

RANCANG BANGUN SISTEM PEMANAS SUBSTRAT PADA REAKTOR HIDROGEN TERMOFILIK MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC

DESIGNING SUBSTRATE HEATING SYSTEM FOR THERMOPHILIC HYDROGEN REACTOR USING FUZZY LOGIC

Bella Pratiwi

Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

bella.pratiwi@outlook.com

Abstrak

Hidrogen dapat diproduksi dari biomassa dengan proses fermentasi gelap. Fermentasi gelap merupakan cara produksi hidrogen menggunakan bakteri anaerobik, yang tumbuh tanpa cahaya pada substrat kaya karbohidrat dimana siklus hidup bakteri tersebut secara alami memproduksi hidrogen sebagai produk samping dari proses metabolisme. Produksi hidrogen pada proses ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti temperatur. Diketahui bahwa produksi hidrogen pada temperatur termofilik dengan rentang 40 - 65 °C lebih efisien. Produksi hidrogen dengan proses fermentasi gelap di temperatur termofilik membutuhkan sistem pemanas untuk mengatur temperatur substrat pada rentang yang dibutuhkan. Setelah mencapai rentang temperatur termofilik, sistem harus dapat menjaga substrat pada satu nilai temperatur selama proses produksi berlangsung karena fluktuasi 1°C dapat berpengaruh negatif pada produksi hidrogen. Pada penelitian ini, substrat yang digunakan adalah nasi. Untuk mengontrol temperatur substrat, reaktor hidrogen termofilik dilengkapi dengan jaket air panas yang mengelilingi reaktor dan logika fuzzy sebagai sistem kontrol. Logika fuzzy digunakan untuk mengontrol temperatur substrat agar sesuai dengan *set point*. *Set point* temperatur substrat adalah 55°C. Dari percobaan diperoleh sistem pemanas dapat mengkondisikan substrat pada rentang termofilik dan dapat mengontrol temperatur substrat stabil di *set point* dengan rata-rata error 0,0017°C.

Kata kunci: logika fuzzy; temperatur; biomassa; termofilik.

Abstract

Hydrogen can be produced from biomass using dark fermentation process. Dark fermentation is a way to produce hydrogen using anaerobic bacteria, grown in the dark on carbohydrate-rich substrates where their live cycle naturally produce H₂ as metabolism byproduct. It is well known that hydrogen yield is affected by environmental factors such as temperature. It is reported that dark fermentation in thermophilic temperature that range from 40 - 65 °C is more efficient. Hydrogen production using dark fermentation in thermophilic temperature needs a heating system to set substrate at required temperature. After reaching thermophilic temperature, it is also important to keep a constant temperature during the digestion process, as temperature fluctuations of 1°C will affect the biogas production negatively. In this study, rice is used as biomass substrate. To control substrate temperature, thermophilic hydrogen production reactor is equipped with hot water jacket surrounding the reactors and using fuzzy logic as its control system. Fuzzy logic is used to set substrate temperature according to the set point. Substrate temperature set point is 55°C. From experiment, it is known that heating system could set substrate in thermophilic temperature range and able to control substrate temperature in 55°C with error mean 0.017°C.

Keyword: fuzzy logic; temperature; biomass; thermophilic.

1. Pendahuluan

Ketergantungan pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama mengakibatkan perubahan iklim global, kerusakan lingkungan dan masalah kesehatan [1-3]. Sebagai sumber energi terbarukan, hidrogen (H₂) merupakan alternatif menjanjikan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Hidrogen memiliki gravimetri kerapatan energi tertinggi dibandingkan dengan jenis bahan bakar lain dan sesuai untuk proses elektrokimia dan proses pembakaran untuk konversi energi tanpa memproduksi emisi berbasis karbon yang berkontribusi pada pencemaran lingkungan dan perubahan iklim [4-5]. Hidrogen dapat diproduksi dari berbagai cara, salah satunya produksi hidrogen secara biologis (biohidrogen), menggunakan (mikro) organisme menyediakan berbagai macam pendekatan untuk menghasilkan hidrogen, seperti biofotolisis langsung, biofotolisis tidak langsung, foto-fermentasi, dan fermentasi gelap (*dark fermentation*) [2,4].

Fermentasi gelap merupakan cara produksi hidrogen menggunakan bakteri anaerobik, yang tumbuh tanpa cahaya pada substrat kaya karbohidrat dimana siklus hidup bakteri tersebut secara alami memproduksi hidrogen

sebagai produk samping dari proses metabolisme [2,4]. Dilaporkan bahwa produksi hidrogen pada temperatur termofilik dengan rentang 40 - 65°C lebih efisien [6-9]. Produksi hidrogen pada temperatur termofilik secara efektif dapat menghancurkan patogen, memiliki tingkat pertumbuhan bakteri yang lebih tinggi dan HRT yang lebih singkat [10]. Produksi hidrogen menggunakan fermentasi gelap pada temperatur termofilik membutuhkan sistem pemanas untuk mengkondisikan substrat pada temperatur yang dibutuhkan. Setelah mencapai temperatur termofilik, substrat juga perlu dijaga pada satu nilai temperatur konstan selama proses, karena perubahan temperatur atau fluktuasi berpengaruh negatif terhadap produksi biogas. Bakteri termofilik sensitif terhadap fluktuasi temperatur 1°C [10]. Fluktuasi temperatur menyebabkan penurunan drastis laju pertumbuhan bakteri termofilik, dan beresiko membinasakan populasi mikroba.

