

# RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING KONDISI OPERASI BIOREAKTOR ANAEROB KONTINYU DENGAN ALGORITMA *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS*

Reni Puspitasari, Katherin Indriawati, ST,MT.<sup>1)</sup>

1) Department of Engineering Physics, Faculty of Industrial Technology ITS Surabaya Indonesia 60111, email: reni.phus@gmail.com

## Abstract

Bioreaktor anaerob kontinyu merupakan sistem untuk mendegradasi limbah menjadi senyawa metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dengan memanfaatkan aktifitas dari mikroorganisme pada lingkungan tanpa udara (anaerob) yang terjadi secara terus menerus. Pada bioreaktor kontinyu, pemberian nutrisi dan pengeluaran *effluent* dari tabung terjadi secara terus menerus. Dengan metode kontinyu memungkinkan organisme tumbuh pada kondisi setimbang (*steady state*), dimana pertumbuhan terjadi pada laju konstan dan lingkungan stabil. Sistem monitoring sangat penting untuk dilakukan, karena sifat dari bioreaktor yang sangat rentan dengan perubahan seperti konsentrasi substrat, pH, dan temperatur. Pada penelitian ini variabel yang dimonitor adalah pH dan laju aliran gas. Sensor pH yang digunakan adalah Lutron PE-03, dan sensor untuk laju biogas adalah potensiometer yang dikonversikan dari pengukuran jarak ke laju aliran. Dalam penelitian ini, telah dilakukan system monitoring dengan metode *Pincipal Component Analysis* (PCA) untuk memonitor beberapa mode keadaan yang terjadi pada bioreaktor anaerob. *Pincipal Component Analysis* (PCA) merupakan metode yang digunakan untuk mereduksi data multivariate menjadi variabel baru. Dari variabel baru tersebut dapat digunakan peta kendali hotelling  $T^2$  untuk mengetahui bioreaktor dalam kondisi tertentu, kemudian digunakan logika *fuzzy* untuk menentukan keadaan yang terjadi melalui nilai  $T^2$  pada masing - masing keadaan.

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa hasil monitoring pada bioreaktor menunjukkan sistem monitoring mampu mendeteksi tiga keadaan yang terjadi pada bioreaktor yaitu keadaan normal, *overload* dan *underload*. Pada kondisi normal pemberian substrat dilakukan 3 liter per hari dan laju substrat 105.8831 ml/jam.

Kata Kunci : Bioreaktor, PCA, Hotelling, Fuzzy

## I. PENDAHULUAN

**B**ioreaktor anaerob merupakan suatu proses biologi yang mengubah *substrat* atau sampah organik menjadi gas metan ( $\text{CH}_4$ ) dan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ). Bioreaktor sangat rentan terhadap fluktuasi substrat, perubahan temperatur dan pH [1]. Variabel-variabel itu berpengaruh terhadap kelangsungan dari mikroorganisme. Bila variabel-variabel tersebut tidak dijaga kestabilannya akan mengakibatkan kematian dari mikroorganisme dan lama kelamaan mikroorganisme dalam reaktor tersebut mati secara total dan bioreaktor tidak dapat diolah lagi, peristiwa itu disebut *wash out* (pencucian) dan waktu *recovery* untuk kejadian itu membutuhkan waktu yang lama.

Salah satu cara untuk menghindari keadaan *wash out* adalah melakukan monitoring variabel - variabel pada bioreaktor agar dapat diketahui keadaan di bioreaktor dan dapat dilakukan aksi selanjutnya yang tepat. Dengan demikian bioreaktor tetap stabil dan menghasilkan biogas

secara optimal. Variabel yang berpengaruh terhadap kondisi proses diantaranya adalah pH, laju aliran biogas, konsentrasi substrat, temperature, [2]. Variable-variabel tersebut dapat menyebabkan beberapa keadaan yaitu kondisi normal, *overload* (kelebihan makanan), dan *underload* (kekurangan makanan).

