PENGEMBANGAN MODEL LOGIKA FUZZY PADA REAKTOR BIOGAS ANAEROB

The Development of Fuzzy Logic Model on Anaerobic Biogas Reactor

Cahyadi, Taopik Hidayat, dan Dwika Budianto

Balai Besar Teknologi Konversi Energi

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)

Gedung 620 Kawasan PUSPIPTK Serpong - Tangerang Selatan 15314

Email: cahyadi@bppt.go.id

Abstract

Hydrogen could be used as fuel for internal combustion engines or as fuel cell application that produces almost no greenhouse gas emissions when burned with oxygen. Hydrogen could be combined with compressed natural gas (CNG) to improve their performance and reduce air pollution. Hydrogen is produced from carbohydrate-rich materials from industrial waste by dark fermentation process. POME containing high organic materials around 25.000 – 70.000 mg/L is a good substrate for biohydrogen production through anaerobic digestion involving microbes. The temperature effect of anaerobic digestion was studied in this study. The preculture test is carried out at 37°C and 55°C. Sludge and POME were obtained from palm oil mill factory in Bogor. Sludge is treated by heating of 90-95°C for 90 minutes. The experimental results show that the temperature of 55°C generates a higher biogas compared to 37°C, 95 ml and 53 ml respectively. The highest gas production rate is found at 24 hours incubation period and biogas rate slow down when incubation time is 48 hours.

Keywords: anaerobic digester, fuzzy logic, biogas reactor model

Abstrak

Kondisi kerja internal dan dinamika proses reaktor biogas anaerobik cukup sulit dipecahkan dan banyak masalah metodologi dalam pemodelan masih harus dipecahkan. Terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi tingkat pertumbuhan bakteri dan koefisien *yield* yang mencerminkan pertumbuhan mikroorganisme. Selain itu kurangnya akurasi dalam pengukuran dan kadang kurangnya pengukuran sering mengarah pada masalah identifikasi. Oleh karena itu, model dikembangkan yang mampu mengkaraktirisasi reaktor biogas anaerob menggunakan logika fuzzy. Model ini dibangun menggunakan persamaan keseimbangan massa dan pemodelan beberapa parameter dengan logika fuzzy. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan percobaan yang telah dilakukan pada reaktor *fluidized bed* dan dengan hasil yang diperoleh dari model lain. Hasil yang diperoleh cukup baik dalam mengikuti profil hasil eksperimental dan dengan yang diperoleh dengan metode teoritis.

Kata kunci: digester anaerobik, logika fuzzy, model reaktor biogas

1. PENDAHULUAN

Model matematika yang digunakan pada sistem kontrol dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis: yaitu persamaan diferensial dari hukum fisik tanpa penggunaan pengukuran sistem disebut *white box* (kotak putih) dan model yang sepenuhnya berasal dari data yang tidak menggunakan hukum fisik (kotak hitam). Sebenarnya, jika pemodelan kotak hitam dikombinasikan dengan beberapa pengetahuan fisik dari sistem model yang dimaksud akan diperoleh pemodelan kotak abu-abu.

Pemodelan *digesting* anaerobik sangat penting dengan tujuan untuk memperkirakan parameter yang tidak terukur dengan sensor atau dengan pengukuran tidak langsung (atau terlalu mahal) dan untuk mengontrol proses (pengaturan dengan *set point*).

Dalam tulisan ini, model diuraikan untuk

kebutuhan simulasi pengujian dan *tuning controller* serta untuk menghitung parameter yang tidak diukur, yang dibutuhkan untuk memverifikasi proses kerja. Model dikonstruksi menggunakan persamaan kesetimbangan massa dan pemodelan beberapa parameter dengan logika fuzzy.

Hasil pemodelan dari data operasi yang berbeda dapat dievaluasi sebelum menerapkan konsep ke *plant* skala penuh (Yetilmezsoy, 2007). Dalam literatur, ada banyak penelitian seperti pemodelan dinamis integral dari reaktor UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) (Bolle *et al.* 1986) simulasi matematik dari reaktor UASB (Narnoli, *et al.*, 1997), pemodelan dinamis dari reaktor anaerobik *high rate single stage* (Costello, *et al.*, 1991) dan pemodelan matematika dari *batch anaerobic digestion* (Kalyuzhnyi, *et al.*, 1997) dilakukan dengan model yang komprehensif dan kompleks untuk dikendalikan dan mensimulasikan beberapa

sistem anaerobik. Pontes dan Pinto (2006) melakukan studi tentang analisis model kinetik dan aliran (atau hidrolis) terpadu untuk dua *anaerobic digester*, UASB dan EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*). Dalam studi tersebut, didapat bahwa aliran gas sangat berbeda untuk reaktor UASB dan EGSB.