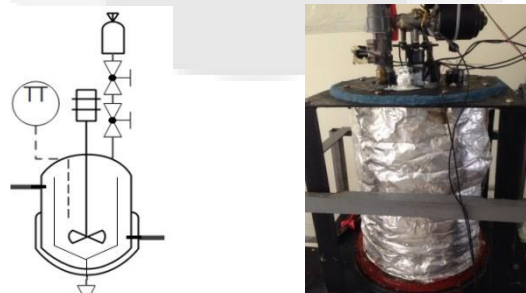
Untuk mengontrol temperatur substrat, reaktor produksi hidrogen termofilik pada tugas akhir ini dilengkapi dengan jaket air panas yang mengelilingi reaktor. Oleh karena itu, kontrol temperatur substrat melibatkan perhitungan konveksi substrat, perpindahan panas dari pemanas elektrik ke air, konveksi air, perpindahan panas dari air ke permukaan reaktor, dan panas yang hilang di sepanjang jalur tersebut. Setiap kali berbagai perhitungan dengan hubungan yang kompleks harus dipertimbangkan, aturan dengan keputusan statis sering gagal [11]. Untuk mengatasi masalah ini, logika fuzzy digunakan sebagai sistem kontrol. Substrat yang digunakan pada proses fermentasi gelap adalah senyawa organik dimana karakteristik termalnya dapat berbeda satu sama lain; bahkan jika menggunakan jenis biomassa yang sama, contoh: nasi. Logika fuzzy dapat mengakomodasi proses konveksi yang terjadi di substrat untuk mentransfer panas tanpa harus membuat model matematis dari sistem tersebut [12]. Dengan menggunakan logika fuzzy juga menghilangkan keharusan menganalisis perpindahan panas dari pemanas elektrik ke air, air ke permukaan reaktor, dan panas yang hilang di sepanjang jalur.

Konsep logika fuzzy diperkenalkan pada tahun 1965 oleh Zadeh [13]. Secara umum, logika fuzzy merupakan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) yang berusaha untuk menyamai proses pengambilan keputusan manusia yang biasanya berdasarkan pada perkiraan dan perbandingan dibandingkan dengan nilai tetap dan tepat [11]. Beberapa alat penting dalam aplikasi teori himpunan fuzzy diantaranya adalah konsep variabel linguistik dan himpunan keanggotaan [12]. Kedua alat tersebut memungkinkan untuk mengontrol suatu sistem menggunakan penalaran deduktif [13]. Gagasan himpunan fuzzy menyediakan pendekatan yang sesuai untuk konstruksi kerangka konseptual [14]. Pada intinya, kerangka seperti ini menyediakan cara alami untuk menangani masalah dimana sumber ketidaktepatan adalah ketiadaan kriteria keanggotaan kelas yang didefinisikan secara rinci dibandingkan dengan kehadiran variabel random [14]. Tugas akhir ini memuat rancangan kontrol logika fuzzy untuk temperatur substrat pada reaktor hidrogen termofilik. Tujuan tugas akhir ini adalah untuk mengimplementasikan logika fuzzy pada proses produksi hidrogen sebagai sistem kontrol temperatur sehingga mampu menciptakan temperatur substrat yang konstan selama proses.

2. Konstruksi Sistem

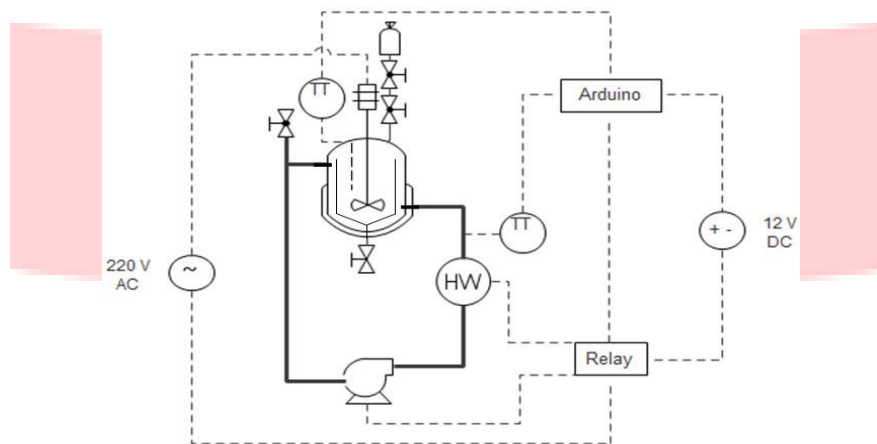
Tugas akhir ini fokus pada perancangan sistem pemanas untuk produksi hidrogen pada temperatur termofilik menggunakan sistem jaket air panas (*hot water jacket*). Sistem pemanas dengan jaket air panas merupakan sistem pemanasan tidak langsung dimana sumber panas berupa elemen pemanas tidak langsung kontak dengan substrat tetapi menggunakan air sebagai media penghantar panas ke substrat. Dengan menggunakan air, seluruh permukaan dalam reaktor bertidak sebagai sumber panas sehingga memaksimalkan permukaan substrat yang terkena sumber panas dan menghasilkan pemanasan substrat yang merata. Penggunaan air juga memungkinkan pengaturan substrat pada seluruh rentang termofilik. Temperatur air dapat diatur hingga mendekati 100°C dan rentang atas termofilik hanya 65°C.

