

Desain Pengendalian pintu Air Dengan Metode *Ensemble Kalman Filter* dan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC)

Fendi Ferdiansyah dan Erna Apriliani
Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: april@matematika.its.ac.id

Abstrak— Sungai Brantas sangat berpotensi banjir karena sepanjang sungai ini sudah dimanfaatkan sebagai pemukiman yang padat. Untuk mengontrol laju aliran sungai agar tidak terjadi banjir maka dibangun sebuah bendungan. Dibutuhkan suatu pengendali agar pintu air dapat membuka dan menutup secara otomatis agar laju aliran air sungai dapat dikontrol dengan baik. Pada tugas akhir ini Metode *ensemble Kalman filter* akan digunakan untuk mengestimasi ketinggian air sungai yang akan dijadikan sebagai *input* untuk pengendali. Metode *fuzzy sliding mode control* yang merupakan gabungan dari *sliding mode control* dan *fuzzy logic control* digunakan sebagai sistem pengendali pintu air. Estimasi ketinggian air dan debit air menggunakan persamaan St. Venant yang berbentuk kontinu dan akan didiskritisasi menggunakan beda hingga maju dan beda hingga tengah sehingga persamaan tersebut menjadi bentuk *state space* dari metode *ensemble Kalman filter*. Dan hasil dari estimasi ketinggian air dan debit air menggunakan *ensemble Kalman filter* memiliki tingkat keakuratan yang sangat baik karena error yang dihasilkan dari EnKf sangat kecil. Selanjutnya, dari hasil estimasi debit air akan digunakan untuk *input* pengendalian pintu air menggunakan *fuzzy sliding mode control*. Dengan menentukan fungsi keanggotaan dan menentukan aturan fuzzy untuk *control input* OP, maka dapat dihitung ketinggian air yang sudah dikontrol dengan metode *fuzzy sliding mode control*. Dan hasil dari pengendalian ketinggian air, pengendali *fuzzy sliding mode control* mampu bekerja dengan baik dengan debit air yang tinggi, sedang maupun rendah dan error yang dihasilkan kurang dari 0,1 meter.

Kata Kunci---Pintu Air pada Bendungan, Pengendalian, Kalman filter, *fuzzy sliding mode control* (FSMC)

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara maritim yang luas wilayahnya sebagian besar adalah perairan. Perairan di Indonesia meliputi laut, danau dan sungai. Meskipun pulau Jawa merupakan pulau yang paling padat penduduknya dibandingkan pulau lain di Indonesia, pulau Jawa mempunyai banyak perairan sungai yang melintasi beberapa kota-kota dan daerah-daerah. Salah satunya adalah sungai Brantas. Sungai Brantas merupakan salah satu sungai yang terpanjang di pulau Jawa.

Sungai Brantas terletak di Propinsi Jawa Timur pada 110°30' BT sampai 112°55' BT dan 7°01' LS sampai 8°15' LS.

Sungai Brantas mempunyai panjang ± 320 km dan memiliki luas wilayah sungai ± 14.103 km² yang mencakup $\pm 25\%$ luas propinsi Jawa Timur atau $\pm 9\%$ luas pulau Jawa. Sungai Brantas terdiri dari 4 (empat) Daerah Aliran Sungai (DAS) yaitu DAS Brantas, DAS Tengah dan DAS Ringin Bandulan serta DAS Kondang Merak [1]. Sungai Brantas sangat berpotensi banjir yang akan menelan korban maupun kerugian akibat curah hujan yang tinggi. Hal ini disebabkan karena sepanjang sungai ini sudah banyak sekali dimanfaatkan sebagai pemukiman yang padat. Daerah tangkapan (*catchment area*) atau DAS dari Sungai Brantas mencapai 11.000 km².