Laju aliran biogas dapat bertambah jika jumlah *volatile fatty acid* yang masuk ke plant bioreaktor anaerob meningkat [3]. Namun peningkatan *volatile fatty acid* dapat menyebabkan kondisi pH menjadi turun. Penurunan pH dapat menyebabkan pertumbuhan bakteri terhambat dan produksi biogas juga semakin sedikit.

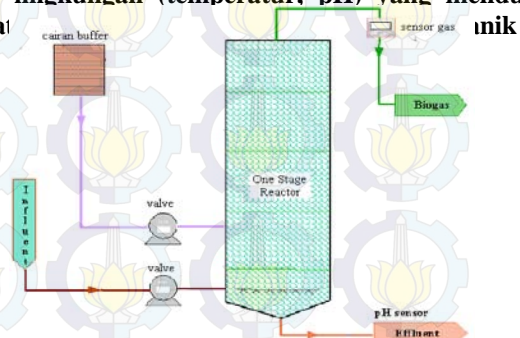
Banyaknya variabel yang berpengaruh tersebut menjadikan bioreaktor sulit untuk dikendalikan maupun dimonitor. Salah satu cara untuk mengatasi masalah multivariabel tersebut digunakan metode *Multivariate Statistical Process Control* (MSPC). Metode MSPC berfungsi untuk merubah dari informasi yang multidimensional menjadi beberapa pokok informasi yang dapat menjelaskan variasi - variasi dari informasi. Sedangkan untuk mereduksi multi variabel menjadi beberapa variabel utama dapat digunakan metode yang sering digunakan, yaitu *Principal Component Analysis* (PCA). Metode PCA berfungsi untuk mendiagnosa keadaan dan perilaku dari bioreaktor anaerob [4].

## II. DASAR TEORI

Bagian ini berisi tentang teori atau pustaka yang mendukung riset/penelitian.

### A. Bioreaktor Anaerob

Bioreaktor anaerob merupakan tangki untuk mendegradasi limbah menjadi senyawa metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dengan memanfaatkan aktifitas dari mikroorganisme pada lingkungan tanpa udara (anaerob). Mikroorganisme dapat tumbuh dengan mengkonsumsi nutrisi atau substrat yang tersedia, pada kondisi lingkungan (temperatur, pH) yang mendukung. Substrat



Gambar 2.1 Bioreaktor anaerob [6]

Pada bioreaktor *anaerob*, *substrat* yang masuk berupa limbah organik yang merupakan nutrisi bagi mikro-organisme untuk tumbuh dan berkembang pada kondisi lingkungan yang mendukung. Mikro-organisme hidup berkelompok dan menempati sel sel yang disebut biomassa. Bioreaktor sangat peka terhadap konsentrasi *substrat* yang masuk secara berlebihan dalam reaktor, karena dapat memprovokasi kematian mikro organisme [7]. Apabila terjadi dalam waktu yang lama maka dapat terjadi proses pencucian mikro-organisme, efek ini disebut *washout*.

