



APLIKASI SISTEM KONTROL PI PADA MESIN PENDINGIN TIPE AIR BLAST SEBAGAI KONTROL EKSPANSI OTOMATIS (*APPLICATION PICONTRONL SYSTEM ON REFRIGERATOR PLATE TOUCH TYPE FOR AUTOMATIC EXPANSION VALVE CONTROL*)

Bayu Rudiyanto^{#1}, Budi Hariono^{#2}, Abi Bakri^{#3}

^{#1}Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember, Jl. Mastrip PO Box 164 Jember

^{#2,3}Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember, Jalan Mastrip PO Box 164 Jember

Abstract

Salah satu cara untuk melakukan penghematan energi dalam proses pembekuan, adalah dengan cara melakukan proses pembekuan secara bertahap menggunakan mesin pendingin tipe lempeng sentuh dengan melakukan pengontrolan temperatur secara otomatis. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan proses perancangan dan pembuatan kontrol katup ekspansi otomatis dengan menggunakan sistem kontrol PI, yang selanjutnya akan diaplikasikan pada mesin pendingin lempeng sentuh untuk melakukan proses pengontrolan temperatur pembekuan. Sensor temperatur LM35 digunakan dalam penelitian ini untuk melakukan pembacaan temperatur pada ruang evaporator, yang mana dari hasil pembacaan sensor tersebut digunakan sebagai sinyal masukan untuk sistem kontrol PI. Berdasarkan hasil pengujian sensor LM35 mempunyai sensitivitas pembacaan yang hampir sesuai dengan data sheet yaitu sebesar $0,009335 \text{ V}/^\circ\text{C}$. Unjuk kerja sistem kontrol PI pada penelitian ini didapatkan respon yang baik pada nilai $K_p = 20$ dan $K_i = 10$, dimana dengan nilai berikut untuk mencapai temperatur *set point* waktu yang dibutuhkan selama 251 detik dengan nilai *maximum overshoot* lebih rendah yaitu $-2,4^\circ\text{C}$. Hasil pendinginan yang didapatkan pada penelitian ini dengan menggunakan sistem kontrol katup ekspansi otomatis didapat proses pendinginan yang lebih cepat dan energi yang dibutuhkan jauh lebih hemat yaitu sebesar 0,265 kWh.

Keyword- Kontrol PI, Sensor LM35, Katup Ekspansi Otomatis, Mesin Pendingin

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi mesin pendingin demikian pesat sejalan dengan tuntutan peningkatan kualitas kehidupan manusia, yang salah satunya ditandai dengan kebutuhan mesin pendingin untuk keperluan pembekuan yang digunakan untuk proses pengawetan berbagai bahan yang dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari. Hidayat (2014) menyatakan, iklim tropis yang terjadi seperti di Indonesia berpengaruh secara signifikan terhadap keawetan paska panen dari hasil pertanian seperti buah-buahan, dan sayur-mayur dan juga dalam perikanan.

Demikian besarnya ketergantungan pada mesin pendingin tersebut kebutuhan akan energi listrik untuk penggerak mesin pendingin cukup tinggi. Upaya untuk

melakukan penghematan pada energi listrik di berbagai sektor perlu dilakukan guna mendukung kepedulian lingkungan seperti global warming, penghematan biaya energi dan upaya program pemerintah untuk melakukan pemerataan penggunaan energi listrik di berbagai daerah yang terdapat di Indonesia.

Telah banyak peneliti yang melakukan penelitian tentang penghematan energi pada mesin pendingin kompresi uap, seperti yang dilakukan Kurniawan (2009) mengkaji tentang energi dan eksergi pembekuan daging sapi menggunakan mesin pendingin kompresi uap tipe lempeng sentuh dengan suhu pembekuan bertingkat. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan hasil efisiensi energi pendinginan sebesar 0.17% dengan total energi input 2.45 kWh, serta efisiensi eksergi sebesar 56.93%. Hasil

tersebut menurut Kurniawan (2009) masih kurang optimal, sehingga dari penelitian tersebut disarankan untuk dikembangkan sistem kontrol temperatur yang dapat mengontrol proses pendinginan sehingga akan didapatkan pendinginan yang optimal. Selain itu juga Kamal (2008) dalam penelitiannya tentang pemodelan sistem pembekuan dengan suhu media bertahap menggunakan mesin pendingin sistem kompresi uap didapatkan hasil pembekuan yang kurang optimal, salah satu penyebabnya adalah proses pengontrolan temperatur ruang evaporator dilakukan secara manual, sehingga hal tersebut menyebabkan temperatur pendinginan pada evaporator kurang terkontrol secara optimal. Oleh karena itu dalam penelitiannya tersebut disarankan untuk dikembangkan sistem pengendali temperatur otomatis untuk mengatur temperatur evaporator dengan menggunakan *solenoid valve* agar didapatkan efisiensi pembekuan lebih optimal.