Untuk membuat jaket air panas, reaktor dirancang memiliki permukaan tabung dalam dan tabung luar, dimana di antara kedua permukaan terdapat celah untuk air panas mengalir. Panas akan ditransfer dari air panas ke permukaan tabung dalam, dan dari permukaan tabung bagian dalam, panas akan mengalir ke substrat. Di dalam reaktor terdapat pengaduk substrat untuk memastikan temperatur yang homogen.



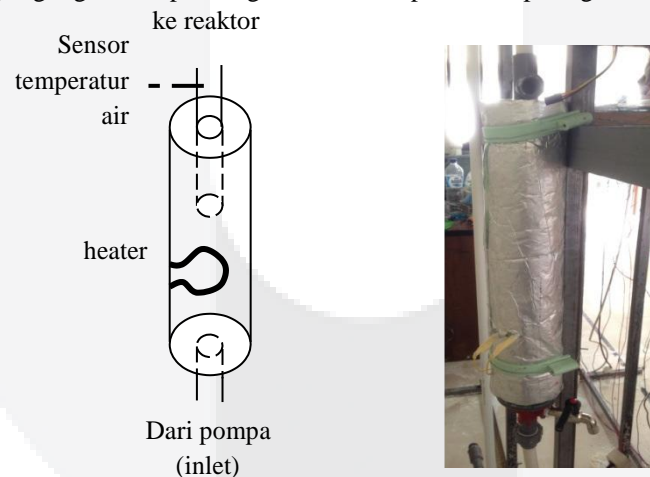
Gambar 1. Ilustrasi reaktor dengan tabung luar dan tabung dalam

Perangkat keras yang digunakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pompa, pemanas elektrik, dan reaktor. Pemanas elektrik digunakan untuk menaikkan temperatur air yang merupakan sumber panas bagi substrat di dalam reaktor. Pompa digunakan untuk mensirkulasikan air panas melewati reaktor. Untuk reaktor sendiri, berfungsi sebagai penampung substrat. Reaktor yang dibangun adalah reaktor anaerob, sehingga saat reaktor dalam kondisi tertutup tidak akan ada gas yang bisa masuk ataupun keluar. Reaktor terbuat dari stainless steel yang merupakan penghantar panas yang baik serta tahan karat. Reaktor didesain tahan karat karena dalam proses produksi hidrogen akan dihasilkan asam laktat dan/atau asam butirat sebagai produk sisa [2]. Reaktor yang dibangun memiliki volume 10 liter karena reaktor ini dibuat untuk produksi hidrogen untuk skala laboratorium.



Gambar 2. Desain Sistem Pemanas Reaktor

Kecepatan pompa air dibiarkan konstan sehingga laju panas dan pertambahan temperatur substrat hanya tergantung pada elemen pemanas. Aktuator pemanas untuk air yang digunakan adalah elemen pemanas yang terbuat dari stainless steel jenis *immersion heater* dengan daya 200 watt. Pemanas jenis ini bisa langsung kontak dengan air dan karena hanya berupa elemen pemanas, kontainer tempat penyimpanan air dapat didesain sendiri sesuai kebutuhan. Kontainer air memiliki tinggi 50 cm dan diameter 10 cm, sehingga dapat menampung 3,9 liter air. Ilustrasi pemanas yang digunakan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Desain kontainer air dengan pemanas elektrik

3. Substrat

Substrat yang digunakan pada tugas akhir ini adalah nasi. Nasi dipilih karena kaya akan karbohidrat yang merupakan senyawa yang dibutuhkan dalam produksi hidrogen. Kandungan karbohidrat dalam nasi mencapai 90% [14]. Sebelum masuk ke dalam reaktor, nasi terlebih dahulu dicampur dengan air menggunakan *blender* dengan perbandingan 1 kg nasi : 1 liter air (1 liter air = 0,984 kg) sehingga bentuk akhir substrat akan menjadi bubur kental. Substrat berbentuk bubur kental ini lah yang akan dimasukkan ke dalam reaktor untuk diatur temperaturnya.

