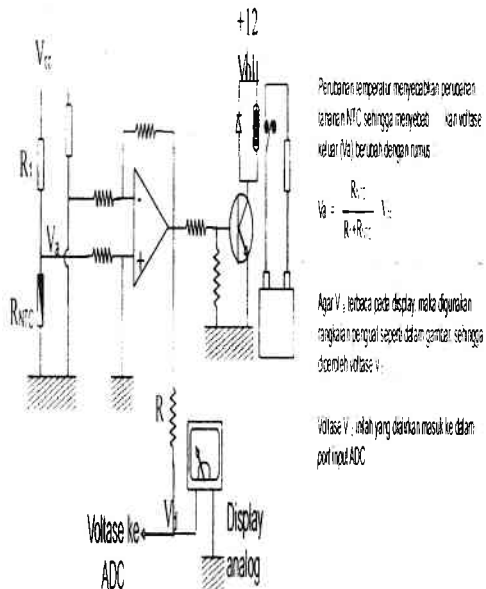
Gambar 6. Rancangan sistem kendali minimum pada reaktor produksi resin fenol formaldehida

Apabila keempat indikator tersebut ingin dikendalikan secara otomatis, maka seluruh data pengukuran pada sensor harus dapat dikirimkan dalam bentuk pulsa listrik. Display yang semula dirancang bersifat analog harus segera dirubah menjadi digital dengan menggunakan perangkat Analog to Digital Converter (ADC). Bagan interaksi antara peralatan luar dengan komputer disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Bagan interaksi antar peralatan luar dengan computer

Sebelum dihubungkan dengan ADC, sensor umumnya diperkuat dengan satu rangkaian pemacu. Salah satu rangkaian yang disusun untuk sensor suhu, indikator paling kritis pada proses pembuatan resin fenol formaldehida disajikan pada Gambar 8 dengan display analog.

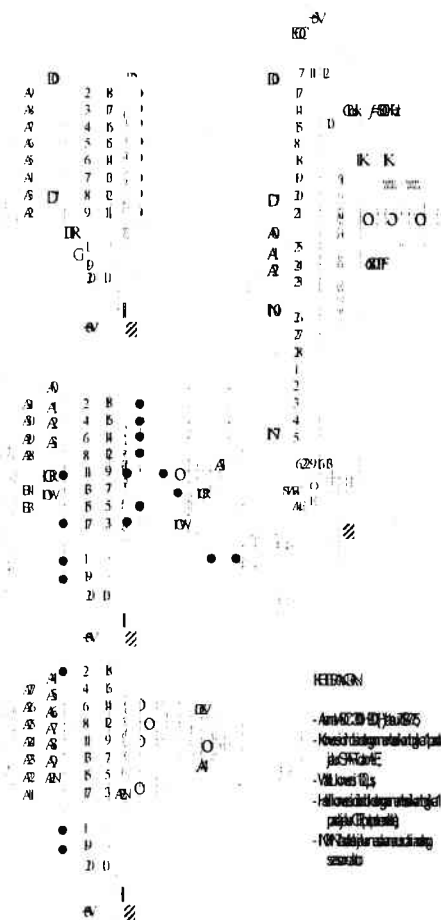


Gambar 8. Penerjemahan data panas dari thermokopel atau thermistor menjadi data display dan arus yang dikirim ke ADC

Dari keluaran display analog Gambar 8, diambil arus yang dikirimkan ke input ADC. Piranti ADC yang dimasukkan ke dalam slot komputer harus dibantu dengan buffer yang berfungsi sebagai :

1. unit penyaluran data, biasanya dipergunakan IC 74LS245;
2. unit penyaluran alamat dan kendali, dipergunakan IC 74LS244.

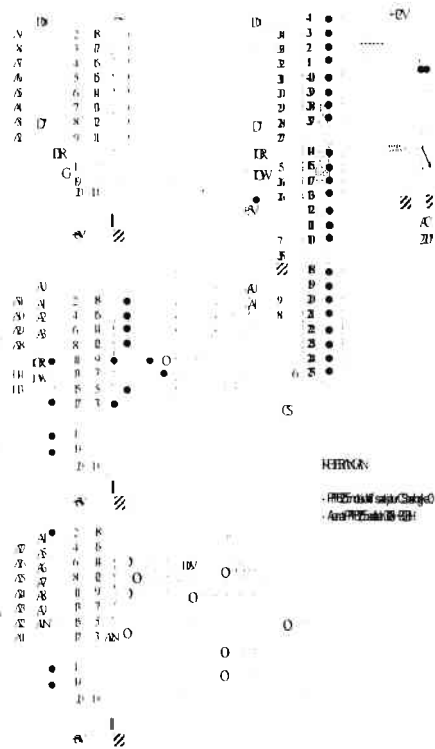
Contoh diagram ADC 0809 disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Contoh diagram ADC 0809

Setelah komputer melakukan pemrosesan data, akan dilakukan tindak lanjut yang harus diinformasikan kembali kepada reaktor. Apabila hasil pengolahan menunjukkan bahwa temperatur berada di atas standar, maka komputer harus mengirimkan perintah pembukaan kran air pendingin dan menutup steam valve. Pesan ini dikirim berupa pulsa melalui perangkat yang disebut Programmable Peripheral Interface (PPI). Gambar 10 menyajikan diagram PPI.

