

# Strategi Kendali Kadar Nitrat Berbasis *Fuzzy-PID* Pada Proses *Nitrogen Removal* di Instalasi Pengolahan Air Limbah

Gutama Indra Gandha<sup>1</sup>, Dedi Nurcipto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Dian Nuswantoro

<sup>1,2</sup>Jln. Nakula no.5-11 Semarang Indonesia

Email korespondensi : gutama.indra@dsn.dinus.ac.id

Dikirim 24 Oktober 2016, Direvisi 10 November 2016, Diterima 10 November 2016

Abstrak –Tingginya tingkat pencemaran air menyebabkan peningkatan kadar nitrogen pada ekosistem perairan, telah memicu terjadinya fenomena eutrofikasi yang berbahaya bagi ekosistem perairan. Instalasi pengolahan air limbah atau *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) merupakan solusi pengendalian pencemaran air. Pengendalian kadar cemaran nitrogen pada instalasi pengolahan air limbah tergolong tidak mudah dikarenakan perilaku bakteri pada reaktor biologis yang sukar diprediksi. Pengujian strategi kendali kadar nitrogen dilakukan dengan menggunakan model BSM1(Benchmark Simulation Model no.1). Manipulasi laju sirkulasi internal digunakan untuk mengendalikan kadar nitrogen. Dengan mengimplementasikan pengendali nitrat berbasis *Fuzzy-PID*, didapatkan kualitas cemaran dengan kadar nitrogen dan ammonia lebih rendah dibandingkan dengan kendali *PID* konvensional. Kadar nitrogen dan ammonia berkurang sebesar 0.17 mg N/l (0.99%) dan 0.1 mg N/l (3.4%). Konsumsi energi listrik yang dibutuhkan instalasi pengolahan limbah selama 14 hari turun sebesar 193 kWh.

Kata kunci - *Fuzzy-PID*, instalasi pengolahan air limbah, *nitrogen removal*, BSM1

Abstract—The rising of water pollutant level leads to the rising of nitrogen level in water ecosystem. It triggers eutrophication phenomenon that harmful for water ecosystem. Wastewater treatment plant (WWTP) is the solution to resolve the water pollution problem. Controlling the nitrogen level is not an easy task, due unpredictable microorganism behavior in biological reactors. This research utilizes BSM1 simulator model to simulates the control strategy of nitrate level. The manipulation of internal recirculation is the method to control nitrogen level. The *Fuzzy PID*-based nitrate controller produces less nitrogen and ammonia than *PID*-based nitrate controller. The proposed control strategy succeeded in reducing nitrogen and ammonia level by 0.17 mg N/l (0.99%) and 0.1 mg N/l (3.4%). The level of energy consumption also decreased by 193 kWh in 14 days.

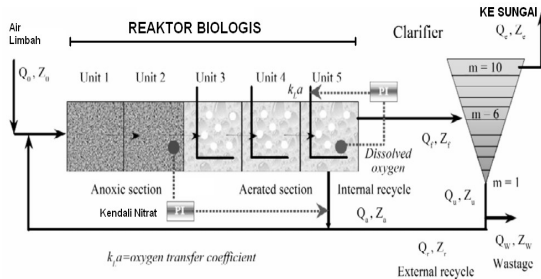
Keywords - *Fuzzy-PID*, wastewater treatment plant, nitrogen removal, BSM1

## I. PENDAHULUAN

Meningkatnya populasi dan standar hidup manusia mengakibatkan permintaan air bersih meningkat diiringi penurunan kualitas lingkungan merupakan permasalahan yang dihadapi oleh setiap negara di dunia [1]. Meningkatnya permintaan air bersih berdampak pada peningkatan permintaan energi untuk pengolahan air limbah sebesar 2-3 kali lipat [2]. Di Amerika telah dibangun 16.583 instalasi pengolahan air limbah untuk memenuhi kebutuhan air bersih penduduknya [1]. Untuk mengoperasikan semua instalasi pengolahan air limbah tersebut, dibutuhkan energi listrik sebesar 56 milyar kWh dengan biaya sebesar 4 milyar dollar Amerika. Konsumsi energi yang besar pada instalasi pengolahan air limbah mengakibatkan polusi gas rumah kaca sekitar 4 juta ton karbondioksida ( $CO_2$ ) terlepas ke udara [1]. Selain permasalahan penggunaan energi, permasalahan

tingkat kualitas cemaran yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan limbah juga menjadi perhatian. Tingginya kadar nitrogen yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan limbah adalah salah satu penyebab eutrofikasi [3]. Eutrofikasi adalah fenomena dimana nutrisi dalam ekosistem perairan meningkat secara signifikan. Eutrofikasi dapat mengancam keberlangsungan makhluk hidup di ekosistem perairan. Eutrofikasi disebabkan oleh zat nitrogen (N) dan fosfor (P) [4]. Peraturan mengenai kadar buang hasil pengolahan air limbah telah ditetapkan oleh *International Water Association* (IWA) sebesar kurang dari 18 mg COD/l untuk nitrogen dan 4 mg N/l untuk ammonia [5]. Pada sistem instalasi pengolahan air limbah, kadar nitrogen hasil pengolahan dipengaruhi oleh performa pengendali nitrat pada tangki *anoxic*. Pada umumnya jenis kendali yang digunakan untuk mengendalikan nitrat menggunakan kendali berbasis *Proportional-Integral-Derivative* (*PID*) [6].