Di kabupaten Mojokerto sungai ini bercabang ke Surabaya yang disebut sebagai Kalimas dan ke Porong yang disebut kali Porong. Karena daerah Mojokerto ini memiliki curah hujan yang cukup tinggi, maka di kabupaten Mojokerto tepatnya di desa Lengkong, kecamatan Mojoanyar dibangun sebuah bendungan untuk mengatur ketinggian air sungai brantas dan mengontrol laju aliran air yang akan bermuara ke kalimas (Surabaya) dan kali Porong. Bendungan ini dinamakan bendungan Rolak Songo. Dinamakan Rolak Songo karena bendungan ini memiliki menara pengawas pintu air yang berjumlah 9. Namun, pengaturan buka-tutup pintu air masih dioperasikan secara manual oleh perum jasa tirta (PJT). Sistem pengoperasian pintu yang optimal akan sangat mempengaruhi pengurangan dampak banjir pada Sungai Brantas. Agar debris aliran air tetap dalam kondisi yang tetap (stabil) sehingga dapat meminimalkan terjadinya banjir maka dibutuhkan sebuah pengendali agar pintu air tersebut dapat membuka dan menutup secara otomatis.

Penelitian telah dilakukan oleh Zhou, Thoresen, & Glemmstad pada tahun 2012 tentang Application of kalman filter based nonlinear MPC for flood gate control of hydropower plant. Dalam penelitiannya mereka meneliti tentang pengoperasian buka-tutup pintu air untuk mengontrol aliran air yang nantinya digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air (PLTA) (Zhou, dkk., 2012). Kemudian penelitian dari Zhou, Thoresen, & Glemmstad dilanjutkan oleh Purnaningrum yang meneliti tentang pengendalian pintu air bendung gerak dengan metode ensemble Kalman filter

berbasis NMPC. Pada penelitian tersebut, Metode Ensemble Kalman Filter (EnKf) digunakan untuk memprediksi ketinggian air dan debit air saat mencapai bendungan yang selanjutnya akan digunakan sebagai input untuk mengendalikan pintu air.

Metode *ensemble* Kalman filter dan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) akan diaplikasikan pada pintu air sebagai pengendali. Dengan metode *ensemble* Kalman filter digunakan sebagai estimasi debit dan ketinggian air sungai yang nantinya sebagai *input* untuk pengendali pintu air. Sedangkan *fuzzy sliding mode control* digunakan sebagai pengendali. Prinsip kendali didasarkan pada penggabungan dan perubahan parameter yang bersifat robust dan stabil terhadap gangguan dan perubahan parameter dengan *fuzzy logic controller* (FLC) yang memiliki sifat kendali yang halus.

II. KAJIAN TEORI

2.1. Model Hidrodinamik 1D pada Saluran Terbuka

Hidrodinamika adalah ilmu yang mempelajari gerakan air dan gaya yang bekerja pada air. Persamaan model hidrodinamik memiliki bentuk satu dimensi (1D), dua dimensi dan tiga dimensi. Dalam persamaan satu dimensi didefinisikan pada satu koordinat ruang.

Pada model hidrodinamik 1D terdapat dua persamaan model yaitu persamaan kontinuitas dan persamaan momentum. Persamaan kontinuitas dan persamaan momentum [2] didefinisikan sebagai berikut:

1. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (1)$$

Dengan:

A = luas penampang sungai

Q = debit aliran sungai

q = aliran masuk per satuan panjang diasumsikan tidak ada aliran lateral sehingga $q = 0$

2. Persamaan momentum

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \quad (2)$$

Dengan:

y = Ketinggian level air sungai

K = Hydro-modulus

α = koefisien koreksi momentum

g = percepatan gravitasi

2.2. Bendungan

Pada umumnya bendungan dibagi menjadi dua jenis, yaitu bendungan tetap dan bergerak. Pada bendungan gerak terdiri dari beberapa bagian, yaitu *reservoir* yang digunakan untuk menampung air dan pintu air yang digunakan untuk mengalirkan air secara bertahap dan berkelanjutan sesuai yang diinginkan.