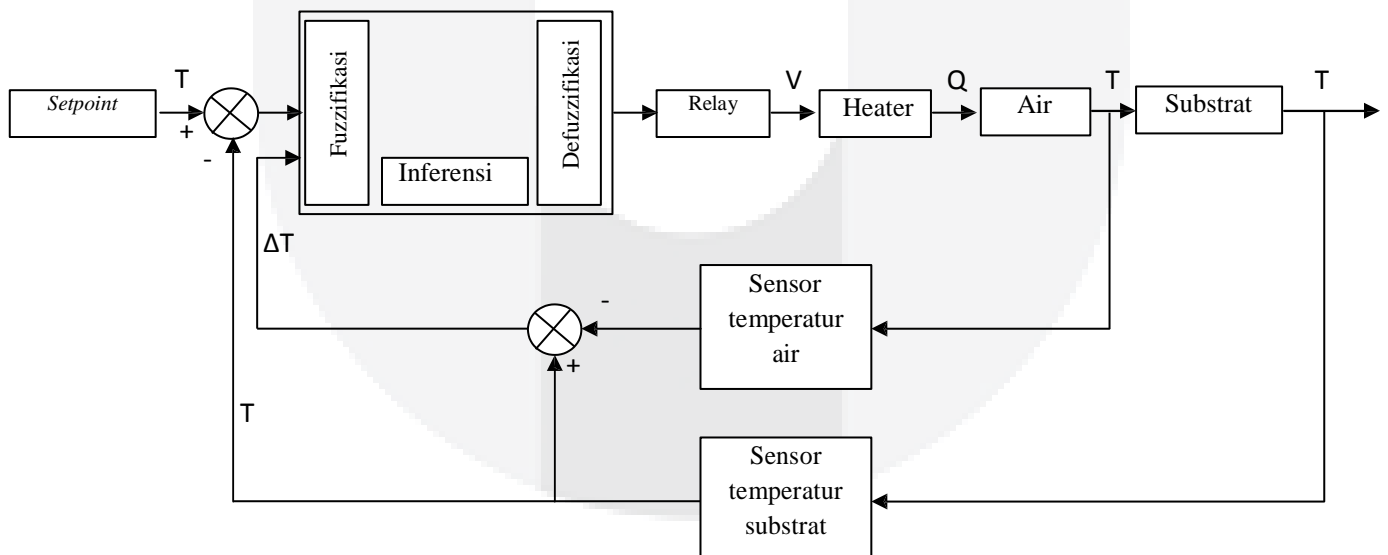
4. Sistem Kontrol

Secara umum terdapat tiga bagian pada logika fuzzy, yaitu fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Hardware seperti sensor menghasilkan data *crisp* dan deterministik. Hal ini bertentangan dengan masukan yang diperlukan oleh fuzzy yang menggunakan variabel linguistik. Untuk mengkonversi masukan yang berupa data deterministik menjadi fuzzy, sebuah proses bernama fuzzifikasi digunakan [13]. Proses fuzzifikasi membutuhkan fungsi keanggotaan (*membership function*). Semua informasi dalam suatu himpunan fuzzy dijelaskan oleh fungsi keanggotaannya. Fungsi keanggotaan didefinisikan sebagai wilayah yang mengkarakterisasi data deterministik ke dalam keanggotaan kosong sampai penuh pada suatu himpunan. Setelah mengubah setiap data deterministik, lalu nilai keanggotaannya digunakan dalam proses inferensi.

Inferensi adalah proses pengambilan keputusan dari aturan-aturan yang ditetapkan untuk sistem [13]. Proses inferensi ini menghasilkan keluaran berupa variabel linguistik dan nilai keanggotaan. Nilai keanggotaan tidak dapat dijadikan keluaran langsung ke peralatan elektrik karena perangkat elektrik tidak mengerti variabel linguistik. Satu proses tambahan dibutuhkan sebelum menerapkan sistem kontrol fuzzy, yaitu defuzzifikasi. Defuzzifikasi adalah proses untuk mengkonversi kembali hasil fuzzy ke dalam bentuk *crisp* [13]. Hasil *crisp* ini yang nantinya bertindak sebagai keluaran ke aktuator.

Parameter yang dikontrol pada tugas akhir ini adalah lama waktu pemanas elektrik mati. Pemanas elektrik diatur untuk selalu hidup dalam keadaan normal. Berapa lama pemanas elektrik mati akan ditentukan sesuai dengan penalaran dari logika fuzzy berdasarkan pada temperatur substrat dan selisih temperatur substrat dengan air. Untuk membuat pemanas elektrik mati dan hidup, aktuator yang digunakan adalah relay dan arduino. Arduino akan diprogram dengan logika fuzzy. Arduino akan memberikan catuan ke relay yang akan menentukan apakah pemanas elektrik akan menyala atau tidak. Sistem pemanas reaktor berkerja sebagai berikut:

- Menentukan *set point*. *Set point* dapat diatur secara manual dalam rentang 40 - 65 °C melalui program di Arduino.
- Mengukur temperatur substrat dan air.
- Menkonversi nilai temperatur substrat dan air menjadi nilai keanggotaan menggunakan fuzzifikasi.
- Menentukan aturan yang sesuai untuk nilai keanggotaan temperatur substrat dan air.
- Inferensi menentukan berapa lama waktu pemanas elektrik mati.
- Defuzzifikasi untuk mengkonversi hasil fuzzy yang masih berupa nilai keanggotaan menjadi lama waktu dalam menit.
- Arduino memberikan sinyal tegangan ke relay. Saat diberi tegangan 5 V pemanas elektrik dan pompa hidup dan sebaliknya saat diberi tegangan 0 V pemanas elektrik dan pompa mati.
- Pemanas elektrik memanaskan air, lalu air mentransfer panas ke substrat.