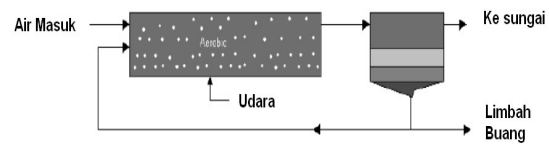
Instalasi pengolahan air limbah adalah sebuah sistem tak linear dengan tunda yang signifikan dan melibatkan proses fisis dan biologis dalam pengoperasiannya. Perilaku kompleks dari mikroorganisme pada reaktor biologis beserta gangguannya, membuat pengendalian tingkat cemaran menghadapi banyak kendala [7]. Pada instalasi pengolahan air limbah terdapat 5 unit tangki. Pada unit1 dan unit2 disebut tangki *anoxic*. Sedangkan pada unit3, unit4 dan unit5 disebut dengan tangki aerasi. [8].



Gambar 1. Skema Model Instalasi Pengolahan Air Limbah

Tangki *anoxic* digunakan untuk proses denitrifikasi. Denitrifikasi adalah proses perubahan nitrat menjadi nitrogen gas oleh mikroorganisme yang berada pada tangki *anoxic*. Tangki aerasi digunakan untuk proses nitrifikasi. Nitrifikasi adalah penguraian ammonia nitrogen menjadi nitrat oleh mikroorganisme *Chemolithotrophic* [9]. Pada umumnya proses *activated sludge* dilibatkan dalam pengoperasian instalasi pengolahan air limbah. Proses *activated sludge* bertujuan menjaga konsentrasi mikroorganisme pada level diatas 100 ppm agar pengolahan air limbah tetap optimal. Proses ini terjadi didalam tangki aerasi pada instalasi pengolahan air limbah [10]. Setelah air limbah melalui tahap nitrifikasi dan denitrifikasi, air limbah yang telah di proses akan buang ke sungai.

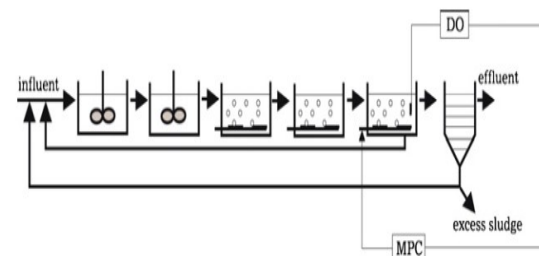
Proses *nitrogen removal* adalah proses paling penting di dalam sistem instalasi pengolahan air limbah [11]. Proses *nitrogen removal* melibatkan dua jenis proses yang berbeda yaitu nitrifikasi dan denitrifikasi [12]. Proses nitrifikasi melibatkan mikroorganisme *Chemolithotrophic*. Untuk menghasilkan tingkat hasil cemaran yang sesuai, dua tahap nitrifikasi harus dilakukan oleh mikroorganisme *ammonia-oxidizing* dan *nitrite-oxidizing*. Ammonium dioksidasi oleh mikroorganisme *ammonia-oxidizing* menjadi nitrit. Nitrit dioksidasi oleh mikroorganisme *nitrit-oxidizing* menghasilkan nitrat. Oksigen diperlukan pada proses nitrifikasi untuk mengurai ammonium. Proses nitrifikasi juga dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal antara lain tingkat oksigen terlarut, suhu didalam tangki, faktor keasaman, konsentrasi ammonia dan konsentrasi nitrit. Kegagalan dalam proses nitrifikasi berakibat pada kegagalan pada proses *activated sludge* [13].



Gambar 2. Siklus Nitrifikasi di Tangki Aerasi

Proses denitrifikasi dilakukan setelah proses nitrifikasi. Proses denitrifikasi dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah proses pre-denitrifikasi yang dilakukan di tangki *anoxic* pertama (unit1). Pre-denitrifikasi melibatkan material organik pada air limbah seperti material karbon. Tahap kedua adalah proses denitrifikasi yang dilakukan di tangki *anoxic* kedua. Proses denitrifikasi melibatkan substansi biologis yang mengubah nitrat menjadi dinitrogen gas melalui proses yang berurutan. Kadar nitrat dikendalikan oleh pengendali nitrat dengan tujuan untuk menjaga kadar nitrat yang berada di tangki *anoxic* [14]. Instalasi pengolahan air limbah menghasilkan dua jenis produk akhir yaitu limbah buang yang akan diproses lebih lanjut dan air hasil pemrosesan yang dibuang ke sungai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

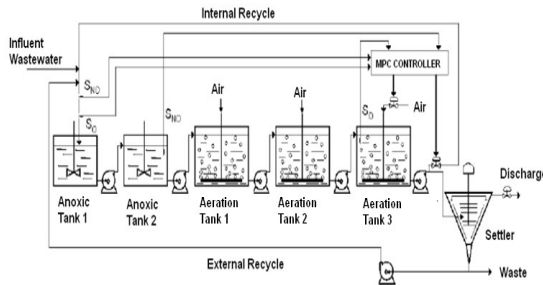
Kendali tradisional PID dan kendali on/off adalah strategi kendali yang paling banyak digunakan pada instalasi pengolahan air limbah [15]. Implementasi kendali *on/off* mengakibatkan *overshoot* yang signifikan melampui *set point* yang ditentukan sehingga kurang efisien dalam konsumsi energi listrik dan kurangnya stabilitas pengendalian [16]. Berbagai skema strategi kendali telah dikemukakan oleh para peneliti. Penelitian yang dilakukan oleh [17] telah mengemukakan strategi kendali berbasis *model predictive control (MPC)* yang diimplementasikan pada tangki aerasi. Strategi kendali ini menghasilkan kualitas cemaran yang lebih baik dibandingkan strategi kendali PID. Kelemahan strategi kendali ini adalah diperlukan konsumsi energi yang lebih besar untuk menghasilkan kualitas cemaran yang lebih baik dibandingkan strategi kendali berbasis PID.