Pada model *reservoir*, luas permukaan tergantung pada ketinggian air pada waktu tertentu yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut adalah [3]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3)$$

$$Q_{out} = Q_P + Q_G$$

Dimana :

H : Ketinggian air waduk (m)

A : Luas permukaan air (m²)

Q_{in} : Rata-rata aliran masuk waduk (m³/s)

Q_{out} : Rata-rata aliran keluar waduk (m³/s)

Q_P : Rata-rata aliran untuk produksi (m³/s)

Q_G : Rata-rata aliran yang melewati pintu air (m³/s)

Model tersebut diterapkan pada *reservoir* yang digunakan untuk pembangkit listrik. Untuk *reservoir* yang tidak digunakan sebagai pembangkit listrik dapat dikatakan bahwa :

$$Q_P = 0$$

Sedangkan pintu air digunakan untuk mengendalikan ketinggian air pada suatu *reservoir* secara bertahap dan berkelanjutan agar tetap pada kondisi yang aman. Model matematika dari pintu air merupakan persamaan non linear yang dinyatakan oleh [3]:

$$Q_G = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (4)$$

$$\Delta H = H_U - H_D$$

Dimana :

A_G : Total luas bagian pintu air (m²)

OP : Pembukaan pintu air (%)

g : Percepatan gravitasi (m²/s)

ΔH : Selisih muka air di hulu dan hilir

H_U : Ketinggian air di hulu sungai

H_D : Ketinggian air di hilir sungai (m)

2.3. Ensemble Kalman Filter

Metode *ensemble* Kalman filter merupakan metode estimasi hasil dari modifikasi algoritma Kalman filter yang dapat digunakan untuk mengestimasi model sistem linear maupun nonlinear. Pada tahap prediksi, sejumlah *ensemble* diprediksi secara individual dengan model nonlinear, dan dalam langkah analisis persamaan diperbaharui berdasar pada persamaan linier dengan Kalman filter. Rata-rata dan kovarian dari *ensemble* perbaruan memberikan estimasi pada variabel dan *error* kovarian masing-masing

Secara umum bentuk dari sistem dinamik stokastik nonlinear pada EnKF adalah sebagai berikut:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (5)$$

Dengan pengukuran data nonlinear z_k :

$$z_k = H_k x_k + v_k$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$$

Dengan x_k adalah variabel keadaan pada waktu ke- k , u_k adalah vektor masukan, z_k adalah data pengukuran, H_k adalah matriks pengukuran yang menunjukkan variabel yang diukur, menghubungkan antara variabel keadaan x_k dan data pengukuran z_k . Dan w_k, v_k adalah *white noise* dari pengukuran dengan rata-rata 0 dan kovarian Q, R .

2.4. Sliding Mode Control

Sliding Mode Control (SMC) merupakan suatu bentuk pendekatan robust control yang penting, karena SMC adalah metode pengendalian yang bekerja secara *robust*. Untuk

menjaga agar sistem tetap terkendali, SMC memanfaatkan kestabilan Lyapunov [4].

Suatu sistem dinamis yang dinyatakan oleh [5] :

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = f(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t) \cdot u + d(t)$$

Dimana u adalah *control input*, \mathbf{x} yang merupakan vektor keadaan, $f(\mathbf{x}, t)$ dan $b(\mathbf{x}, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika \mathbf{x}_d merupakan \mathbf{x} yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh :

$$e(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d$$

Fungsi *switching* memenuhi persamaan [5]:

$$S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$$

Dengan λ berupa konstanta positif dan n merupakan orde dari sistem. Fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*.

Jika nilai $S(\mathbf{x}, t) = 0$, maka fungsi *switching* diatas dapat disebut sebagai permukaan *sliding* (*sliding surface*). Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal menuju keadaan yang diinginkan [5].