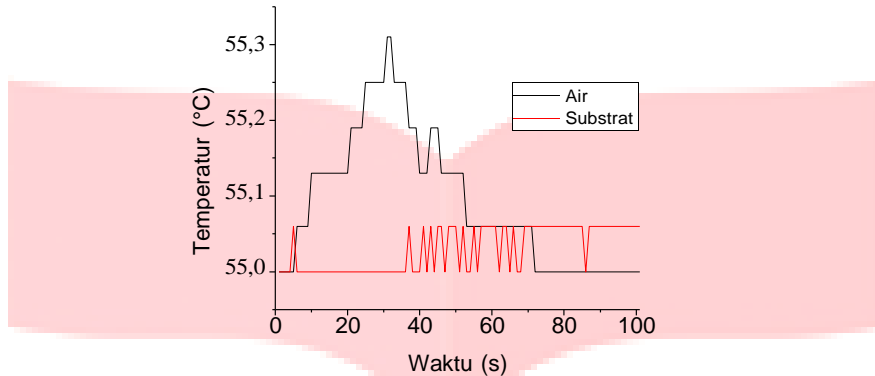


Gambar 4. Diagram blok kontrol temperatur

Pada tugas akhir ini, terdapat dua fungsi keanggotaan yang digunakan sebagai masukan sistem, yaitu temperatur substrat dan selisih temperatur substrat dengan air. Untuk menciptakan temperatur substrat yang konstan, nilai temperatur substrat sendiri dan selisih temperatur air dan substrat sebagai sumber panas merupakan dua variabel yang menentukan keluaran. Terdapat empat himpunan untuk fungsi keanggotaan

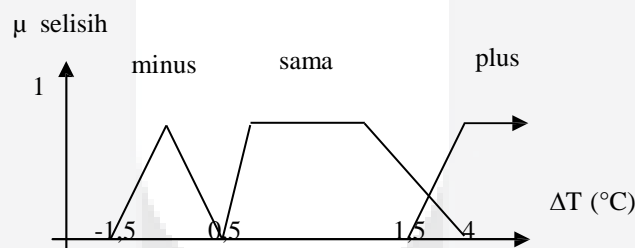
temperatur substrat, yaitu dingin, hangat, sedang, dan panas. Untuk fungsi keanggotaan selisih temperatur substrat dan air terdapat tiga himpunan yang terdiri dari minus, sama, dan plus. Fungsi keanggotaan ini digunakan untuk proses fuzzifikasi.

Fuzzifikasi mengkonversi data temperatur dari sensor menjadi nilai keanggotaan dengan rentang dari 0 sampai 1. Untuk membuat fungsi keanggotaan untuk setiap masukan, data yang menggambarkan hubungan antara temperatur air dan substrat yang ditunjukkan pada gambar 5 digunakan sebagai dasar.



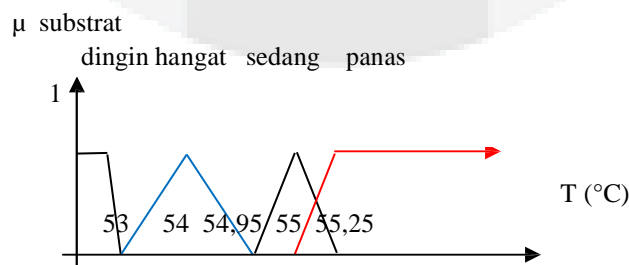
Gambar 5. Pengaruh temperatur air terhadap substrat

Dari gambar 5 terlihat bahwa saat temperatur air lebih tinggi $0,3^{\circ}\text{C}$ diatas temperatur substrat terlihat terjadi kenaikan pada temperatur substrat. Jika suhu air sama dengan atau dibawah temperatur substrat maka akan mengakibatkan penurunan temperatur substrat. Dari data ini dibuat fungsi keanggotaan untuk masukan sistem berupa selisih temperatur substrat dengan air seperti terlihat pada gambar 6. Pertambahan temperatur pada substrat terjadi saat selisih temperatur termasuk dalam himpunan sama atau plus. Batas bawah himpunan sama diatur $0,5^{\circ}\text{C}$. Walaupun temperatur substrat mulai mengalami kenaikan saat dihadapkan dengan selisih temperatur minimal $0,3^{\circ}\text{C}$, tetapi saat pemanas mati temperatur air akan mulai turun. Untuk memastikan tetap terjadi kenaikan temperatur substrat maka batas bawah himpunan sama diatur $0,5^{\circ}\text{C}$, dengan $0,2^{\circ}\text{C}$ sebagai kompensasi penurunan temperatur air saat pemanas mati. Batas bawah keanggotaan himpunan minus diatur $-1,5^{\circ}\text{C}$ untuk menjaga agar temperatur air tidak jauh dibawah temperatur substrat karena pemanas membutuhkan waktu untuk kembali menaikkan temperatur air.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan selisih temperatur substrat dan air

Default *setpoint* substrat adalah 55°C sehingga fungsi keanggotaan temperatur substrat dapat terlihat pada gambar 7. Fungsi keanggotaan sedang pada substrat dibuat tidak lebih dari $0,25^{\circ}\text{C}$ dari *set point* karena target hasil kontrol ingin menjaga agar fluktuasi temperatur substrat tidak melebihi 1°C . Setelah temperatur substrat $\geq 55^{\circ}\text{C}$, substrat masuk ke dalam himpunan panas yang menandakan untuk mulai menghentikan proses pemanasan. Selain itu, terdapat pula himpunan hangat pada substrat untuk menjaga agar tidak terjadi *overshoot*. Saat substrat ada pada rentang hangat, selisih temperatur substrat dengan air dijaga untuk tidak melebihi $1,5^{\circ}\text{C}$.