Gambar 3. Skema Strategi Kendali Rancangan Holanda [17]

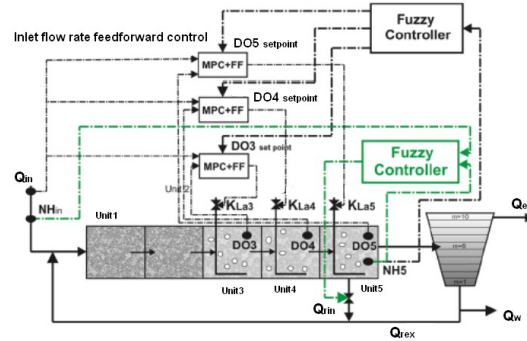
Pengembangan model lebih lanjut pada kendali berbasis *model predictive control* diperlukan, jika terjadi keadaan yang tidak dapat diprediksi atau gangguan [18]. Strategi kendali berbasis MPC dengan umpan balik *feed forward* juga telah diusulkan [19]. Strategi kendali ini menggunakan 2 sensor tambahan

yaitu sensor nitrat dan sensor oksigen terlarut yang dipasang pada tangki *anoxic* pertama. Sensor – sensor tambahan tersebut digunakan sebagai umpan balik *feed forward* pada MPC. Peningkatan kualitas cemaran berhasil ditingkatkan dengan menggunakan strategi kendali berbasis MPC dengan umpan balik *feed forward*. Untuk mengimplementasikan strategi kendali tersebut diperlukan modifikasi pada tangki *anoxic* pertama dan tambahan sensor.



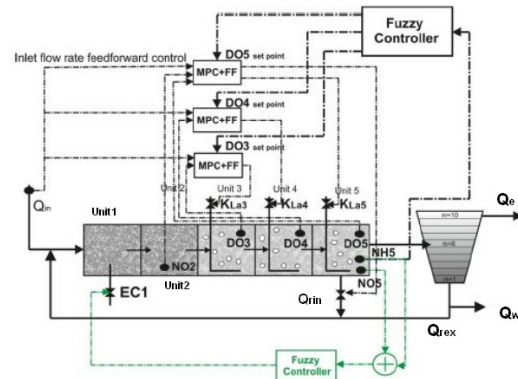
Gambar 4. Skema Strategi Kendali Berbasis MPC Rancangan Cristea [19]

Strategi kendali berbasis MPC dan Fuzzy telah dikemukakan oleh [20]. Strategi kendali tersebut berfokus pada pengendalian ammonia nitrogen yang terdapat pada tangki aerasi 3, 4 dan 5. Sistem kendali yang dikemukakan oleh [20] mengacu pada model kendali *master-slave* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem kendali berbasis Fuzzy bertindak sebagai pengendali *master* sedangkan 3 unit kendali berbasis MPC dengan umpan balik *feed forward* bertindak sebagai *slave*. Data laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) digunakan sebagai umpan balik *feed forward* ke pengendali MPC. Nilai *set point* dari masing – masing MPC diatur oleh pengendali berbasis Fuzzy berdasarkan tingkat kadar ammonium yang berada pada tangki aerasi unit 5 [20]. Pengendali berbasis Fuzzy juga digunakan untuk mengatur laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) berdasarkan kadar ammonium ( $NH_5$ ) pada tangki aerasi unit5 dan kadar ammonia yang masuk ( $NH_{in}$ ) ke *plant*. Tujuan dari pengaturan laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) adalah untuk menyesuaikan kadar nitrat yang masuk ke dalam tangki anoxic (unit1). Berdasarkan skema strategi kendali yang dikemukakan oleh [20], dibutuhkan lebih banyak sensor dan perangkat pengendali dibandingkan dengan strategi kendali berbasis PID konvensional. Adapun sensor tambahan yang dimaksud adalah 3 sensor laju arus (*flow rate sensor*), 3 sensor oksigen terlarut (*dissolved oxygen sensor*), sebuah sensor ammonium ( $NH_5$  sensor) dan satu sensor ammonia ( $NH$  sensor) yang mengakibatkan adanya biaya tambahan dan biaya modifikasi pada *plant*.



Gambar 5. Strategi Kendali Berbasis MPC Dan Fuzzy Rancangan Santin [20].

Diluar permasalahan biaya–biaya kompensasi yang harus ditanggung, strategi kendali rancangan [20] berhasil meningkatkan laju nitrifikasi pada masing – masing tangki aerasi pada (unit3,unit4,unit5). Dampak dari peningkatan laju nitrifikasi adalah naiknya kadar nitrat pada sirkulasi internal. Sensor nitrat ( $NO_2$ ) dan penambahan karbon ( $EC_1$ ) pada tangki *anoxic* (unit1) digunakan untuk mengatasi naiknya kadar nitrat. Skema strategi kendali yang kedua terdapat di Gambar 6.