Melihat dari berbagai saran tersebut maka dalam penelitian ini dilakukan pembuatan kontrol yang dapat mengatur temperatur pendinginan, salah satunya yaitu dengan membuat pengontrolan pada komponen katup ekspansi agar dapat bekerja secara otomatis. Katup ekspansi merupakan komponen mesin pendingin yang berfungsi untuk menurunkan tekanan dan mengontrol aliran refrigerant yang masuk ke evaporator. Pengaturan penurunan tekanan yang dilakukan oleh katup ekspansi dapat membantu kinerja kompresor lebih ringan, sehingga dengan demikian konsumsi energi listrik yang dibutuhkan oleh kompresor juga akan menurun. Untuk itu apabila ingin melakukan penghematan energi listrik yang dikonsumsi oleh mesin pendingin, perlu adanya katup ekspansi yang dapat bekerja secara otomatis agar proses penurunan tekanan dapat lebih akurat dengan tetap memperhatikan hasil pendinginan yang terjadi di ruang evaporator.

Proses pengontrolan katup ekspansi otomatis dapat dilakukan dengan menambahkan *solenoid valve* pada komponen mesin pendingin, yang selanjutnya akan dikontrol secara elektrik, yaitu dengan memanfaatkan pengontrolan temperatur LM35 yang dikontrol dengan sistem kontrol PI. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat sistem kontrol katup ekspansi otomatis yang akan diaplikasikan pada mesin pendingin tipe lempeng sentuh untuk mendapatkan proses pendinginan yang lebih hemat energi dan hasil pendinginannya lebih cepat dan kualitas pendinginannya lebih baik dari pada penelitian terdahulu.

II. METODOLOGI

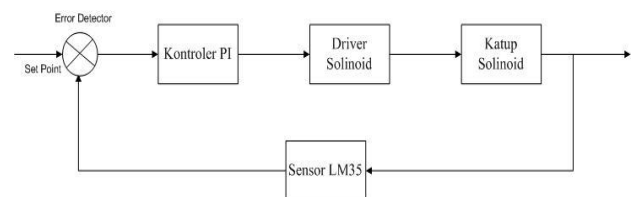
Penelitian diawali dengan melakukan proses studi kepustakaan dan melakukan perancangan sistem kontrol ekspansi otomatis yang meliputi proses perancangan kontrol PI (*Proporsional Integral*), dan perancangan kontrol driver katup solenoid. Peralatan yang digunakan dalam

penelitian ini meliputi: aplikasi Express PCB, aplikasi Proteus 7, dan peralatan kerja. Sedangkan alat yang digunakan untuk proses pengujian meliputi: satu unit mesin pendingin lempeng sentuh, Avometer digital tipe SANWA CD800a, dan Thermocouple, kWh meter, dan Laptop.

Sistem yang akan dibuat adalah suatu sistem pengendali katup ekspansi otomatis yang digunakan untuk mengatur temperatur pada mesin pendingin lempeng sentuh agar tetap stabil sesuai dengan suhu pendinginan yang telah ditentukan. Proses pengendalian katup ekspansi otomatis dilakukan dengan menambahkan *solenoid valve* pada pipa masukan refrigeran sebelum katup ekspansi. Kegunaan dari *solenoid valve* tersebut adalah untuk mengendalikan aliran refrigeran yang masuk pada ruang evaporator.

Proses pengendalian aliran tersebut memerlukan sebuah kontrol untuk menghidupkan dan mematikan *solenoid valve*, dimana kontrol yang digunakan yaitu kontrol PI analog dengan menggunakan op-amp. *Output* dari kontrol PI akan dihubungkan dengan kaki basis pada transistor yang akan menghidupkan relay. Relay ini berfungsi sebagai *driver* untuk memberikan suplai tegangan pada katup *solenoid*. Sensor LM35 digunakan sebagai sensor temperatur yang akan memberikan suatu besaran tegangan dari besarnya temperatur pada ruang pendingin mesin pendingin lempeng sentuh. Sensor LM35 ini digunakan untuk umpan balik masukan bagi rangkaian *error detector* pada kontrol PI.