### B. Principal Component Analysis

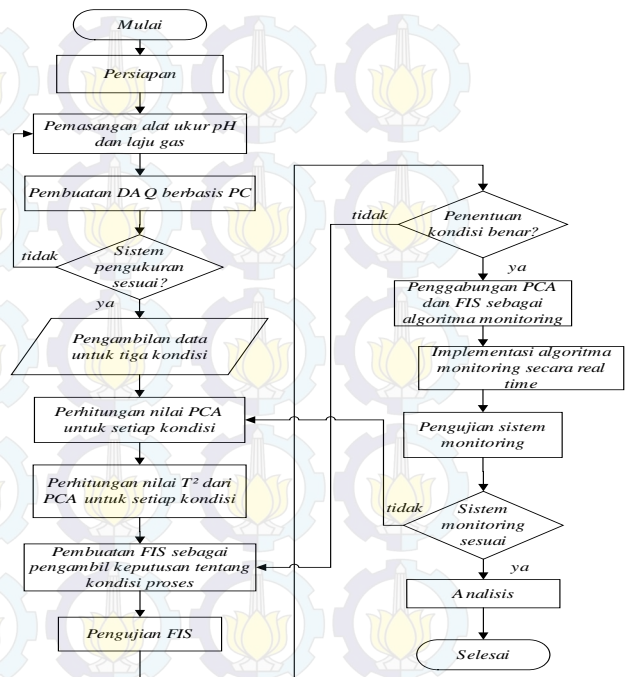
*Principal component analysis* merupakan salah satu metode dari MSPC yang berfungsi sebagai analisa dari beberapa variabel yang bersifat multikolinearitas. Multikolinearitas ini dalam beberapa masalah dapat menyebabkan uji T menjadi tidak signifikan padahal jika masing-masing variabel bebas diregresikan secara terpisah dengan variabel tak bebas (*simple regression*) uji T menunjukkan hasil yang signifikan. Hal tersebutlah yang menjadi masalah karena hasil analisis yang dilakukan pada regresi berganda dan regresi sederhana tidaklah sejalan atau bahkan sangat bertentangan. Untuk itulah digunakan *principal component analysis* yang untuk meminimumkan masalah multikolinearitas tanpa harus mengeluarkan variabel bebas yang terlibat hubungan kolinear.

Prosedur PCA pada dasarnya adalah bertujuan untuk menyederhanakan variabel yang diamati dengan cara menyusutkan (mereduksi) dimensinya. Hal ini dilakukan dengan cara menghilangkan korelasi diantara variabel bebas melalui transformasi variabel bebas asal ke variabel baru yang tidak berkorelasi sama sekali atau yang biasa disebut dengan *principal component*. Setelah beberapa komponen hasil PCA yang bebas multikolinearitas diperoleh, maka komponen-komponen tersebut menjadi variabel bebas baru yang akan diregresikan atau dianalisa pengaruhnya terhadap variabel tak bebas dengan menggunakan analisis regresi.

*Principal Component Analysis* mengubah kumpulan variabel awal ke dalam kumpulan variabel (komponen) yang lebih kecil yang merupakan kombinasi linier variabel awal.  $PC_1$  (*principal component 1*) menjelaskan variansi data terbanyak, disusul dengan  $PC_2$  dan seterusnya sampai  $PC_n$  sehingga jumlah variansi yang dijelaskan oleh semua  $PC = 100\%$  ( $\sum PC = 100\%$ ) dan  $n =$  jumlah variabel.

## III. METODE

Pengerjaan Tugas Akhir dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut dalam diagram alir.



Gambar 3.2 Diagram alir perancangan sistem monitoring

Pada penelitian ini langkah-langkah yang dilakukan untuk perancangan sistem monitoring seperti yang ditunjukkan pada diagram alir pada gambar 3.2. Langkah – langkah yang dilakukan yaitu:

### 3.2 Pembuatan Sistem Pengukuran

Setelah biomassa dapat berkembang biak dan menghasilkan biogas secara kontinyu dan stabil, dipasang sensor pH dan sensor laju gas.

#### A. Pengukuran laju gas

Pada tugas akhir ini sensor aliran gas yang digunakan adalah potensiometer yang dihubungkan dengan pelampung sebagai sensor level. Sensor ini akan mengalami perubahan hambatan jika terjadi perubahan jarak, sehingga dapat merubah tegangan input. Sensor ini akan digunakan sebagai sensor laju aliran dari biogas yang dihasilkan oleh bioreaktor.

Biogas yang dihasilkan oleh bioreaktor akan masuk dalam gas kolektor melewati selang, dan mendorong air didalam gas kolektor turun. Air didalam gas kolektor yang turun akan menambah volume air di bak penampung, sehingga tinggi permukaan air akan naik. Pelampung akan naik ke atas seiring dengan bertambahnya air di bak penampung.