Gambar 6. Strategi Kendali Berbasis MPC – Fuzzy Dengan Pengendali Karbon Rancangan Santin [20].

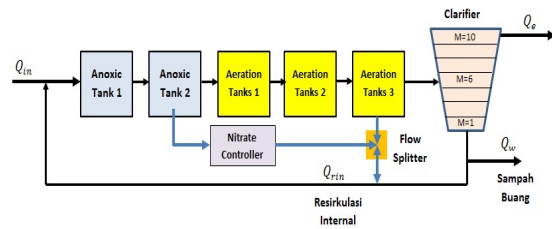
Sensor nitrat ( $NO_2$ ) pada unit2 digunakan sebagai umpan balik *feed forward* pada pengendali MPC untuk memprediksi level nitrat dan level aerasi pada tangki aerasi ketiga (unit5). Laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) akan dimanipulasi oleh pengendali berbasis MPC berdasarkan hasil prediksi. Manipulasi laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) digunakan untuk menyesuaikan kadar nitrat yang masuk pada tangki anoxic pertama (unit1) sesuai dengan nilai *set point* di DO5 (Gambar 6).. Penggunaan karbon eksternal ( $EC_1$ ) juga diimplementasikan pada strategi kendali tersebut. Karbon eksternal digunakan untuk mempercepat proses denitrifikasi, meskipun penggunaan karbon eksternal berdampak pada meningkatnya biaya operasional [21]. Strategi kendali yang telah dikemukakan oleh [20], berhasil meningkatkan

kualitas cemaran dibandingkan dengan strategi kendali PID meskipun terdapat kompensasi berupa adanya biaya tambahan yaitu kenaikan biaya operasional untuk penambahan karbon eksternal (EC1) dan biaya modifikasi *plant*.

II. METODOLOGI PENELITIAN

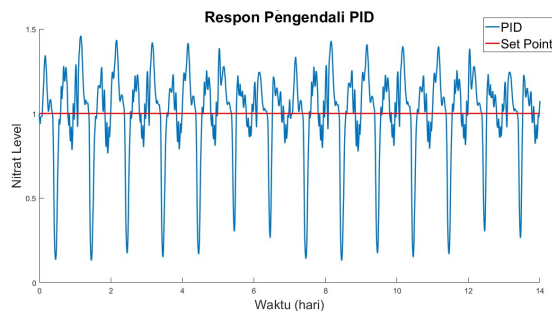
A. Analisa Pengendali Nitrat Berbasis PID

Kadar nitrogen yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan air limbah dipengaruhi oleh konsentrasi nitrat yang terdapat pada tangki *anoxic* [8]. Pengendalian laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) dilakukan untuk mengendalikan kadar nitrat yang terdapat pada tangki *anoxic*. Manipulasi aktuator *flow splitter* berguna untuk mengendalikan laju sirkulasi internal. Proses manipulasi aktuator pada *flow splitter* dilakukan oleh pengendali nitrat (*nitrate controller*).



Gambar 7. Prinsip Kerja Pengendali Nitrat

Analisa sistem respon pengendali nitrat berbasis PID telah dilakukan untuk mengevaluasi kehandalan dari pengendali. Kendali berbasis PID adalah strategi kendali yang umum digunakan pada instalasi pengolahan air limbah [15]. Grafik umpan balik pengendali nitrat berbasis PID ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Umpan Balik Pengendali Nitrat Dengan Kendali Berbasis PID

Berdasarkan Gambar 8, masih terdapat *overshoot* signifikan pada level nitrat yang disebabkan oleh implementasi pengendali nitrat berbasis PID di tangki *anoxic*. *Overshoot* tersebut mengakibatkan peningkatan kadar konsentrasi nitrogen, dikarenakan kadar nitrogen total ( $N_{tot}$ ) adalah penjumlahan kadar nitrit nitrat ( $S_{NO,e}$ ) dan konsentrasi Kjeldahl nitrogen [21]. Implementasi kombinasi kendali berbasis Fuzzy dan PID diharapkan dapat mengurangi *overshoot* yang terjadi pada proses pengendalian kadar nitrat.

B. Evaluasi Kadar Nitrogen

Evaluasi kadar nitrogen diperlukan untuk mengukur kadar nitrogen yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan air limbah. Perbandingan kadar nitrogen dari dua jenis pengendali nitrat yaitu pengendali nitrat berbasis PID dan pengendali nitrat berbasis Fuzzy- PID dipaparkan pada penelitian ini. Konsentrasi nitrat berpengaruh secara langsung pada kadar nitrogen sesuai dengan persamaan (1).

$$N_{tot} = S_{NO,e} + S_{NKJ,e} \tag{1}$$

Dimana  $N_{tot}$  (kadar nitrogen total) adalah penjumlahan kadar nitrit nitrat ( $S_{NO,e}$ ) dan konsentrasi Kjeldahl nitrogen [8].