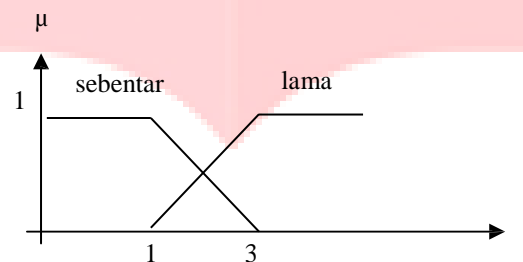


Gambar 7. Fungsi keanggotaan temperatur substrat

Tahap kedua berupa inferensi atau penarikan kesimpulan sesuai dengan peraturan-peraturan yang telah ditetapkan. Terdapat 6 peraturan yang ditetapkan untuk program ini, yaitu:

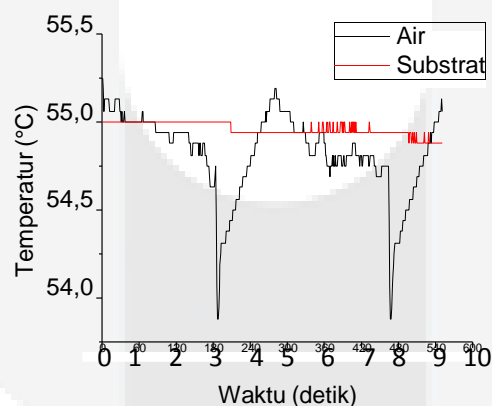
1. Jika substrat **hangat** dan temperatur air lebih panas (**plus**), maka pemanas mati **sementar**.
2. Jika substrat **sedang** dan temperatur air **sama**, maka pemanas mati **sementar**.
3. Jika substrat **sedang** dan temperatur air lebih panas (**plus**), maka pemanas mati **sementar**.
4. Jika substrat **panas** dan air lebih dingin (**minus**), maka pemanas mati **sementar**.
5. Jika substrat **panas** dan suhu air **sama**, maka pemanas mati **lama**.
6. Jika substrat **panas** dan suhu air lebih panas (**plus**), maka pemanas mati **lama**.

Dapat dilihat dari gambar 5 bahwa substrat memiliki waktu delay sehingga temperatur substrat tidak akan langsung turun atau naik begitu dihadapkan dengan perbedaan temperatur. Keluaran dari sistem ini adalah lama waktu untuk pemanas elektrik mati. Ada dua fungsi keanggotaan yang digunakan sebagai keluaran kontrol, yaitu pemanas elektrik mati sebentar dan lama. Fungsi keanggotaan sebentar diatur 1 menit karena begitu pemanas elektrik mati selama 1 menit temperatur air akan turun sekitar 0,5°C. Agar temperatur substrat tidak ikut turun, maka setelah 1 menit pemanas elektrik harus dihidupkan kembali untuk menaikkan temperatur air.



Gambar 8. Fungsi keanggotaan keluaran sistem (dalam menit)

Sedangkan untuk fungsi keanggotaan lama, pemanas elektrik diatur mati selama 3 menit karena inferensi yang menghasilkan keluaran lama terjadi saat substrat melebihi *setpoint*. Temperatur air perlu menjadi lebih dingin dibanding substrat agar panas dari substrat mengalir ke air dan menyebabkan temperatur substrat turun. Temperatur air lebih cepat turun dibandingkan dengan substrat dan pemanas elektrik membutuhkan waktu untuk kembali menaikkan temperatur air. Lama waktu 3 menit dipilih agar temperatur substrat nantinya tidak akan jauh dibawah *setpoint*. Dapat dilihat dari gambar 9, saat pemanas mati selama 3 menit temperatur air akan turun lebih dari 1°C dan menyebabkan temperatur substrat ikut turun.