Dengan menggunakan sensor potensiometer, jarak permukaan air yang terukur akan dibandingkan dengan jarak permukaan air pada waktu sampel sebelumnya. Dari dua data jarak permukaan air tersebut dapat diketahui selisih dari jarak permukaan air (Dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Dimana :  $Q$  = debit = laju volume (ml/jam)  
 $\Delta V$  = volume gas kolektor (ml)

- $\Delta t$  = waktu sampel (jam)  
 $\Delta X$  = selisih jarak (cm)  
 $A$  = luasan penampung air ( $cm^2$ )

Ukuran dari bak penampung adalah 14,4 cm x 14,9 cm x 20 cm, dimana nilai dari A dari persamaan 3.4 adalah  $A=14,4cm \times 14,9cm = 214,56 cm^2$ . Sedangkan untuk  $\Delta X$  merupakan selisih ketinggian permukaan air akibat bertambahnya volume bak penampung. Bak penampung akan menerima air dari dalam gas kolektor karena desakan dari biogas yang dihasilkan bioreactor [11]. Dengan membandingkan selisih volume bak penampung dengan volume gas kolektor dapat diketahui error pembacaan sensor terhadap volume dari gelas ukur.

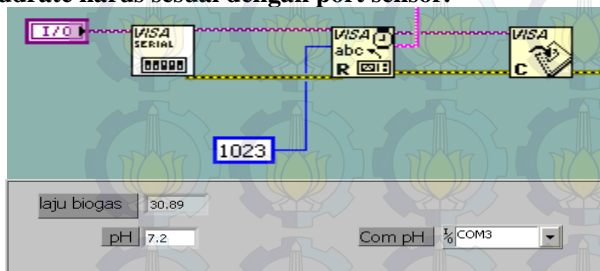
### B. Pengukuran pH

Sensor pH yang digunakan adalah probe PE-03. Pada uji sensor pH ini dimulai dari pembacaan nilai pH dengan menggunakan beberapa sampel pH untuk pengambilan data. Dalam pengambilan data dan pengujian sensor pH sensor memiliki *time delay* 10 detik. Pada pengambilan data semua sampel teruji dengan baik. Untuk mengetahui hasil pengukuran sensor dihubungkan dengan pH meter YK-2001PH.

### 3.3 Pembuatan Algoritma Monitoring

Pengambilan data dua variabel yang berupa pH dan laju aliran gas akan diolah menjadi komponen utama dengan *principle component analysis*. Kemudian selanjutnya dari komponen utama didapatkan nilai Hottelling  $T^2$ . Untuk menentukan keadaan bioreaktor tersebut selanjutnya digunakan logika *fuzzy* hingga mendapat tiga mode keadaan yaitu normal, *overload* dan *underload*.

Software yang digunakan dalam penelitian bioreaktor anaerob ini adalah Labview 2009. Maka sebagai komunikasi untuk mengirimkan dan menerima data antara software ke hardware digunakan port yang terdapat pada tool Labview sendiri yaitu dengan menggunakan port visa. Yang harus diperhatikan dalam komunikasi adalah port visa harus sesuai dengan input yang dimasukkan karena input lebih dari satu, dan boudrate harus sesuai dengan port sensor.



Gambar 3.6 Gambar port visa pH dan com pH

Komunikasi untuk sensor laju aliran biogas menggunakan data acquisition (DAQ) Labview PCI 6221. Gambar 3.7 adalah DAQ assistant yang terdapat pada tools Labview yang digunakan untuk komunikasi data dari sensor potensiometer.

### A. Pembuatan Principal Component Analysis (PCA)

Data monitoring yang dihasilkan dari simulasi bioreaktor anaerob dibentuk matrik dua dimensi yakni laju biogas dan pH, kemudian untuk menyederhanakannya digunakan *principal component analysis* sehingga didapatkan data dalam bentuk dua dimensi. Data tersebut disusun dalam bentuk matriks, untuk  $i$  bioreaktor anaerob,  $j$  variabel pengukuran (biogas, pH) pada waktu ke  $k$  ( $k=21$ ). Untuk  $i = 1$ , maka matriks  $X_{i,j}$  adalah:

$$X_{i,j} = \begin{bmatrix} x_1 & pH_1 \\ x_2 & pH_2 \\ x_3 & pH_3 \\ \vdots & \vdots \\ x_{11} & pH_{11} \end{bmatrix}$$