C. Evaluasi Konsumsi Energi Pompa

Tingkat konsumsi energi yang diperlukan oleh pompa dipengaruhi oleh sirkulasi air limbah yang masuk dan keluar dari instalasi. Beberapa parameter yang meliputi kadar nitrogen, kadar ammonia dan laju sirkulasi internal juga mempengaruhi konsumsi energi pompa. Model kalkulasi konsumsi energi pompa sesuai dengan persamaan (2).

$$PE = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=14} (0.004 \cdot Q_{rin}(t) + 0.008 \cdot Q_r(t) + 0.05 \cdot Q_w(t)) dt \tag{2}$$

Dimana PE adalah konsumsi energi pompa,  $Q_{rin}$  adalah laju sirkulasi internal,  $Q_r$  adalah laju aliran sampah buang yang kembali pada sistem sirkulasi dan  $Q_w$  adalah laju sampah buang hasil pemrosesan [8]. Pengendali nitrat melakukan manipulasi pada *flow splitter* untuk mengendalikan laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) [8]. Berdasarkan persamaan (2) performa pengendali nitrat berpengaruh secara langsung pada konsumsi energi pompa (PE). Peningkatan performa pengendali nitrat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konsumsi energi pompa (PE).

D. Evaluasi Konsumsi Energi Aerasi

Bagian aerasi adalah bagian dari instalasi pengolahan air limbah yang membutuhkan energi paling besar. Sekitar 56 % dari total energi keseluruhan yang diperlukan oleh instalasi pengolahan air limbah digunakan untuk proses aerasi [21]. Proses aerasi dilakukan di tangki aerasi (unit3,unit4,unit5). Proses aerasi diperlukan untuk melakukan nitrifikasi [13]. Salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat konsumsi energi aerasi adalah laju sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ). Laju perputaran ammonium pada sirkulasi internal ( $Q_{rin}$ ) mempengaruhi konsumsi energi pada bagian aerasi. Model dari perhitungan tingkat konsumsi energi aerasi adalah sesuai dengan persamaan (3).

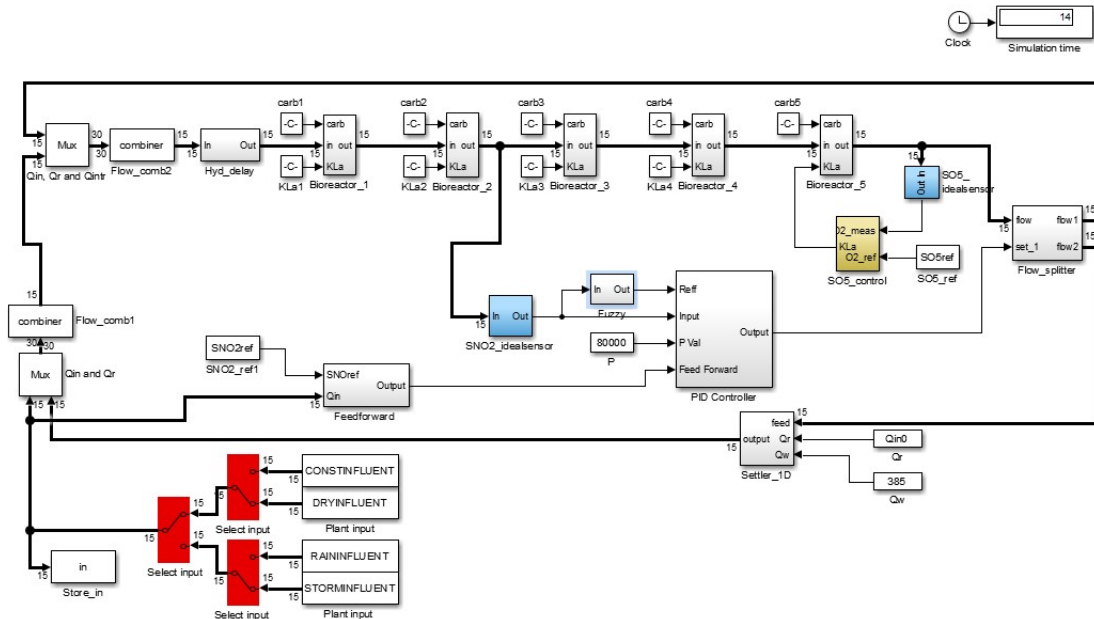
$$AE = \frac{S_{\dot{O}}^{sat}}{T \cdot 1.8 \cdot 1000} \int_{t=0}^{t=14} \sum_{i=1}^5 v_i \cdot K_L a_i(t) \cdot d(t) \tag{3}$$

Dimana  $AE$  adalah konsumsi energi listrik yang digunakan untuk proses aerasi,  $S_0^{sat}$  kadar saturasi oksigen terlarut,  $v_i$  adalah volume tangki, dan  $K_L a_i$  adalah koefisien aerasi [8].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model BSM1 (*Benchmark Simulation Model No.1*) berbasis Matlab Simulink telah digunakan pada penelitian ini. Model BSM1 adalah model simulasi standar yang digunakan *International Water Association* (IWA) untuk menganalisis dan mengevaluasi keseluruhan parameter yang

mempengaruhi performa dari instalasi pengolahan air limbah [22]. Pada penelitian ini model BSM1 digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi performa pengendali nitrat dan kualitas cemaran yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan air limbah. Model BSM1 terdiri dari 5 kompartemen reaktor *activated sludge* yang dibagi menjadi 2 unit tangki anoxic dan 3 unit tangki aerasi. Masing - masing tangki memiliki volume  $6000 m^3$ . Model plant dirancang dengan laju cemaran rata-rata  $18.446 m^3/hari$  pada cuaca kering [5].