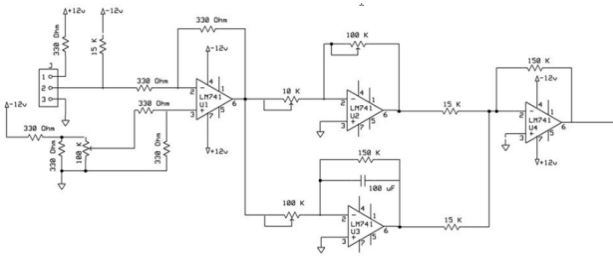
Berikut adalah diagram blok dari pengendali katup solenoid dengan kontrol PI.



Gambar 1. Blok Diagram Pengendali Katup Solenoid

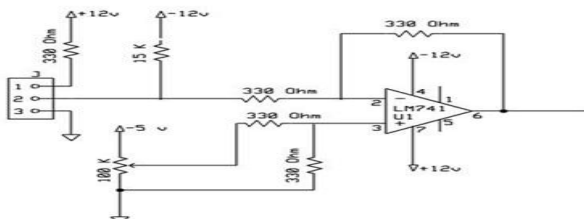
Perancangan Kontrol PI

Bagian terpenting dalam penelitian ini adalah proses pembuatan kontrol PI. Kontrol PI ini akan memberikan aksi kontrol terhadap *plant* yaitu katup *solenoid* AC 7 watt 220 volt. Kontrol yang digunakan adalah kontrol PI analog dengan menggunakan IC Op-amp. Dimana IC Op-amp yang digunakan adalah LM741 yang akan didesain membentuk kontrol *proporsional*, dan *integral*. Berikut desain dari kontrol PI analog akan dibuat:



Gambar 2. Desain Rangkaian PI Analog

Bagian pertama dari kontrol PI adalah rangkaian *error detector* yang merupakan rangkaian *difference amplifier*. Rangkaian *error detector* tersebut berfungsi untuk menghitung sinyal *error* antara pembacaan sensor LM35 dengan nilai *set point* tegangan yang ditentukan.



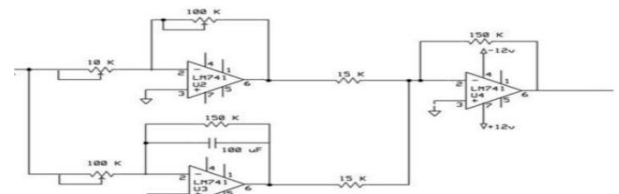
Gambar 3. Rangkaian Error Detector

Pada rangkaian *error detector* diatas, op-amp akan mendapatkan dua input yaitu *set point* (SP) dan nilai aktual atau *process variable* (PV) sensor temperatur LM35. Nilai *set point* (SP) didapatkan dari rangkaian pembagi tegangan yang menggunakan *potensiometer* 100 kΩ dengan suplai tegangan -5 volt. Sedangkan nilai aktual atau *process variable* (PV) didapatkan dari *output* tegangan dari sensor LM35. Untuk menghitung *output* pada rangkaian diatas, maka rangkaian tersebut dapat dianggap sebagai rangkaian *inverting* dan rangkaian *non inverting amplifier*. Dengan menjumlahkan tegangan *output* dari rangkaian *inverting* dan rangkaian *non inverting amplifier* akan didapatkan *output* dari rangkaian.

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{pv} + \left(\frac{R_f}{R_i} + 1\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sp}\right) \quad (2.1)$$

Dengan memberikan nilai yang sama pada masing-masing resistor yaitu $R_f = R_i = R_1 = R_2 = 330 \Omega$, maka nilai tegangan output akan menjadi $V_{out} = V_{sp} - V_{pv}$.