Untuk menentukan *control law* agar sistem tetap pada permukaan *sliding*, maka dapat digunakan fungsi yang mirip dengan fungsi Lyapunov yang dinyatakan

$$V = \frac{1}{2} S^2$$

Dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S = 0$. Kondisi kestabilan sistem didefinisikan sebagai turunan pertama dari persamaan diatas, sehingga diperoleh:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (6)$$

Pertidaksamaan (6) disebut kondisi *sliding* yang dapat dinyatakan sebagai :

$$\dot{S} \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta$$

dengan η merupakan konstanta positif dan fungsi *sgn* (*signum*) didefinisikan sebagai :

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & , x < 1 \\ 1 & , x \geq 1 \end{cases}$$

2.5. Fuzzy Logic Control

Fuzzy *logic control* (FLC) merupakan penerapan teori himpunan fuzzy pada bidang pengendalian sistem. Teori himpunan fuzzy pertama kali dikenalkan oleh Zadeh (1965) dan Goguen (1967, 1969) dengan menunjukkan cara untuk memperluas konsep himpunan klasik dan pernyataan yang mencakup kefuzzyan. Pengendali fuzzy (*fuzzy controller*) umumnya bekerja secara *heuristic* (*trial and error*) dan berdasarkan pengalaman manusia. Suatu pengendali fuzzy (*fuzzy logic controller*) tersusun dari empat buah komponen yang bekerja bersamaan dan dapat diuraikan sebagai:

1. *Rule-base*, berisi sekumpulan aturan fuzzy dalam mengendalikan sistem.
2. *Interference mechanism*, mengevaluasi aturan kontrol yang relevan dan mengambil keputusan masukan yang akan digunakan untuk plant.
3. Fuzzifikasi, mengubah masukan sehingga dapat digunakan pada aturan di *rule-base*, dari nilai *crisp* menjadi nilai fuzzy.
4. Defuzzifikasi, mengubah kesimpulan yang diperoleh dari *interference mechanism* menjadi masukan plant, dari nilai fuzzy menjadi nilai

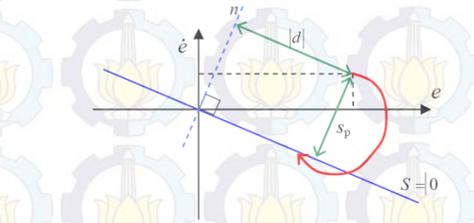
2.6. Fuzzy Sliding Mode Control

Untuk memperbaiki sistem SMC, dilakukan modifikasi pada SMC dengan menggunakan FLC. Modifikasi ini umumnya disebut sebagai *fuzzy sliding mode control* (FSMC) atau *sliding mode fuzzy logic control* (SMFLC). Penggabungan dua metode ini dapat dilakukan karena kesamaan antara metode SMC dan FLC, yaitu mempunyai sifat diagonalitas [6].

Perancangan pengendali FSMC bekerja sebagaimana SMC, yaitu menggunakan sebuah permukaan *sliding*. Oleh karena itu, tetap digunakan fungsi *switching* untuk menentukan besarnya nilai u . pada FSMC, besarnya u diperoleh dari aturan fuzzy dengan bentuk

$$R_i^j: \text{jika } s = LS_i \text{ dan } d = LD_i \text{ maka } u = LU_i$$

dimana s adalah jarak antara vektor keadaan dan permukaan *sliding*, dan d adalah jarak antara vektor keadaan dan vektor normal ke permukaan *sliding* dimana vektor normal melalui titik asal dari ruang keadaan.



Gambar 1. Interpretasi Grafis dari S_p dan d [4]

Dengan demikian S_p dan d dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

$$d = \sqrt{e^2 - S_p^2}$$

Dengan aturan fuzzy untuk FSMC S_p dan d dapat dinyatakan oleh tabel berikut:

Tabel 1. Aturan Fuzzy sebagai Sistem Pengendali FSMC [6]

		S_p							
		NB	NM	NS	PZ	NZ	NS	NM	NB
d	B	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
	M	PB	PB	PB	PM	NM	NB	NB	NB
	S	PB	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NB
	Z	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB

N – Negatif S – Small B – Big
P – Positif M – Medium Z – Zero

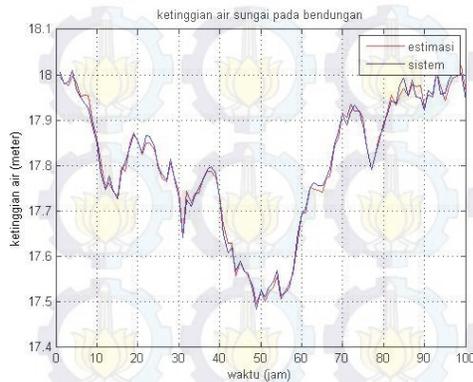
III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui bagaimana hasil estimasi ketinggian air dan debit air serta bagaimana pengendalian pintu air dengan metode FSMC dapat berpengaruh dalam mengendalikan ketinggian air maka dibutuhkan sebuah simulasi dari permasalahan yang telah dijelaskan sebelumnya. Dengan menggunakan data yang didapat dari perum Jasa Tirta I tentang profil sungai brantas dan bendungan lengkung baru didapatkan parameter sebagai berikut:

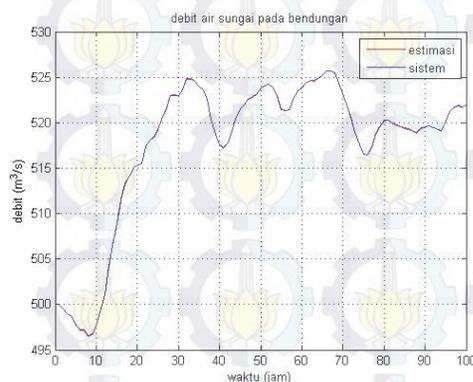
Tabel 2. Parameter yang digunakan untuk simulasi.

No.	Variabel	simbol	nilai
1.	Koefisien manning	N	0.05
2.	Lebar sungai	B	151
3.	Tampang basah sungai	P	200
4.	Panjang sungai	X	16.000
5.	Epsilon	ϵ	0.3
6.	Luas total pintu air	A_g	440
7.	Lambda	λ	1.9
8.	Gravitasi bumi	g	9,8
9.	Ketinggian air yang diinginkan	Hd	17,9
10.	Ketinggian air setelah melewati pintu air	ZD	16.5

Dengan menggunakan Tabel parameter yang telah diketahui diatas, dilakukan simulasi untuk Estimasi ketinggian dan debit air pada sungai Brantas sebelum mencapai bendungan lengkung baru. Untuk simulasi yang pertama menggunakan ketinggian awal 18 meter dan debit $500m^3/s$. Ketinggian dan debit air ini masih tergolong normal untuk bendungan lengkung baru. Berikut adalah hasil estimasi ketinggian air dan debit air yang berada pada bendungan lengkung baru.



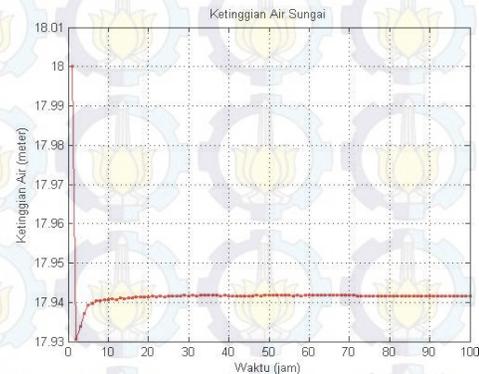
Gambar 2. Estimasi Ketinggian Air pada Aliran Air Normal



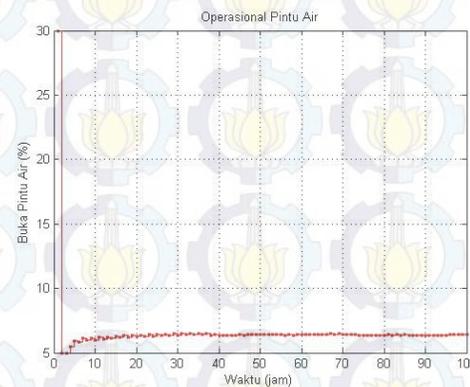
Gambar 3. Estimasi Debit Air pada Aliran Air Normal

Gambar 2 dan 3 adalah hasil simulasi estimasi menggunakan metode *ensemble* Kalman filter. Dari hasilnya didapatkan ketinggian dan debit air yang masih normal yang berkisar antara 17,5 meter sampai 18 meter dan debit air berkisar antara 497 sampai $526m^3/s$. Untuk mengetahui bagus tidaknya hasil dari estimasi dengan mencari error. Pada tugas akhir ini digunakan metode root mean square error (RMSE).