Gambar 9. Model Benchmark Simulation Model No.1(BSM1)

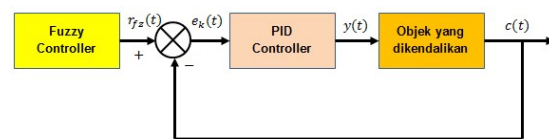
Pada model BSM1 menggunakan 2 jenis pengendali yaitu pengendali nitrat dan pengendali oksigen terlarut (*dissolved oxygen*). Pengendali oksigen terlarut digunakan untuk mengendalikan konsentrasi oksigen di tangki aerasi sebesar  $2 mg N/L$ . Pengendali nitrat digunakan untuk mengendalikan kadar nitrat pada tangki anoxic kedua sebesar  $1 mg N/L$ . Pada umumnya pengendali nitrat yang telah ada menggunakan pengendali PID dengan model seperti pada persamaan (4).

$$y(t) = K_p \cdot e_k + K_i \int_0^t |e_k| dt + K_d \frac{de_k}{dt} \tag{4}$$

$$e_k = Z_k^{setpoint} - Z_k^{measure}$$

Dimana  $e_k$  adalah *error* yang terjadi pada saat pengendalian nitrat.  $K_p, K_i, K_d$  adalah koefisien *proportional, integral* dan *derivative*. Implementasi pengendali berbasis PID pada pengendali nitrat, menghasilkan respon yang ditunjukkan pada Gambar 8.

Implementasi pengendali nitrat berbasis PID menghasilkan *overshoot* yang cukup signifikan. Kadar nitrat yang tidak stabil mempengaruhi kualitas cemaran yang dihasilkan dan kebutuhan konsumsi energi listrik. Kadar nitrat yang terlalu tinggi akan berakibat pada penurunan kualitas cemaran yang dihasilkan. Sebaliknya, kadar nitrat yang terlalu rendah akan menyebabkan meningkatnya konsumsi energi listrik yang berimbas pada naiknya biaya operasional. Implementasi pengendali PID konvensional pada sistem nonlinear yang memiliki tunda signifikan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan stabil [23]. Untuk mengatasi masalah tersebut, implementasi kombinasi pengendali berbasis PID dan logika fuzzy digunakan pada penelitian ini.



Gambar 10. Struktur Algoritma Pengendali Nitrat Berbasis Fuzzy-PID

Pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID berprinsip pada pemanipulasian nilai *set point* ( $r_{fz}$ ) pengendali PID oleh pengendali Fuzzy yang bertujuan untuk mengurangi *overshoot* kadar nitrat. Representasi model kendali Fuzzy-PID secara matematis adalah seperti pada persamaan (5).

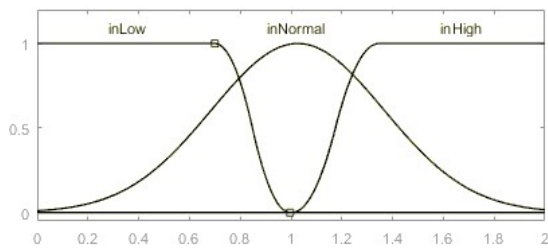
$$y(t) = K_p \cdot e_k + K_i \int_0^t |e_k| dt + K_d \frac{de_k}{dt} \quad (5)$$

$$e_k = r_{fz}(t) - c(t)$$

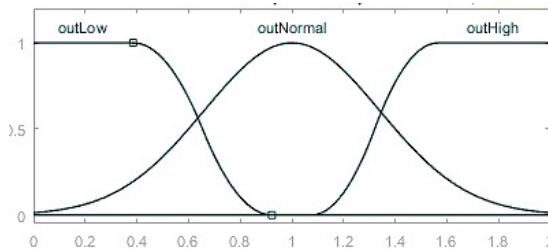
Proses manipulasi *set point*  $r_{fz}(t)$  pada pengendali PID dilakukan oleh pengendali fuzzy dengan aturan sebagai berikut ini.

if (input is inNormal) then (output is outNormal)  
 if (input is inLow) then (output is outHigh)  
 if (input is inHigh) then (output is outLow)

Untuk fungsi *membership* masukan dan keluaran didefinisikan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Fungsi Membership Masukan Pengendali Fuzzy

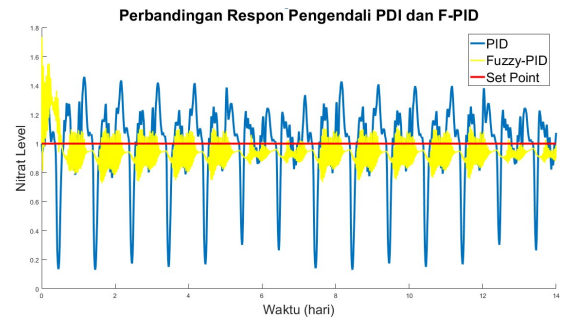


Gambar 12. Fungsi Membership Keluaran Pengendali Fuzzy

Kombinasi fungsi *membership* jenis Z-shape, Gaussian dan S-Shape telah digunakan pada bagian input dan output Fuzzy. Kombinasi dari tiga fungsi *membership* tersebut diharapkan dapat memberikan respon perubahan *set point* ( $r_{fz}$ ) yang signifikan dan dalam waktu yang singkat, apabila kadar nitrat melampaui dari kadar normal yaitu sebesar 1 mg N/L.