Bagian selanjutnya dari kontrol ini adalah rangkaian *proporsional integral* (PI). Rangkaian ini berfungsi untuk mengolah sinyal *error* yang dihasilkan dari perbedaan nilai *set point* dengan nilai *process variable* (PV) sampai *error* bernilai nol. Berikut gambar desain dari rangkaian PI yang akan dibuat:



Gambar 4. Rangkaian Kontroler PI

Rangkaian di atas akan mendapatkan tegangan *input* dari sinyal *error* yang berasal dari rangkaian *error detector*. Op-amp U4 adalah rangkaian *inverting summer* yang berfungsi untuk menjumlahkan nilai *output* dari masing-masing kontrol *proporsional*, *integral* dan membalikkan tegangan *output* dari masing-masing kontrol, sehingga mendapatkan *output* secara keseluruhan yaitu:

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_i \int_0^t V_{error} dt + V_0 \quad (3.2)$$

Dimana:

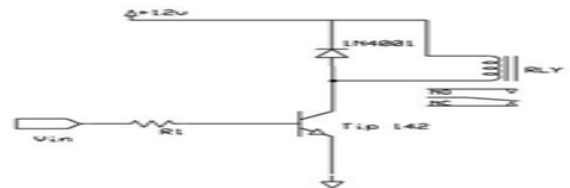
$$K_p = \frac{R_7}{R_5}, \text{proporsional band (gain)}$$

$$K_i = \frac{1}{R_6 \cdot C_i}, \text{integration constant}$$

$$V_0 = \text{offset integrator initial charge}$$

Driver Katup Solenoid

Rangkaian driver berfungsi untuk mengaktifkan katup solenoid dengan memberikan catu daya Ac 220V berdasarkan keluaran dari rangkaian kontrol. Pada rangkaian driver katup solenoid digunakan relay 12 volt yang berfungsi sebagai saklar magnetik. Relay ini akan bekerja jika dihubungkan pada sumber catu daya sebesar 12 volt DC.



Gambar 5. Perencanaan Rangkaian Driver Katup Solenoid

VII. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

Unjuk Kerja Kontrol PI

Kontrol PI merupakan sistem kontrol gabungan dari kontrol proporsional dan sistem kontrol integral, dimana kedua sistem kontrol tersebut disatukan untuk mengontrol sebuah *plant* (katup solenoid). Kinerja yang baik dari sebuah kontrol PI dapat ditunjukkan dengan cara bagaimana sistem kontrol tersebut dapat mengatur *plant* sesuai nilai *set point* dengan *response time* yang lebih cepat



dan mampu mempertahankan posisi *plant* tetap stabil pada nilai *set point* yang telah ditentukan. Sehingga dengan begitu proses pendinginan pada suatu bahan pangan akan lebih cepat dan hasil pendinginnya mempunyai kualitas yang baik.

Kinerja kontrol PI akan didapatkan hasil yang maksimal apabila didapatkan konstanta yang tepat pada masing-masing sistem kontrol yaitu konstanta proporsional (K_p) dan konstanta integral (K_i). Nilai konstanta tersebut pada sistem kontrol PI perlu diatur, karena dengan mengatur nilai konstanta pada masing-masing sistem kontrol yaitu sistem kontrol proporsional dan sistem kontrol integral akan didapatkan hasil pengontrolan yang baik, yaitu *response time* semakin cepat, temperatur pendinginan lebih stabil, dan nilai *error overshoot* dapat dihilangkan (Bashori, 2013).

Proses penentuan nilai konstanta pada sistem kontrol PI pada penelitian ini diperoleh berdasarkan proses perhitungan sesuai persamaan 3.3 dan 3.4 dengan menggunakan metode *Trial and Error*. Metode *Trial and Error* tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai konstanta yang tepat, karena melihat banyaknya nilai konstanta yang dapat diatur pada sistem kontrol yang telah dibuat, serta adanya ciri-ciri dari masing-masing sistem kontrol dalam hal ini adalah sistem kontrol proporsional dan sistem kontrol integral yang perlu dilakukan pertimbangan.

Proses penentuan konstanta proporsional dan integral pada sistem kontrol PI terdiri dari dua langkah percobaan, langkah pertama yang dilakukan adalah dengan mencoba kontrol *proporsional* terlebih dahulu, kemudian proses kedua baru dilakukan pengujian dengan menggunakan kontrol *proporsional dan integral*. Tujuan proses pengujian unjuk kerja kontrol PI dengan melalui dua tahapan tersebut untuk mengetahui bagaimana respons pengontrolan yang dilakukan oleh kontrol *proporsional* sendiri dibandingkan respons pengontrolan yang dilakukan oleh kontrol *proporsional integral*. Tabel 2 dan tabel 3 berikut menunjukkan bagaimana karakteristik respons sistem yang dihasilkan dari kedua proses pengujian.