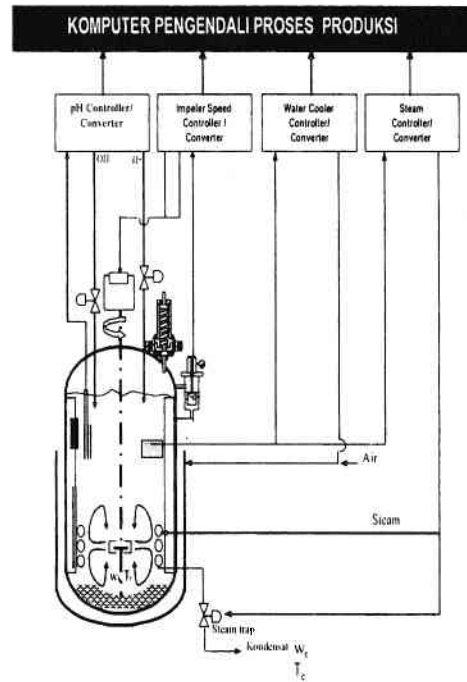




Gambar 10. Diagram *Programable Peripheral Interface* (PPI).

Komunikasi penyaluran data, alamat, dan kendali dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman mesin. Perintah dilakukan dengan mengkonversi data ke dalam satuan hexadesimal berdasarkan posisi tinggi rendahnya pulsa pada kombinasi biner.

Pengolahan data yang telah di-posting, di dalam slot ekspansi komputer kemudian dilakukan dengan pemrograman interaktif. Gambar 11 menunjukkan secara sederhana bagaimana seluruh indikator dari reaktor polimerisasi resin formaldehida dihubungkan ke satu unit komputer pengendali proses.



Gambar 11. Pemusatan sistem kendali utama pada unit komputer produksi

#### IV. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

##### 4.1. Kesimpulan

Proses produksi resin fenol formaldehida di Indonesia yang dilakukan dengan sistem curah termasuk proses yang beresiko tinggi. Reaksi kondensasi fenol dengan formaldehida bersifat eksotermis, sehingga menghasilkan panas mencapai 315.77 Mkal yang apabila tidak dikendalikan dengan air pendingin dapat menimbulkan bahaya :

1. Kecelakaan kerja berupa pelelehan reaktan dan peledakan reaktor;
2. Pembekuan produk akibat over heated hingga tak dapat dipergunakan lagi.



Saat ini semua piranti kendali dan sistem pengendalian proses di industri resin fenol formaldehida dilakukan secara semi otomatis atau bahkan lebih cocok apabila disebut manual. Rancangan pengendalian proses, selanjutnya ditekankan pada pengaturan dua piranti kendali yakni : 1) pasokan uap panas; dan 2) pasokan air pendingin. Piranti kendali ini dioperasikan berturutan sesuai urutan proses, sebab pasokan panas pada prinsipnya hanya diperlukan saat aktivasi saja.

Rancangan pengendalian secara otomatis memiliki beberapa keuntungan yang dapat dievaluasi dalam struktur biaya produksi. Keuntungan yang diterima dalam bentuk penghematan, dapat dipergunakan sebagai bahan pertimbangan untuk pilihan investasi.

#### 4.2. Rekomendasi

Algoritma komputer untuk pengendalian otomatis dapat dirancang dan dicoba lebih lanjut melalui simulasi data. Selain itu, rancangan reaktor mini dan sistem kendali dapat dicoba untuk verifikasi model yang dibuat.

Penelitian lanjut dapat dilakukan untuk produksi resin urea atau melamin formaldehida. Proses produksi dan perangkat yang dipergunakan pada polimerisasi urea atau melamin dengan formaldehida relatif sama. Sifat reaksi urea atau melamin dengan formaldehida tingkat bahayanya jauh lebih rendah daripada fenol formaldehida.

Apabila uji coba piranti kendali secara laboratorium telah terbukti efektif, maka sudah masanya dirancang piranti murah untuk pabrik-pabrik perekat di Indonesia. Tidak perlu dilakukan modifikasi terhadap reaktor yang telah

terpasang, tetapi cukup menambah sensor dan piranti kendali.

#### DAFTAR PUSTAKA

**Coughanowr, Donald R. 1991.** Process Systems Analysis and Control ( 2<sup>nd</sup> Edition ). McGraw-Hill, Inc., New York.

**Dennis, Pascal. 1997.** Quality, Safety, and Environment : Sysnergy in the 21<sup>st</sup> Century. ASQC Quality Press, Wisconsin.

**FOCUS Consultant. 1998.** Prosedur Produksi Resin PT Giat Ultra Chemical ( Draft 1). Draft Dokumen Sistem Manajemen Mutu ISO 9002 . FOCUS, Jakarta.

**Forsythe, W. and R.M. Goodall. 1991.** Digital Control. McGraw-Hill, Inc., Toronto.

**Ogata, Katsuhiko. 1970.** Modern Control Engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

**Perry, Robert H. and Don Green (Ed.). 1984.** Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill Book Company, Toronto.

**Pizzi, A. (Ed.). 1983.** Wood Adhesive : chemistry and technology. Marcell Dekker, Inc., New York.

**Seider, Warren D., J.D. Seader, and Daniel R. Lewin. 1999.** Process Design Principles : synthesis, analysis, and evaluation. John Wiley & Sons, Inc. New York.