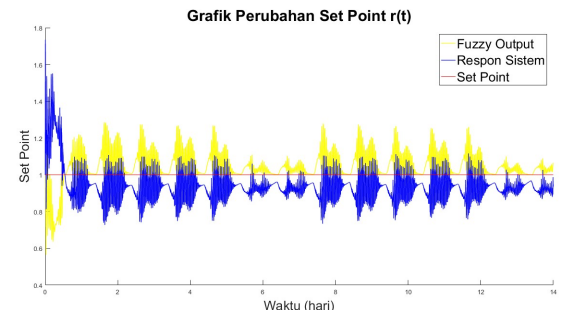
Pengujian pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID dan pengendali nitrat berbasis PID, dilakukan dengan menggunakan model BSM1. Skenario pengujian dilakukan dengan menggunakan data influent konstan tanpa gangguan selama 150 hari pada periode stabilisasi. Selanjutnya dilanjutkan dengan menggunakan data influent kering selama 14 hari

dengan waktu cuplik 15 menit [24]. Pengujian masing – masing pengendali nitrat dilakukan dengan skenario yang sama.



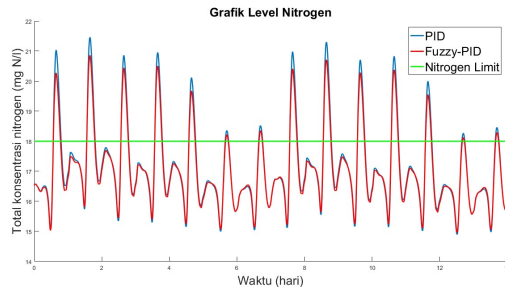
Gambar 13. Grafik Perbandingan Umpan Balik Nitrat Pada Pengendali Berbasis PID dan Fuzzy-PID

Implementasi pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID berhasil meredam *overshoot* kadar nitrat, mempercepat waktu penstabilan dan meningkatkan akurasi kendali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Pada pengendali PID konvensional digunakan koefisien proporsional  $K_p = 10000$  sedangkan pada pengendali berbasis Fuzzy-PID digunakan koefisien proporsional  $K_p = 80000$ . Pada pengendali berbasis Fuzzy-PID digunakan koefisien proporsional lebih besar guna mendapatkan respon perubahan yang lebih cepat. Penggunaan nilai koefisien proporsional  $K_p$  yang besar akan berdampak pada terjadinya *overshoot* [25]. Untuk mencegah terjadinya *overshoot* yang berlebihan, pengendali berbasis fuzzy akan memanipulasi *set point*  $r_{fz}(t)$ . Pengendali Fuzzy akan melakukan koreksi secara otomatis dengan memanipulasi nilai *set point*  $r_{fz}$  berdasarkan aturan yang telah ditetapkan.



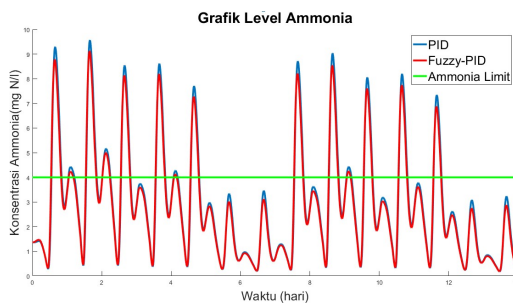
Gambar 14. Respon Sistem dan Perubahan Set Point

Dengan kadar nitrat yang lebih stabil maka dihasilkan kadar buang nitrogen yang lebih rendah. Implementasi pengendali nitrat berbasis PID konvensional menghasilkan kadar buang nitrogen sebesar 17.07 mg N/L. Sedangkan pada implementasi pengendali nitrat berbasis PID menghasilkan kadar buang nitrogen sebesar 16.9 mg N/L. Grafik perubahan kadar nitrat selama 14 hari tercantum pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik Perubahan Level Nitrogen Selama 14 Hari

Implementasi pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID juga memberikan efek penurunan kadar buang ammonia yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan air limbah. Implementasi pengendali nitrat berbasis PID konvensional menghasilkan kadar buang ammonia sebesar 2.95 mg N/L. Sedangkan implementasi pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID menghasilkan kadar buang ammonia yang lebih rendah yaitu sebesar 2.85 mg N/L. Grafik perubahan kadar ammonia selama 14 hari tercantum pada Gambar 16.



Gambar 16. Grafik Perubahan Level Ammonia Selama 14 Hari

Konsumsi energi listrik pada bagian pompa dan bagian aerasi juga mengalami penurunan. Pada strategi kendali nitrat berbasis PID konvensional, konsumsi energi listrik yang dibutuhkan bagian pompa dan bagian aerasi adalah 21375 kWh dan 101454 kWh. Pada strategi kendali nitrat berbasis Fuzzy-PID konsumsi energi listrik yang dibutuhkan bagian pompa dan bagian aerasi turun menjadi sebesar 21312 kWh dan 101324 kWh.

#### IV. PENUTUP

##### A. Kesimpulan

Kendali berbasis PID adalah sistem kendali yang umum digunakan pada instalasi pengolahan air limbah. Penggunaan kendali berbasis PID menyebabkan *overshoot* level nitrat yang signifikan pada pengendalian kadar nitrat. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan kadar buang nitrogen pada air hasil pengolahan. Meningkatnya kadar nitrogen mengakibatkan fenomena eutrofikasi yang berbahaya bagi lingkungan. Dengan mengimplementasikan kombinasi kendali berbasis Fuzzy dan PID pada tangki *anoxic*, didapatkan penurunan kadar cemaran dan penurunan konsumsi

energi listrik pada instalasi pengolahan air limbah. Kadar nitrogen dan ammonia berkurang sebesar 0.17 mg N/l (0.99%) dan 0.1 mg N/l (3.4%). Konsumsi energi listrik yang dibutuhkan instalasi pengolahan limbah selama 14 hari turun sebesar 193 kWh.