Dengan menjalankan simulasi dari *ensemble* Kalman filter secara berulang-ulang sehingga pada saat simulasi akan muncul RMSE pada tiap simulasi kemudian dicari rata-ratanya. Sehingga diperoleh RMSE untuk ketinggian air sebesar 0,01101 dan RMSE untuk debit air sebesar 0,0264. Hasil dari estimasi debit air selanjutnya menjadi inputan untuk pengendalian pintu air dengan metode FSMC.



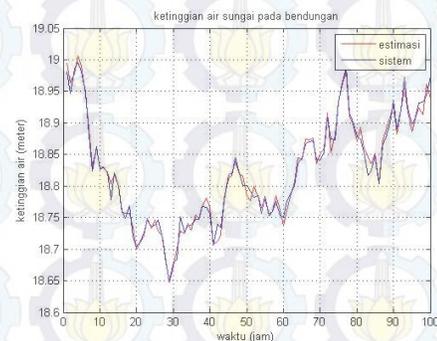
Gambar 4. Hasil Pengendalian Ketinggian Air pada Aliran Air Normal



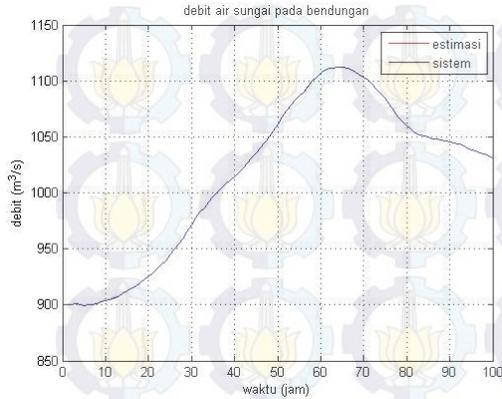
Gambar 5. Besar Buka Tutup Pintu Air pada Aliran Air Normal

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali FSMC mampu mengendalikan ketinggian dan debit air normal pada 17,94 meter. Keadaan ini bisa dikatakan stabil karena ketinggian air tidak mengalami kenaikan atau penurunan ketika sudah mencapai ketinggian 17,94 meter.

Pada simulasi yang kedua digunakan ketinggian air dan debit air di awal yang tinggi. Dengan ketinggian awal sebesar 19 meter dan debit air sebesar $900m^3/s$. Dengan hasil seperti berikut.



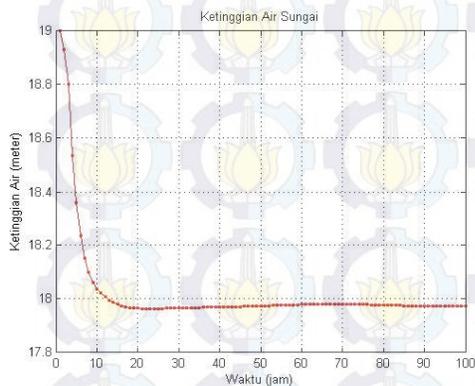
Gambar 6. Estimasi Ketinggian Air pada Aliran Air yang Tinggi



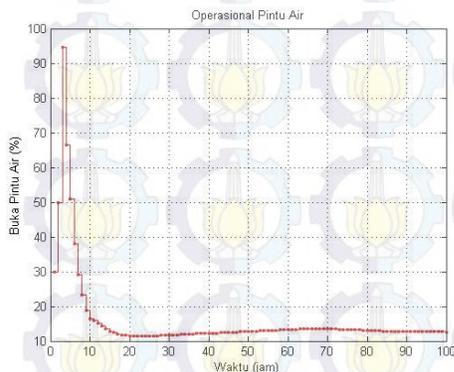
Gambar 7. Estimasi Debit Air pada Aliran Air yang Tinggi