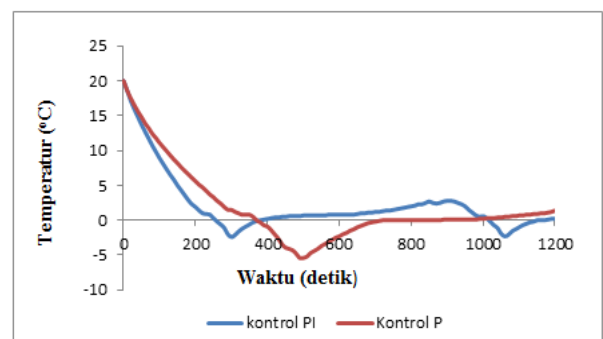
Tabel 2. Karakteristik Respons Sistem Hasil Pengujian Pada Kontrol Proporsional

No	Konstanta K_p	K_i	Rise Time (detik)	Peak Time (detik)	Setting Time (detik)	Maksimum Overshoot (°C)
1	3,02	-	390	550	-	-6,2
2	6,23	-	408	510	-	-4,5
3	10	-	370	490	-	-5,1
4	20	-	370	490	-	-5,0
5	38	-	390	510	-	-5,9

Tabel 3. Karakteristik Respons Sistem Hasil Pengujian Pada Kontrol Proporsional Integral

No	Konstanta K_p	K_i	Rise Time (detik)	Peak Time (detik)	Setting Time (detik)	Maksimum Overshoot (°C)
1	3,02	1	270	330	-	-4,2
2	3,02	5	288	330	1016	-3,5
3	3,02	10	260	350	-	-4,7
4	3,02	25	290	370	-	-4,3
5	6,23	1	315	380	-	-5,2
6	6,23	5	272	360	-	-5,3
7	6,23	10	274	360	-	-4,7
8	6,23	25	235	320	-	-4,8
9	10	1	370	470	-	-4,5
10	10	5	372	450	-	-4,1
11	10	10	335	430	-	-5,0
12	10	25	312	400	-	-5,0
13	20	1	312	410	-	-4,9
14	20	5	252	300	1140	-4,0
15	20	10	251	300	1092	-2,4
16	20	25	272	310	-	-2,1
17	38	1	305	360	874	-5,6
18	38	5	243	300	-	-3,8

Berdasarkan tabel 2 dan tabel 3 dapat diketahui bagaimana karakteristik hasil pengujian kinerja sistem kontrol. Berdasarkan hasil tersebut dengan menggunakan sistem kontrol *proporsional integral* (PI) waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur *set point* (*Rise Time*) lebih cepat dibandingkan hanya menggunakan sistem kontrol *proporsional*. Hal tersebut dapat dilihat bagaimana pada kontrol proporsional waktu tercepat sistem untuk mencapai temperatur *set point* adalah selama 370 detik pada nilai $K_p = 10$, dan 20. Tetapi setelah nilai K_p tersebut dipadukan dengan memasukan nilai K_i ternyata waktu untuk mencapai *set point* relatif lebih cepat, yaitu pada $K_p = 10$ dan $K_i = 25$ waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *set point* adalah selama 312 detik, sedangkan pada nilai $K_p = 20$ dan $K_i = 10$ waktu yang dibutuhkan selama 251 detik. Gambar grafik 9 berikut menunjukkan bagaimana respons sistem yang terjadi ketika menggunakan sistem kontrol PI.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Respons Sistem Antara Kontrol Proporsional dan Kontrol Proporsional Integral



Pada gambar 9 diatas memperlihatkan respons sistem dimana dengan menggunakan sistem kontrol PI dapat mempercepat waktu respons untuk mencapai temperatur *set point*. Respons sistem berdasarkan gambar grafik tersebut merupakan hasil pengujian sistem kontrol dengan nilai $K_p = 20$ dan nilai $K_i = 10$. Nilai K_p tersebut digunakan karena berdasarkan hasil pengujian pada sistem kontrol proporsional sesuai tabel *2 rise time* yang digunakan lebih cepat dengan nilai *maximum overshoot* lebih rendah. Sedangkan pada kontrol proporsional integral diatur nilai $K_i = 10$, karena setelah dilakukan percobaan dengan nilai $K_p = 20$ dan dilakukan penambahan $K_i = 10$ *rise time* berdasarkan tabel 3 dapat lebih dipercepat dan *maximum overshoot* dapat diperkecil sampai $-2,4^\circ\text{C}$.