Variabel  $j$  adalah laju aliran gas, nilai pH ( $X_j$ ). Sedang nilai rata-rata variabel tersebut sampai waktu ke- $k$  (dalam tugas akhir ini  $k$  bernilai 21) misal untuk variabel biogas adalah:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (3.2)$$

Dan nilai standart deviasinya adalah

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2} \quad (3.3)$$

Langkah selanjutnya untuk menentukan komponent utama dari matrik adalah melakukan operasi pemusatan dan penskalaan data matrik, dengan cara:

- *Mean centering* tiap kolom matrik dengan  $x_j - \bar{x}_j$
- *Mean centering* dan *scaling*  $(x_j - \bar{x}_j)/s_j$

Setelah melakukan operasi pemusatan dan penskalaan data matrik hal yang dilakukan untuk mendapatkan komponent utama yang diinginkan adalah digunakan *Singular Value Decomposition*, dengan metode ini secara langsung dapat menghasilkan matrik komponent utama dan variasinya.

Dalam SVD matrik  $X_{ij}$  hasil pemusatan dan penskalaan diuraikan dalam bentuk  $X = U \Sigma V^T$ .

$$\begin{bmatrix} x'_{11} & \dots & pH'_{11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x'_{21} & \dots & pH'_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ U_{121} & \dots & U_{n21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & 0 \\ & \sigma_2 & & & 0 \\ & & 0 & & 0 \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0_{121} \\ & & & & & 0_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_2 \\ 0 \\ \vdots \\ V_{11} & V_{21} \\ V_{12} & V_{22} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dimana  $\Sigma$  adalah matrik diagonal dengan setiap diagonalnya bernilai  $\sigma$ . Nilai  $\sigma$  berasal dari nilai singular matrik  $X$ . Kolom pertama matrik  $V$  ( $V_{11}$  sampai  $V_{13}$ ) adalah komponent utama pertama ( $P_1$ ) dengan  $\sigma$  terbesar, dan kolom kedua matrik  $V$  ( $V_{21}$  sampai  $V_{23}$ ) adalah komponent utama kedua ( $P_2$ ) dengan  $\sigma$  bernilai terbesar kedua dan seterusnya. Setiap variabel  $x(k) \in R^J$  diproyeksikan dengan mengalikannya dengan  $P_R^T$  yang merupakan matrik komponent utama, dimana  $R$  adalah banyaknya komponent utama yang dipilih (Olson, 2005). Atau dituliskan:

$$t_R(k) = x(k)P_R \quad (3.5)$$

Dapat dituliskan dalam bentuk matrik dibawah ini:

$$t_R = [CH^4_1 \quad pH^1_1] \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \end{bmatrix}$$

Dan didapat proyeksi matrik data yang baru adalah

$$\hat{x}(k) = P_R t_R(k) \quad (3.6)$$

Dengan matrik sisa

$$\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (3.7)$$

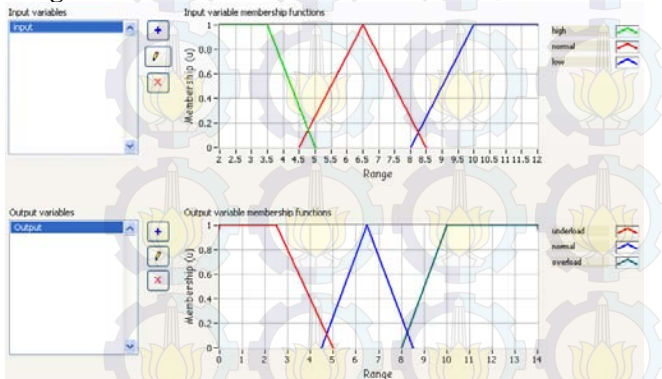
Untuk melihat apakah data nilai komponen utama berada dalam keadaan terkontrol maka digunakan uji statistik peta kendali Hotelling  $T^2$ .