Kinerja proses *digesting* anaerobik sangat kompleks dan sangat tergantung pada konfigurasi reaktor yang memiliki karakteristik fluida yang berbeda dan kondisi operasional (Cakmaci, 2007; Chan, 2003). Karena itu, sistemnya harus terus dipantau dan dikendalikan karena ketidak-stabilannya dalam berbagai situasi dan kondisi, khususnya dalam hal tingkat produksi biogas atau metana, yang memberikan indikasi aktivitas biomassa dalam proses anaerobik (Kanat, G., 2009). Dari proses pertama *digesting* anaerobik sangat rentan terhadap fluktuasi dalam masukan proses seperti tingkat pemuatan organik, pH tidak aktif, dan senyawa organik beracun. Tingkat produksi biogas atau metana sangat tergantung pada kondisi proses yang diterapkan. Oleh karena itu, hubungan timbal balik yang rumit di antara sejumlah faktor sistem dalam proses dapat dijelaskan melalui pengembangan model prediksi berbasis pengetahuan yang representatif yang memungkinkan investigasi secara lebih rinci.

Kemampuan prediktif dan karakteristik non-linear dari beberapa teknik pemodelan, seperti jaringan saraf buatan (Onkal-Engin, et al., 2005; Karaca, et al., 2006; Yetilmezsoy, et al., 2008; Akkoyunlu, et al., 2010), logika *fuzzy* (Marsili-Libelli, 2004), *neuro-fuzzy* adaptif (Cakmaci, 2007; Cakmaci, et al., 2010), telah dilakukan di bidang teknik lingkungan. Di antara metode-metode ini, metodologi logika *fuzzy* telah berhasil diterapkan dalam berbagai aplikasi ekologi dan lingkungan, mulai dari pemetaan hingga pemodelan, evaluasi dan prediksi (Metternicht, et al., 2005). Model berbasis logika *fuzzy* juga telah dilakukan oleh banyak peneliti untuk pemodelan berbagai jenis proses anaerobik (Tray, et al., 2000). Selain itu, sistem pengendalian dan pengukuran berbasis logika fuzzy pada biogas yang memantau pH dan alkalinitas digunakan untuk mengendalikan produksi gas metan dan juga memprediksi kegagalan sistem (Matindife and Wang, 2017). Pengembangan logika fuzzy untuk pembangkit listrik dengan optimasi produksi biogas dan pembangkitan listrik dapat meningkatkan kinerja hingga 25% (Araoye, et al., 2018).

Pada makalah ini, dikembangkan pemodelan logika *fuzzy* pada reaktor biogas. Reaktor biogas menggunakan tipe *fluidized bed* berukuran 15 liter seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pemisahan cairan dan gas dilakukan pada bagian atas reaktor. Tingkat pH didalam reaktor dikendalikan dengan memasukkan sodium bicarbonat. Pemodelan logika *fuzzy* ini diperlukan untuk memprediksi parameter laju cairan masuk reaktor yaitu Q_{in} (laju alir cairan) berdasarkan parameter yang mudah diamati, menggunakan sensor yang sudah umum

dipasaran dan juga respon waktu yang cepat yaitu temperatur dan pH. Pengembangan model logika *fuzzy* dilakukan berdasarkan pendekatan model matematik hasil kajian (Polit, et al., 2002). Pengujian hasil pemodelan logika *fuzzy* dilakukan berdasarkan hasil uji reaktor *plug flow* (Estamben, et al., 1997). Berdasarkan hasil pengujian pemodelan logika *fuzzy* menunjukkan hasil yang cukup memuaskan, karena model logika *fuzzy* dapat mengikuti pola fluktuasi temperature, pH dan laju masuk cairan kedalam reaktor.

Gambar 1. Reaktor biogas *fluidized bed* 15 liter (Estamben, et al., 1997)

2. BAHAN DAN METODE

Persamaan model reaktor biogas menggunakan pendekatan model dinamik reaktor *fixed bed*. Konsentrasi dalam fase cair dianggap konstan. Kinetik mikroba dijelaskan menggunakan pendekatan Hukum Monod seperti pemodelan dinamik biogas yang dilakukan oleh Denac (1988).