Respons sistem sesuai gambar grafik diatas terlihat bagaimana proses penurunan temperatur ruang pendingin yang terjadi. Temperatur pendinginan pada ruang pendingin tidak dapat dipertahankan sesuai dengan temperatur *set point* meskipun telah menggunakan sistem kontrol PI. Hal tersebut dapat dilihat bagaimana setelah temperatur pendinginan telah tercapai sesuai batas temperatur yang diinginkan, temperatur pada mesin pendingin masih mengalami penurunan kemudian akan berangsur-angsur naik sampai detik tertentu dan bahkan akan melebihi batas temperatur *set point*. Fenomena proses penurunan temperatur pendinginan sampai dibawah temperatur *set point* yang terjadi pada mesin lempeng sentuh tersebut disebabkan karena proses pengontrolan yang dilakukan oleh *plant* hanya mengatur laju aliran refrigeran yang masuk keruang evaporator, sedangkan mesin pendingin masih dalam keadaan beroperasi (kompresor dalam keadaan menyala). Sehingga hal tersebut akan menyebabkan temperatur pendinginan tetap mengalami penurunan karena masih adanya aliran refrigeran pada ruang evaporator sebagai akibat tetap beroperasinya mesin pendingin meskipun *plant* sudah bekerja, dan ketika refrigeran pada ruang evaporator telah habis diserap oleh kompresor maka ruang evaporator akan mengalami kenaikan yang disebabkan karena temperatur lingkungan lebih tinggi dari temperatur evaporator sedang bahan isolasi dari ruang pendingin tidak mampu mempertahankan temperatur ruangan evaporator tersebut.

Unjuk Kerja Kontrol Katup Ekspansi Otomatis Pada Mesin Pendingin Lempeng Sentuh

Kualitas penggunaan kontrol katup ekspansi otomatis pada mesin pendingin lempeng sentuh, perlu dilakukan pengujian guna menunjukkan kinerja yang dapat dicapai. Dimana proses pengujian unjuk kerja katup dilakukan dengan cara membandingkan penggunaan energi dan hasil pendinginan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi

otomatis dengan menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis.

Menurut KBBI, energi merupakan suatu besaran yang menyatakan kemampuan kerja dari sebuah sistem untuk melakukan berbagai macam proses. Pada mesin pendingin sistem lempeng sentuh besarnya energi ditunjukkan berdasar besarnya daya listrik yang digunakan untuk melakukan proses pendingin selama batas waktu tertentu . Pada tabel 4 berikut ditunjukkan bagaimana pengaruh penggunaan kontrol katup ekspansi otomatis terhadap energi yang digunakan:

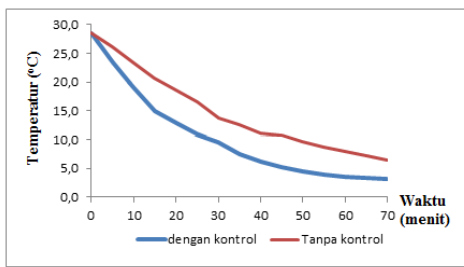
Tabel 4 Pengaruh Penggunaan Kontrol Katup Ekspansi Otomatis Terhadap Penggunaan Energi.

No	Energi Proses Pendinginan (kWh)	
	Dengan Kontrol	Tanpa kontrol
1	0,264	0,208
2	0,270	0,198
3	0,260	0,199
Rata-rata	0,265	0,202

Dari tabel 4 hasil pengujian diatas dapat diketahui kebutuhan energi dalam proses pendinginan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis lebih hemat dibandingkan dengan menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis. Hal tersebut terjadi karena ketika tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis mesin dimatikan langsung sehingga kompresor tidak bekerja, sedangkan ketika menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis yang dikontrol hanya aliran refrigeran yang masuk pada evaporator agar tidak mengalir ketika temperatur pendingin sudah tercapai sesuai temperatur *set point*, dan kompresor masih tetap beroperasi.

Pada saat kompresor pada mesin pendingin masih beroperasi dan katup ekspansi sudah dalam keadaan menutup maka refrigeran pada ruang evaporator akan diisap oleh kompresor. Proses penghisapan refrigeran oleh kompresor akan diikuti dengan penurunan tekanan, maka hal tersebut berakibat terhadap kinerja kompresor akan bertambah besar apabila katup ekspansi sudah dalam keadaan terbuka. Disebabkan karena tekanan yang dibutuhkan untuk mengalirkan refrigeran yang menuju ke evaporator akan lebih besar.