$$T^2(k) = t_{R(k)}^T S_R^{-1} t_{R(k)} = x(k)^T P_R S_R^{-1} P_R^T x(k) \quad (3.8)$$

$S_R \in R^{R \times R}$  adalah matrik dengan R eigenvalue pertama pada diagonalnya, atau dengan kata lain  $S_R = \sum_{R}^T \sum$  (Olson, 2005). Secara sederhana algoritma PCA dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar 3.10.

### B. Pembuatan FIS

Output dari algoritma PCA yang berupa nilai  $T^2$  belum dapat menjelaskan keadaan yang terjadi pada bioreaktor, untuk itu dibutuhkan suatu algoritma pengambil keputusan yaitu logika *fuzzy*. Logika *fuzzy* ini berfungsi untuk menerjemahkan variabel baru yang berasal dari algoritma PCA, sehingga keadaan-keadaan yang terjadi bisa ditentukan. Fuzzy yang dapat menjelaskan untuk ketiga kondisi bioreaktor terdapat pada gambar 3.11



Gambar 3.11 *Membership function* nilai  $T^2$  dari komponen utama pertama

Dari grafik peta kendali hotelling  $T^2$  dapat diambil data besar penyimpangan untuk tiap – tiap keadaan yang terjadi, dengan mencari rata – ratanya dan deviasinya. Kemudian hasil tersebut dibuat untuk membangun *membership function* bagi input *fuzzy* Mamdani dengan menggunakan fungsi *triangle* dan *trapezoid*. Jumlah input fuzzy untuk setiap keadaan yang ditinjau tergantung dari banyaknya komponen utama yang dipilih. Jika *membership function* input *fuzzy* untuk setiap keadaan yang ditinjau saling berhimpitan satu sama lain maka dapat digunakan dua komponen utama sebagai input *fuzzy* untuk mencegah terjadinya kesalahan klasifikasi.

Untuk membangun sistem *fuzzy* maka perlu untuk melakukan fuzzifikasi. Fuzzifikasi sendiri merupakan perubahan variabel *crisp* (*non-fuzzy*) yang berasal dari algoritma PCA menjadi suatu variabel *fuzzy*. Untuk melakukan fuzzifikasi tersebut dilakukan dengan cara

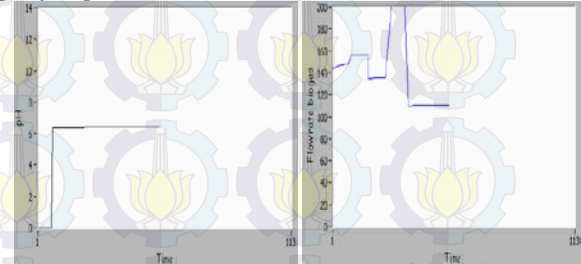
memetakan variabel *crisp* kedalam himpunan *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* sendiri didapat dari rata-rata dan standart deviasi dari data pola grafik atau nilai dari peta kendali hotelling  $T^2$  untuk tiap-tiap keadaan yang terjadi.

Aturan *fuzzy* untuk 1 komponen utama yang terlibat adalah:

If (nilai  $T^2$  dari komponen utama pertama adalah keadaan 1) then (output is keadaan 1)

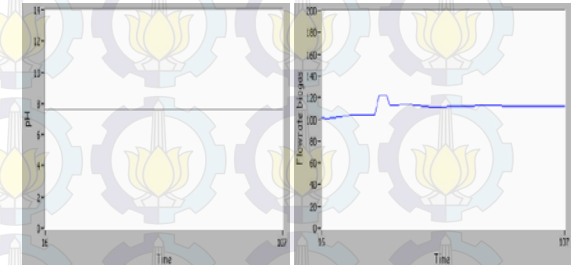
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi input pertama yang diberikan pada plant bioreaktor anaerob, substrat yang diberikan yaitu dengan pH=5.7 dan laju aliran substrat 104.492 ml/jam, hasil dari input tersebut dapat diketahui nilai pH dan laju aliran biogas yang dihasilkan dan kondisi bioreaktor anaerob.