Laju pertumbuhan biomassa X_i diperoleh dari:

$$r_{Xi} = \mu_i - k_d \quad \dots\dots\dots(1)$$

Laju konsumsi substrat S_i dihitung melalui:

$$r_{Si} = \mu_i \frac{X_i}{Y_i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\mu_i(S_i) = \mu_{imax} \frac{S_i}{S_i + K_{Si}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

μ_{imax} adalah laju pertumbuhan maksimum untuk biomassa (per jam), K_{Si} adalah konstanta saturasi (gCOD/l), dan K_{di} adalah laju kematian organisme (h^{-1}), Y_i adalah *yield* konversi menjadi substrat (g biomassa/g COD). Untuk masing-masing substrat dan biomassa yang terlibat dalam *digesting* anaerobik (seperti glukosa, acetic, dll) persamaan kesetimbangan massa ditulis sebagai

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_T} (S_{in} - S_i) + \sum_{j=1}^r a_j r_{S_i} \quad \dots\dots\dots(4)$$

Dengan Q_{in} adalah laju cairan masuk (l/h), S_{in} adalah konsentrasi yang masuk (g COD/l); V_r adalah volume total reaktor (l); r adalah jumlah reaksi anaerobik; α_j adalah koefisien stokiometrik biomassa

$$\frac{dX_i}{dt} = r_{X_i} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_{CH_4} = \sum_{j=1}^r \alpha_j^1 r_{S_j} \dots\dots\dots(6)$$

$$Q_{CO_2} = \sum_{j=1}^r \alpha_j^2 r_{S_j} \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_{H_2} = \sum_{j=1}^r \alpha_j^3 r_{S_j} \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_{gas} = Q_{CH_4} + Q_{CO_2} + Q_{H_2} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana $\alpha_j^1, \alpha_j^2, \alpha_j^3$ adalah koefisien stokiometrik reaksi kimia masing-masing CH_4 , CO_2 dan H_2 dihasilkan.

Pengaruh parameter seperti temperatur, pH dan alkalinitas harus diperhitungkan karena parameter tersebut tidak konstan selama periode waktu yang panjang. Tidak ada parameter dalam model yang secara eksplisit menyatakan proses *digesting* anaerobik bervariasi terhadap pH atau temperatur. Bastin dan Dochain (1990) menyatakan μ sebagai:

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(X)\mu(pH)\mu(T)\mu(P) \dots\dots\dots(10)$$

Semua factor μ , kecuali $\mu(S)$, adalah bernilai antara 0 dan 1. Rozzi (1984) menggunakan hukum parabolik dari data eksperimental, untuk menjelaskan pengaruh terhadap pH;

$$\mu(pH) = apH^2 + bpH + c \dots\dots\dots(11)$$

Dimana a,b,c adalah konstanta.

Topiwala dan Sinclair (1971) memodelkan pengaruh temperatur dengan hukum Arrhenius

$$\mu(T) = \begin{cases} a_1 \exp(-E_1/RT) & \text{if } T < T_1 \\ 0 & \text{if } T_1 \leq T \leq T_2 \\ -a_2 \exp(-E_2/RT) - b & \text{if } T > T_2 \end{cases} \dots\dots\dots(12)$$

Metode logika fuzzy terdiri dari 3 sub sistem (Turkdogan-Aydinol, *et al.*, 2010) yaitu fuzzifikasi, basis aturan dan defuzzifikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai masukan dari sensor akan masuk ke sub-sistem fuzzifikasi yang mengubah nilai sebenarnya menjadi nilai himpunan fuzzy. Basis aturan yang telah ditetapkan akan memberikan evaluasi hingga pengambilan keputusan. sub-sistem defuzzifikasi yang akan mengubah nilai keputusan menjadi nilai sebenarnya.

2.1. Tahap Fuzzifikasi

Tahap fuzzifikasi merupakan tahapan awal dimana

terjadi proses memetakan suatu nilai sebenarnya (*crisp*) kedalam himpunan fuzzy. Dengan kata lain membuat suatu nilai *crisp* menjadi suatu nilai yang berkisar antara 0 hingga 1 dalam himpunan-himpunan fuzzy yang tersedia.