Gambar 9. Pengaruh pemanas mati selama 3 menit terhadap substrat

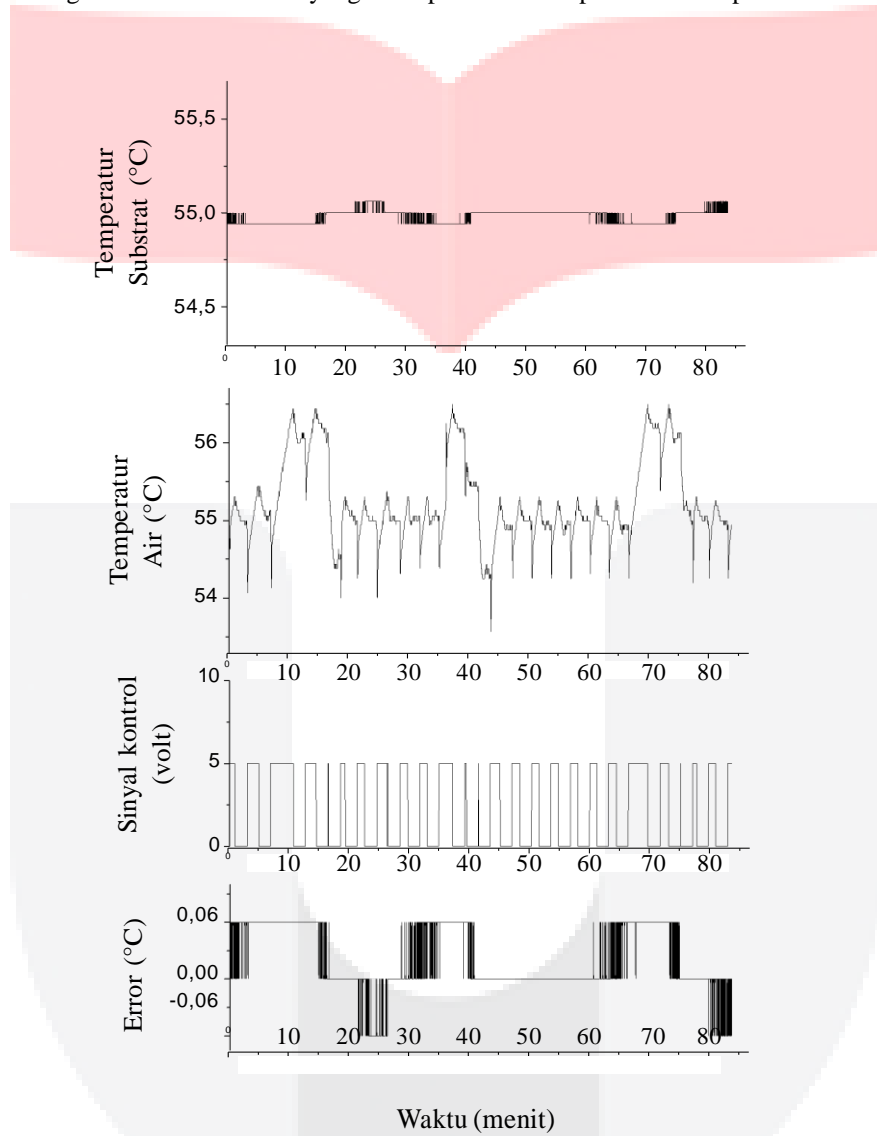
Setelah inferensi selesai, didapatkan hasil berupa informasi lama waktu pemanas mati dalam derajat keanggotaan. Untuk merubah informasi ini menjadi angka pasti dalam menit dibutuhkan proses defuzzifikasi. Aturan defuzzifikasi yang digunakan adalah aturan Mamdani dengan metode *center of area* (COA).

$$\text{Lama pemanas mati} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot \mu(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (3)$$

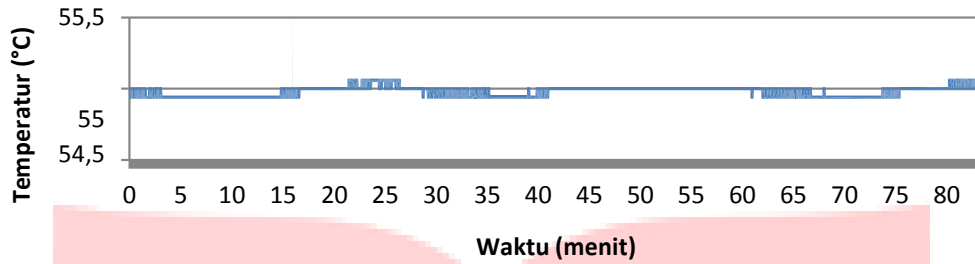
Dimana z adalah lama waktu pemanas elektrik mati menurut hasil inferensi setiap aturan dan $\mu(z)$ adalah nilai keanggotaannya.

5. Hasil Kontrol

Bakteri termofilik rentan terhadap fluktuasi temperatur, sehingga penting untuk membuat kontrol yang dapat menjaga temperatur dengan error maksimal $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dari *set point*. Setelah mengerjakan bagian perangkat keras (membangun reaktor dan pemanas dengan kontainernya, memasang pompa), membuat rangkaian elektrik sistem, dan implementasi program, didapatkan data temperatur substrat seperti terlihat pada grafik di gambar 10. Temperatur diatur agar konstan di 55°C yang merupakan suhu optimal untuk produksi hidrogen pada suhu termofilik.



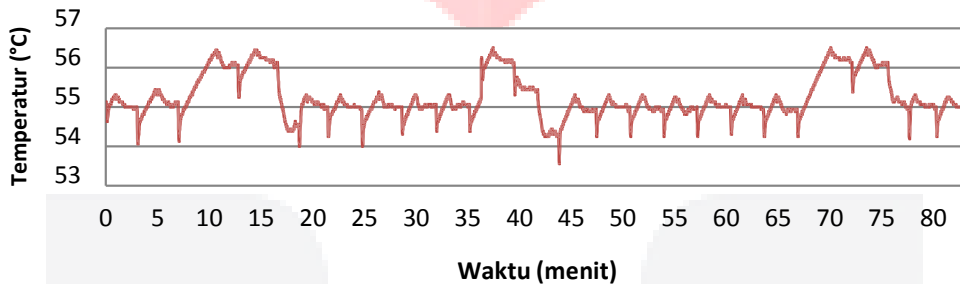
Hasil Kontrol Substrat



Gambar 10. Grafik hasil kontrol temperatur substrat terhadap waktu

Dapat terlihat bahwa sistem pemanas dapat menjaga temperatur substrat pada 55°C dengan deviasi kurang dari 0,5°C.