Gambar 4.1 Hasil monitor dengan variasi input pH=5.7 Dari hasil grafik di atas dapat dilihat dengan variasi input pertama diketahui bioreaktor anaerob dalam keadaan stabil dengan keluaran biogas bernilai diatas 100 ml/jam dan pH bernilai 7.2.

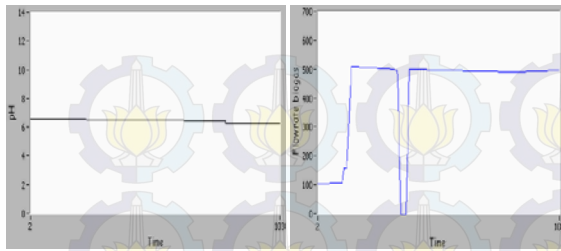
Variasi input yang ketiga diberikan dengan mengubah nilai pH menjadi 5.9 dan bukaan valve laju aliran substrat sebesar 15%. Dapat dilihat keadaan bioreaktor dan hasil keluaran biogas dan pH, seperti gambar di bawah ini.



Gambar 4.2 Hasil monitor dengan variasi input pH=5.9

Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa hasil monitor keadaan bioreaktor anaerob dengan bukaan valve 15% (102.492 ml/jam) dalam keadaan tidak stabil, nilai pH diatas nilai normal yaitu 7.8. Jika diberikan input seperti ini dan input laju aliran substrat terlalu kecil maka biomassa yang terdapat di dalam reaktor akan mati. Akan tetapi hasil keluaran biogas mengalami kenaikan karena substrat yang diberikan nilai pHnya mendekati 6, pada kondisi ini setelah waktu ke-30 menunjukkan bahwa bioreaktor memproduksi biogas 80 ml/jam dan pH bernilai 7.8.

Variasi input yang keempat dengan memberi substrat yang terlalu encer dengan pH 6.9 dan laju aliran substrat 223.692 ml/jam. Untuk hasil dari keadaan bioreaktor anaerob dan keluaran biogas dan pH dapat dilihat seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.3 Hasil monitor dengan variasi input pH=6.9. Dari hasil monitor dengan variasi input pH 6.9 dan laju aliran substrat 223.692 dapat dilihat bahwa kondisi bioreaktor dalam keadaan tidak stabil, hasil keluaran biogas sangat besar diatas 180 ml/jam dan pH bernilai 6.8 dan terus akan mengalami penurunan.

#### Hasil Klasifikasi Sistem Fuzzy

Untuk mengetahui hasil dari klasifikasi fuzzy yang telah dibuat maka dilakukan simulasi secara keseluruhan untuk tiap – tiap keadaan yang ditinjau.

Tabel 2 Hasil variasi input pH

Percobaan	Nilai Input		Hasil Klasifikasi Keadaan
	pH	Laju substrat (ml/jam)	
1	5.7	104.492	Normal
2	7	104.492	Normal
3	2.9	104.492	Underload

Pada tabel 4.6 dapat dilihat bahwa dengan input pH yang bernilai 5.7 sampai dengan 7 hasil monitor menunjukkan keadaan normal namun pada saat pH bernilai 2.9 hasil monitor yang terjadi adalah *underload*. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa dengan perubahan input Substrat dengan pH di bawah 3 dapat mengakibatkan bioreaktor berada dalam kondisi *underload*. Sehingga dapat disimpulkan pula bahwa perubahan maksimal dari pH agar reaktor tetap stabil adalah sebesar 3.