Proses pendinginan merupakan proses penurunan temperatur bahan atau material sesuai batasan tertentu (Rohanah, 2002). Tujuan dari proses pendinginan tersebut untuk mempertahankan kualitas kandungan gizi yang terdapat di dalam sebuah bahan pangan. Gambar 10 berikut menunjukkan bagaimana grafik proses pendinginan ketika menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis.



Gambar10. Grafik Hasil Pendinginan Dengan menggunakan Kontrol Ekspansi Katup Otomatis Dan Tanpa Kontrol Ekspansi Katup Otomatis

Gambar 10 diatas menunjukkan proses pendinginan air sebanyak 570 ml pada mesin pendingin lempeng sentuh. Proses pendinginan air pada mesin pendingin tersebut dilakukan untuk mengetahui bagaimana hasil pendinginan yang dapat dilakukan oleh mesin pendingin lempeng sentuh ketika dioperasikan dengan menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis dan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis. Dari hasil tersebut dapat diperlihatkan bahwa dengan menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis hasil pendinginan air lebih cepat dibandingkan tanpa menggunakan kontrol ekspansi otomatis.

Besarnya nilai *error* atau nilai selisih hasil pendinginan tanpa menggunakan kontrol dan dengan menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis tersebut rata-rata adalah sebesar 66,55%, hasil berikut dapat dilihat sesuai data lampiran 24. Hasil tersebut menunjukkan bagaimana kualitas pendinginan yang dapat dilakukan oleh mesin pendingin lempeng sentuh ketika menggunakan sistem kontrol ekspansi otomatis yaitu hasil pendinginan dapat lebih cepat terjadi dibandingkan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis. Perbandingan hasil pendinginan yang sangat jauh tersebut terjadi karena ketika menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis temperatur evaporator dapat lebih lama dipertahankan pada posisi *set point* sehingga pendinginan lebih stabil dibandingkan dengan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian tersebut dapat ditarik kesimpulan:

1. Hasil perancangan dan pembuatan kontrol katup ekspansi otomatis dengan menggunakan metode kontrol PI dengan nilai $K_p = 20$ dan $K_i = 10$ didapatkan nilai *maximum overshoot* yang lebih rendah yaitu $-2,4^\circ\text{C}$, dan *rise time* selama 251 detik.
2. Penggunaan kontrol katup ekspansi otomatis dengan menggunakan metode kontrol PI pada mesin

pendingin lempeng sentuh mengakibatkan proses pendinginan bahan pangan lebih cepat karena temperatur pendinginan lebih stabil serta energi yang digunakan jauh lebih hemat dibandingkan tanpa menggunakan kontrol katup ekspansi otomatis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Ristek dan Pendidikan Tinggi melalui Penelitian Hibah Bersaing Usulan Tahun 2015.

DAFTAR PUSTAKA

- Bashori, Z., Sumardi, dan I. Setiawan. 2013. "Pengendali Temperatur Pada Plant Electric Furnace Berbasis Sensor Thermocouple Dengan Metode Kontrol PID". *Jurnal Transient*, Vol 2, No. 2. ISSN: 2302-9927,2.
- Budi, W., Wahyudi, dan I. Setiawan. 2011. Teknik Kendali Hibrid Pi Fuzzy Untuk Pengendalian Suhu Zat Cair. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Hamzah, M., S. Budi, dan Sumardi. 2014. "Perancangan Plant Alat Pembuat Sirup Buah Otomatis dengan Kontrol PI Sebagai Pengendali Suhu Cairan Berbasis Atmega16". *Jurnal Transient*, Vol 3, No.4. ISSN : 2302-9927, 665.
- Hidayta, T. 2014. *Analisis Karakteristik Refrigeran Terhadap Konsumsi Energi Listrik Pada Prototipe Sistem Pembeku Air Menggunakan R-134a dan R-290/R-600a*. Sekolah Tinggi Teknologi Bina Tunggal (STTBT) Bekasi- Jawa Barat.
- Kamal, D.M. 2008. *Pemodelan Sistem Pembekuan dengan Suhu Media Pembeku Bertahap pada Proses Pembekuan Daging Sapi Segar Menggunakan Metode Eksergi*. Thesis. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Kurniawa, D. 2008. *Regresi Linier. R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Swain, T.K. 2014. *Analogue Fabrication Of PID Controller*. Thesis. Department Of Electrical Engineering, National Institute Of Technology, Rourkela.