2.2. Evaluasi Aturan

Pada tahap evaluasi aturan dilakukan evaluasi, pengecekan, pengambilan keputusan aturan, basis pengetahuan, basis aturan yang akan diterapkan dengan menyesuaikan kondisi nilai pada himpunan-himpunan fuzzy. Beberapa aturan dapat diterapkan sekaligus pada kondisi tersebut. Banyaknya aturan yang diterapkan tergantung dari banyaknya nilai himpunan fuzzy yang tidak bernilai 0 di dalamnya. Bila suatu nilai himpunan fuzzy bernilai 0 maka aturan yang memuat antisenden dan konsekuensi atas himpunan tersebut dapat diabaikan dengan kata lain tidak digunakan. Aturan, basis aturan, atau basis pengetahuan memuat sejumlah fungsi yang memetakan sejumlah antisenden dengan konsekuensinya dengan bentuk *if-then*, bila (*if*) antisenden bernilai x, maka (*then*) konsekuensi bernilai y.

2.3. Defuzzifikasi

Tahap selanjutnya ialah defuzzifikasi. Berbeda dengan fuzzifikasi, pada tahap ini proses memetakan suatu nilai ruang fuzzy ke dalam nilai *crisp*. Dengan kata lain untuk mengubah nilai fuzzy menjadi nilai *crisp*. Nilai *crisp* inilah yang nantinya akan digunakan dalam implementasi dan analisis akhirnya. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengubah suatu nilai fuzzy dalam nilai *crisp*, metode defuzzifikasi tersebut antara lain, *Center-of-Gravity*, *Center-of-Average*, *First-of-Max*, *Last-of-Max*, dan lain sebagainya. Pada dasarnya setiap metode defuzzifikasi memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing, serta kebutuhan implementasinya itu berbeda-beda. Kinerja metode defuzzifikasi untuk satu sistem dengan sistem lainnya tidak selalu sama, tergantung kebutuhan mana yang paling sesuai dalam suatu sistem.

Gambar 2. Model logika fuzzy

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada makalah ini, nilai Q_{in} ditentukan berdasarkan nilai temperatur dan pH yang berkisar antara 6,1 hingga 7,9 dan temperatur antara 20 hingga 60°C. Masing-masing nilai temperatur dan pH akan diubah ke nilai μ , melalui proses fuzzifikasi. Logika fuzzy dikembangkan menggunakan perangkat lunak *Labview*. Gambar 3 menunjukkan himpunan

fuzzy yang digunakan adalah LN negatif besar, MN negatif medium, SM negatif kecil, Zero nilai nol, SP positif kecil, MP positif medium dan LP positif besar. Himpunan *fuzzy* untuk temperatur dan pH pada fuzzifikasi. Gambar 4 menunjukkan himpunan *fuzzy* pada defuzzifikasi. Sedangkan basis aturan dikembangkan berdasarkan pengalaman hasil eksperimental dan juga matematik.

Adapun basis aturan berupa antisenden dan konsekuensi pada reaktor biogas ini ada 49 aturan yaitu dengan contoh sebagai berikut:

1. Jika 'pH' adalah 'LN' dan 'Temp' adalah 'LN', maka 'U' adalah 'LN'
2. Jika 'pH' adalah "MN' dan 'Temp' adalah 'LN' maka 'U' adalah 'LN'
3. Jika 'pH' adalah 'SN' dan 'Temp' adalah 'LN' maka 'U' adalah 'LN'
49. Jika 'pH' adalah 'LP' dan 'Temp' adalah 'LP' maka 'U' adalah 'LN'

Tabel 1. Menunjukkan basis aturan untuk keseluruhan aturan yang ada.

Tabel 1. Basis aturan model reaktor biogas anaerob

Parameter	pH						
Temp	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
MN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
SN	LN	MN	MN	MN	MN	MN	LN
ZE	LN	ZE	SP	SP	SP	ZE	LN
SP	SN	SP	LP	LP	LP	SP	SN
MP	MN	ZE	MP	MP	MP	ZE	MN
LP	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN

Gambar 3. Himpunan fuzzy untuk pH dan temperatur

Gambar 4. Himpunan fuzzy untuk nilai u pada defuzzifikasi

Pada Gambar 5 ditunjukkan hasil pengujian basis aturan berdasarkan fuzzifikasi dan defuzzifikasi. Pengujian dilakukan dalam perangkat lunak *Labview* untuk melihat kelengkapan aturan dan hubungan korelasi parameter temperatur dan pH terhadap laju alir gas keluar reaktor.