#### V. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

- Telah berhasil dibuat sistem monitoring secara *on-line* pada plant bioreaktor anaerob kontinyu yang menampilkan grafik kontrol pH dan laju aliran biogas.
- Grafik kendali hotteling  $T^2$  yang berasal dari komponent utama pertama memberikan pola yang berbeda-beda untuk tiap-tiap keadaan.
- Hasil monitoring pada biorektor menunjukkan sistem monitoring mampu mendeteksi tiga keadaan yang terjadi pada bioreaktor yaitu keadaan normal, *overload* dan *underload*.

Saran yang dapat disampaikan untuk penelitian selanjutnya adalah variabel pengukuran perlu ditambahkan lagi seperti temperatur, yang menjadi masukan untuk sistem montoring. Mode keadaan dapat ditambahkan dengan keadaan *toxic*.

#### VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bêteau, Carlos-Hernandez, E.N. Sanchez., Fuzzy observers for anaerobic WWTP: Development and implementation, GIPSA Lab, Automatic Control Department, Grenoble INP, BP 46, 38402 St Martin d'Herès, France, 2009.
- [2] Bêteau, Jean-François., Soehartanto, Totok., Control Strategy Selection By Using Stability Limits: Application to An Anaerobic Digester, Laboratoire d'Automatique de Grenoble BP 46, F-38402 ST Martin d'Herès, 1998.
- [3] Indriawati, K., Multivariable Predictive Control of The Anaerobic Digestion Based Generalized Predictive Control Algorithm, International Seminar on Applied Technology, Science, and Art. ITS, 2010.
- [4] Olsson, Rasmus, Batch Control and Diagnosis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Swedia, 2005.
- [5] Kresna, Metrik. Katherin, Perancangan Sistem Monitoring Pada Oxidation Ditch Berbasis Multivariate Statistical Process Control Berbantuan Fuzzy, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS, 2008.
- [6] Bernard. O , Zakaria H.S, D. Dochain, A. Genovesi, Jean-Philippe Steyer, 2001, Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process, Biotech.Bioeng., vol. 75, pp. 424-438,.
- [7] Muzakki, Farhan.M. Katherin, 2010, Perancangan Sistem Monitoring Dinamik Pada Sistem Kontrol Bioreaktor Anaerob Menggunakan Metode Multivariate Statistical Process Control, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
- [8] Saputra, A. R. Katherin. 2009. Perancangan Sistem Monitoring Pada Bioreaktor Aerob Berbasis Multivariate Statistical Process Control Berbantuan Logika Fuzzy. Tugas akhir, Jurusan Teknik Fisika FTI – ITS.
- [9] Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R., Nogueira da Silva, T., Dias da Silva, E., 2010. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digester treating swine manure and used cooking grease.
- [10] Bitton, Gabriel. 2005. Wastewater Microbiology. 3<sup>rd</sup> edition, New York : John Willey & Sons Inc.
- [11] Ariyanto, Katherin, Rancang Bangun Sistem Monitoring Dengan Metode Statistical Process Control (SPC) Secara On-Line Pada Plant Bioreaktor Anaerob Kontinyu, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS, 2011.
- [12] Ernst Murnleitner, Becker, T.M., Antonio, D., 2001. State Detection And Control Of Overloads In The Anaerobic Waste Water Treatment Using Fuzzy Logic. Elsevier water research 36(2002)201-211
- [13] Femat, Mendez-Acosta, J.P. Steyer, V. Gonzalez-Alvarez., 2003, Temperature oscillations in a biological reactor with recycle, Dpto. de Matematicas Aplicadas y Sistemas Computacionales, IPICYT Apdo Postal 3-90, 78231 Tangamanga, San Luis Potos, S.L.P., Mexico
- [14] J.F. Bêteau, V. Ottona, J.Y. Hihnb, F. Delpechc, A.Chérucy, “Modelling of anaerobic digestion in fluidised bed with a view to control”, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 24, pp. 255–267, 2005.
- [15] Mason, Robert L, Young, John C, Multivariate Statistical Process Control with Industrial Applications, Philadelphia, Pennsylvania. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [16] Michael H. Gerardi., The Microbiology of Anaerobic Digesters, Canada : John Wiley & Sons, 2003.