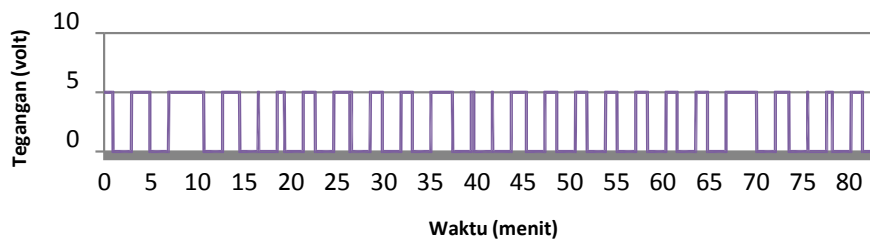
Temperatur Air Selama Proses



Gambar 11. Grafik temperatur air terhadap waktu selama proses kontrol

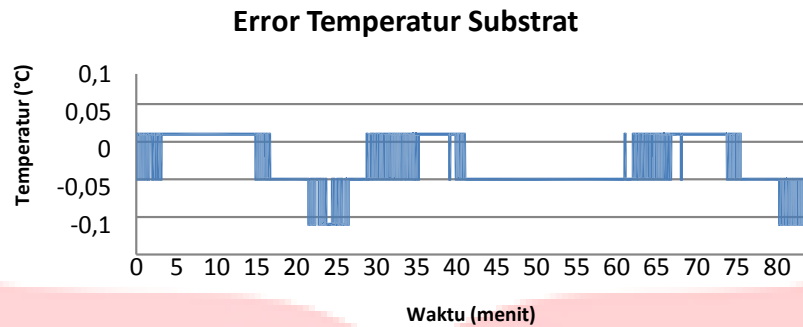
Gambar 12 memperlihatkan sinyal kontrol dari arduino ke relay yang menandakan kapan pemanas elektrik dan pompa bekerja. Relay yang digunakan adalah *normally open*. Jadi saat tidak diberikan tegangan oleh arduino, pompa dan pemanas elektrik akan mati. Sebaliknya, saat diberikan tegangan 5 volt maka pemanas elektrik dan pompa akan bekerja.

Sinyal Kontrol dari Arduino ke Relay



Gambar 12. Grafik sinyal kontrol arduino ke relay

Gambar 13 menunjukkan error temperatur substrat dari *setpoint*. Nilai error didapatkan dengan mencari selisih antara *setpoint* dengan temperatur aktual substrat. Rata-rata error adalah 0,017°C dan dari gambar 13 terlihat bahwa error maksimal adalah 0,06°C.



Gambar 13. Grafik Nilai Error Temperatur Substrat

6. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa pemanasan substrat dengan jaket air panas menyebabkan seluruh permukaan dalam reaktor bertindak sebagai sumber panas untuk substrat. Dengan menggunakan logika fuzzy, sistem pemanas dapat mengontrol temperatur substrat sesuai *set point* yang ditentukan. Sistem pemanas pada tugas akhir ini dapat mengontrol temperatur substrat pada *set point* 55°C dengan deviasi maksimal 0,6°C dari *set point* dan rata-rata error 0,017°C. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat meneruskan penelitian ini sampai bisa menghasilkan hidrogen dari proses *dark fermentation* pada rentang termofilik.

Daftar Pustaka:

- [1] Bockris JO'M. The origin of ideas on a hydrogen economy and its solution to the decay of the environment. *Int J Hydrogen Energy* 2002; 27: 731-40
- [2] Kirtay, Elif. (2010). *Recent advances in production of hydrogen from biomass*. ELSEVIER.
- [3] Chun, Feng Chu. (2008). *A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste*. ELSEVIER.
- [4] Levin, David B. (2003). Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. ELSEVIER.
- [5] Sudrajat, Ir. Ajat & Eddy Ariffin Dipl.-Ing., *Manfaat Gas HHO Kesejahteraan Masyarakat*. Makalah penelitian. Fakultas Teknik Universitas Nasional, Jakarta.
- [6] Mohan SV, Bhaskar YV, Sarma PN. Biohydrogen production from chemical wastewater treatment in biofilm configured reactor operated in periodic discontinuous batch mode by selectively enriched anaerobic mixed consortia. *Water Res* 2007;41:2652-64.
- [7] Demirbas A. Production of combustible gas from triglycerides via pyrolysis. *Energy Source A* 2009;31:870-5.
- [8] Demirbas MF, Balat M, Balat H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Convers Manage* 2009;50:1746-60.
- [9] Tuncel F, Gercel HF. Production and characterization of pyrolysis oils from *Euphorbia macroclada*. *Energy Source A* 2004;26:761-70.
- [10] Al Seadi, Teodorita. (2008). *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark.
- [11] Zadeh, Lotfi A. 1965. *Fuzzy sets*. ELSEVIER.
- [12] Kosko, B (June 1, 1994). *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic*. Hyperion.
- [13] Suhardjo. 1992. Prinsip-prinsip ilmu gizi. Kanisius, Yogyakarta.
- [14] Polesi, Luis F. 2015. Physicochemical and structural characteristics of rice starch modified by irradiation. ELSEVIER.
- [15] Arduino Uno. [Online] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> [Accessed 16 June 2014]
- [16] Hans Luijten. How to measure temperature with your Arduino and a DS18B20. [Online] Available at: <http://www.tweaking4all.com/hardware/arduino/arduino-ds18b20-temperature-sensor/> [Accessed 07 January 2015]
- [17] Relays, The electromechanical amplifier. [Online] Available at: <http://www.globlab.com/relays/relays.html> [Accessed 30 March 2015]