##### B. Saran

Pengendali nitrat berbasis Fuzzy-PID yang digunakan pada penelitian ini masih menggunakan metode penentuan  $K_p, K_i, K_d$  secara manual dan penentuannya didasarkan dengan proses *trial error*. Sehingga pada respon sistem masih timbul adanya osilasi. Sistem kendali adaptif diharapkan dapat mengatasi timbulnya osilasi dan meningkatkan kestabilan pengendalian.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Publikasi ini merupakan bagian dari penelitian yang dilakukan dengan kerjasama dari South China University of Technology, Guangzhou, China. Terima kasih kepada Fakultas Automation Science and Engineering, South China University of Technology atas sumber daya yang diberikan. Terima kasih secara khusus diberikan kepada Prof. Huang DaoPing dan Dr. Liu YiQi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] V G Gude, "Energy and water autarky of waste water treatment and power generation system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 52-68, 2015.
- [2] G V Gnaneswar, "Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat source," *Appl Energy*, pp. 77-98, 2015.
- [3] China Water Risk. (2014) [www.chinawaterrisk.org](http://www.chinawaterrisk.org). [Online]. [www.chinawaterrisk.org](http://www.chinawaterrisk.org)
- [4] Zhang Wenqiang, Jin Xin, Liu Dong, Lang Chao, and Shan Baoqing, "Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river- Fuyang River in northern China," *Journal of Environmental Sciences*, pp. 2-7, 2016.
- [5] International Water Association, *The description of Benchmark Simulation Model*: International Water Association, 2004.
- [6] Haimi Henri, Mulas Michela, and Vahala Riku, "Process automation in Wastewater Treatment Plants: the Finnish experience," *Official Publication of the European Water Association (EWA)*, pp. 1-17, 2010.
- [7] S Wenshao, C Xiaochuan, and P C Jean, "Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process," *Computer and Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 2849-2856, 2008.
- [8] Alex Jen, Benedetti Lorenzo, Copp John, and V Kris, *Benchmark Simulation Model no.1(BSM1)*, 2008.
- [9] Vilanova Ramon, Katebi Reza, and Wahab NoraLiza, "N-Removal on Wastewater Treatment Plants: A Process Control Approach," *Journal of Water*

- Resource and Protection*, pp. 1-11, 2011.
- [10] M Sustarsic, "Waste water treatment : Understanding the activated sludge process," *Safety in ammonia Plants and related facilities symposium*, pp. 26-29, 2009.
- [11] A Water, *Biological Nutrient Removal*. Washington, United States: United States Environmental Protection, 2007.
- [12] S Jeyanayagam, "True Confessions of the Biological Nutrient Removal Process," *Florida Water Resource Journal*, 2005.
- [13] L T Hao and C Hongping, "Nitrification at full-scale municipal wastewater treatment plants: Evaluation of inhibition and bioaugmentation of nitrifiers," *Biosure Technology*, pp. 76-81, 2015.
- [14] L Viktor, *Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish Waste Water Treatment Plant*. Sweden: Upsalla Universitet, 2011.
- [15] I Smets, "Analysis and synthesis of mathematical algorithms for optimization and control of complex (bio) chemical conversion processes," Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, Ph.D. Thesis 2002.
- [16] S Wenhao, T Erpan, and L Tianlong, "Study of Composite Fuzzy Control of Dissolved Oxygen in a Sequencing Batch Reactor Pilot Process of Synthetic Papermaking Wastewater," *International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1262-1267, 2012.
- [17] B Holanda, E Domoskos, A Redey, and J Fazakas, "Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 1270-1278, 2007.
- [18] K S Holkar and L M Waghmare, "An Overview of Model Predictive Control," *International Journal of Control and Automation*, vol. 3, pp. 47-64, 2010.
- [19] V M Cristea, P Christian, and S A Paul, "Model Predictive Control of the Waste Water Treatment Plant Based on the Benchmark Simulation Model No.1-BSM1," *18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp. 1-6, 2008.
- [20] I Santin, C Pedret, and R Villanova, "Fuzzy Control and Model Predictive Control Configurations for Effluent Violations Removal in Wastewater Treatment Plants," *I&EC Research*, pp. 2763-2775, 2015.
- [21] Gutama Indra Gandha and Yiqi Liu, "Control of WWTP Integrating Model Predictive Control with Fuzzy Theory," South China University of Technology, Guangzhou, China, Master Thesis 2015.
- [22] J Alex et al., "Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants," in *ECC'99(European Control Conference)*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [23] Dong Shu-cheng, Jiang Feng-xin, Chen Jie, Zhang Hong-fei, and Wang Jian, "Fuzzy-PID Based Heating Control System," *Senior Member, IEEE*, May 2016.
- [24] Santin Ignacio, Pedret Carles, and Vilanova Ramon, "Control strategies for ammonia violations removal in BSM1 for dry, rain and storm weather conditions," *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 577-582, 2015.
- [25] S Kim K, C Kim Y, H Keel L, and P Bhattacharyya S, "PID controller design with time response specifications," *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, June 2003.