Gambar 5. Variasi laju alir cairan masuk terhadap nilai μ

Pada Gambar 6 ditunjukkan variasi temperatur dan pH pada reaktor dan Gambar 7 ditunjukkan hasil perbandingan pemodelan *fuzzy* dengan hasil eksperimental korelasi temperatur dan pH terhadap laju cairan masuk reaktor Q_{in} . Pada penelitian (Turkdogan-Aydinoli, *et al.*, 2010; Polit, M., 2002) ditunjukkan bahwa pH yang ideal untuk mikroorganisme tumbuh adalah 6,5 hingga 7,5. Penelitian biogas pada skala pilot tipe CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) menggunakan POME juga menunjukkan diawal pH tinggi 8,42 dan pada saat stabil terbentuk biogas pH menjadi berkisar 6.5 hingga 7.5 (Irvan, *et al.*, 2018). Kondisi temperatur juga mempengaruhi proses biogas. Secara umum, ada 2 jenis temperatur yang dikenal dalam proses biogas yaitu mesofilik dalam kisaran

35-40°C dan termofilik dalam kisaran 55-70°C (Chong, *et al.*, 2018).

Gambar 6. Hasil eksperimental variasi temperatur dan pH pada reaktor anaerob (Estamben, 1997).

Gambar 7. Hasil perbandingan simulasi model fuzzy dan ekperimental.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada reaktor biogas POME dengan 3 (tiga) variasi temperatur yaitu: 28°C, 45°C dan 55 °C, menunjukkan bahwa waktu fermentasi yang lebih cepat dan produksi biogas lebih tinggi pada temperatur 55°C (Saron, *et al.*, 2016). Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa termofilik menghasilkan biogas lebih banyak dibandingkan mesofilik, namun mesofilik banyak dipilih karena kestabilan proses *digesting* lebih baik dan konsumsi energi lebih rendah (Chong, *et al.*, 2018). Pada penelitian ekperimental ini menggunakan temperatur mesofilik dan pada Gambar 6 dapat dilihat fluktuasi temperatur dan pH yang perlu lebih diperbaiki dengan melihat korelasi terhadap laju alir cairan masuk.

Pemodelan ini bermanfaat sebagai prediksi laju alir cairan masuk reaktor agar kondisi didalam reaktor anaerob selalu kondusif untuk pertumbuhan mikroorganisme sehingga produksi gas atau metana akan lebih stabil. Dengan sensor temperatur dan pH, maka akan lebih cepat untuk melakukan koreksi terhadap laju cairan masuk reaktor yang biasanya dikendalikan menggunakan katup kontrol.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan dapat diambil kesimpulan bahwa model logika *fuzzy* yang dikembangkan, dapat memodelkan reaktor biogas

anaerobik yang melibatkan proses yang sangat kompleks.

Model logika *fuzzy* yang dikembangkan dapat memprediksi parameter aliran masuk reaktor yaitu Q_{in} (laju alir cairan masuk reaktor) berdasarkan parameter yang mudah diamati, menggunakan sensor yang sudah umum dan memiliki respon waktu yang cepat, yaitu temperatur dan pH.

Hasil pengujian pemodelan logika *fuzzy* menunjukkan bahwa model logika *fuzzy* dapat mengikuti pola fluktuasi temperatur, pH dan laju alir cairan masuk reaktor sesuai hasil eksperimental skala pilot, sehingga hasilnya dikatakan yang cukup memuaskan.

Ucapan Terima Kasih

Hasil penelitian ini merupakan salah satu luaran Program Insinas 2018 Flagship Biogas yang telah dibiayai oleh Kemenristek Dikti dengan judul Pengembangan *Fuzzy Logic* Untuk Sistem Kontrol dan Monitoring Reaktor Biogas POME (*Palm Oil Mill Effluent*).

DAFTAR PUSTAKA

- Akkoyunlu, A. K., Yetilmezsoy, F. E., & Oztemel, E. (2010). A neural network-based approach for the prediction of urban SO concentrations in the Istanbul Metropolitan Area. *Int. J. Environ. Polut.* 40 pp.301–321.
- Araoye A., Mgbachi, T., & Ajenikoko, G.A. (2018). Development of Fuzzy logic technique for biogas production of electrical energy. *Intl Journal of Advanced Scientific & Tech Research.* 8 Vol. 5.pp.436–446.
- Bastin, G., & Dochain, D., 1990. On-line estimation and adaptive control of bioreactors. Elsevier, Amsterdam.
- Bolle, W. L., J. van Breugel, G.C. van Eybergen, N.W.F. Kossen, W. van Gils, (1986). An integral dynamic model for the UASB reactor. *Biotechnol. Bioeng.* 28 pp.542–548.
- Cakmakci, M. (2007). Adaptive neuro-fuzzy modelling of anaerobic digestion of primary sedimentation sludge, *Bioprocess. Biosyst. Eng.* 30 pp.349–357.
- Cakmakci, M., Kinaci, C., Bayramoglu, M., & Yildirim, Y. (2010). A modeling approach for iron concentration in sand filtration effluent using adaptive neuro-fuzzy mode, *Expert Syst. Appl.* 37.pp.1369–1373.
- Chan, C. W., & Huang, G.H. (2003). Artificial intelligence for management and control of pollution minimization and mitigation processes, *Eng. Appl. Artif. Intel.* 6. 75–0.
- Chong, Y.Y., Chou, K.W., Norli, I. (2018). Strategies for improving biogas production of POMEanaerobic digestion: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- Costello, D. J., Greenfield, & P.F., Lee, P.L. (1991). Dynamic modeling of a singlstage highrate anaerobic reactor. I. Model derivation. *Water Res.* 25 (7) .pp.847–858.
- Denac, M., Miguel, A., Dunn, I.J., (1988). Modelling dynamic experiments on anaerobic degradation of molasses wastewater. *Biotechnology & bioengineering* Vol. 31. pp.1-10.
- Estamben, Polit, Steyer, (1997). Control Fuzzy for an anaerob digester in *Control Engineering Practice* 5 no.98, pp 1303-1311.

- Irvan, T.B., Maulina, S., & Daimon, H. (2018). Production of biogas from POME: from lab scale to pilot scale. *Rasayan J Chem* Vol 11 no.1 ,pp.378–385.
- Kalyuzhnyi, S. V., & Davlyatshina, M.A. (1997). Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. I. Kinetic investigations, *Bioresour. Technol.* 59.pp.73–80.
- Kanat, G., & Saral, A. (2009). Estimation of biogas production rate in a thermophilic UASB reactor using artificial neural networks. *Environ. Model. Assess.* 14. pp.607–614.
- Karaca, F., Ozkaya, B. (2006). NN-LEAP: a neural network-based model for controlling leachate flow-rate in a municipal solid waste landfill site. *Environ. Model. Softw.* 21.pp 1190–1197.
- Matindife, L., & Wang Z. (2017). Fuzzy logic algorithm based measurement and control system for intermixed biogas and photovoltaic system. *Procedia Manufacturing* 7.pp.339-344.
- Metternicht, G., & Gonzalez, S. (2005). FUERO: foundations of a fuzzy exploratory model for soil erosion hazard prediction. *Environ. Model. Softw.* 20 pp.715–728.
- Narnoli, S. K. Mehrotra, I. (1997). Sludge blanket of UASB reactor: mathematical simulation. *Water Res.* 31 (4) pp. 715–726.
- Onkal-Engin, G., Demir, I., & Engin, S.N. (2005). Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks, *Environ. Model. Softw.* 20 pp. 843–850.
- Polit, M., Estaben, & M., Labat, P. (2002). A fuzzy model for an anaerobic digester, comparison with experimental results. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15, pp 385–390.
- Pontes, R. F. F., & Pinto, J.M. 2006. Analysis of integrated kinetic and flow models for anaerobic digesters. *Chem. Eng. J.* 122 pp. 65–80.
- Rozzi, A. (1984). Modelling and control of anaerobic digestion processes. *Transactions of the International Measurement and Control.* 6, pp.153–159.
- Sarono, S O., & Suprihatin, H. (2016). The performance biogas production from POME at different temperatur. *Int Journal of Technology* Vol 8, pp.1413–1421.
- Tay, J. H., & Zhang, X. (2000). A fast predicting neural fuzzy model for high-rate anaerobic wastewater treatment systems. *Water Res.* 34 pp. 2849–2860.
- Topiwala, H., & Sinclair, C.G. (1971). Temperature relationship in continuous culture. *Biotechnology and Bioengineering* 13, pp.795–813.
- Turkdogan-Aydinol, Kaan Yetilmezsoy. (2010). A fuzzy-logic-based model to predict biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater. *Journal of Hazardous Material* 182, pp. 460–471.
- Yetilmezsoy, K. (2007). A new empirical model for the determination of the required retention time in hindered settling, *Fresenius Environ. Bull.* 16 pp. 674–684.
- Yetilmezsoy, K., Demirel, S. (2008). Artificial neural network (ANN) approach for modelling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (*Pistacia Vera L.*), *J. Hazard. Mater.* 153 pp.1288–1300.