Gambar 6 dan 7 adalah hasil simulasi dari estimasi ketinggian air dan debit air dengan ketinggian awal sebesar 19 meter dan debit awal sebesar $900 \text{ m}^3/\text{s}$. Hasil estimasi ketinggian air menunjukkan ketinggian tidak sampai mengalami banjir karena masih dibawah 19,2 meter meskipun debit airnya telah mencapai $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Selanjutnya dicari error dari estimasi ketinggian dan debit air seperti pada simulasi yang pertama. Diperoleh RMSE untuk ketinggian air sebesar 0,03253 dan RMSE untuk debit air sebesar 0,02754.

Seperti halnya pada simulasi yang pertama, hasil dari estimasi debit air akan digunakan sebagai input untuk pengendalian pintu air. Sehingga diperoleh hasil seperti berikut.



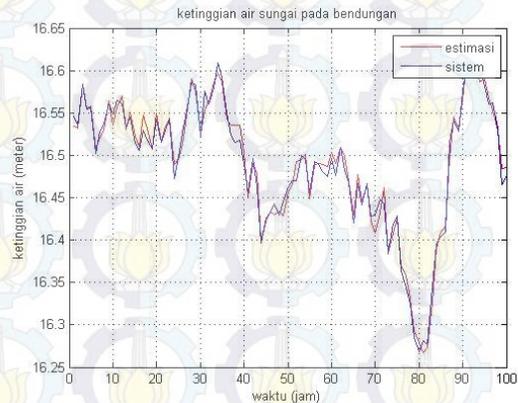
Gambar 8. Hasil Pengendalian Ketinggian Air pada Aliran Air yang Tinggi



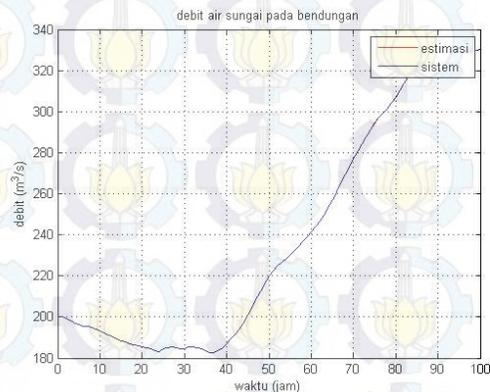
Gambar 9. Operasional Pintu Air pada Aliran Air yang Tinggi

Dari grafik hasil simulasi untuk pengendalian ketinggian air dapat dilihat bahwa dengan ketinggian awal 19 meter dan debit yang tinggi, FSMC masih mampu untuk mengendalikan ketinggian air sehingga ketinggian air turun hingga ketinggian mencapai angka 17,98 meter. Pada simulasi yang kedua, kestabilan cukup baik, namun error yang dihasilkan sebesar 0,08.

Untuk simulasi yang ketiga akan dijelaskan bagaimana hasil dari estimasi dan pengendalian pintu air pada ketinggian awal dan debit awal yang rendah dengan ketinggian awal 16,5 meter dan debit air $200 \text{ m}^3/\text{s}$

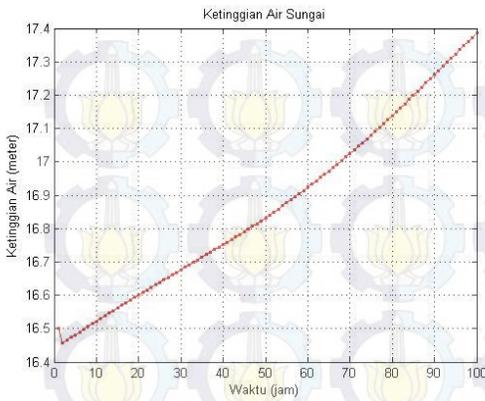


Gambar 10. Estimasi Ketinggian Air pada Aliran Air Rendah

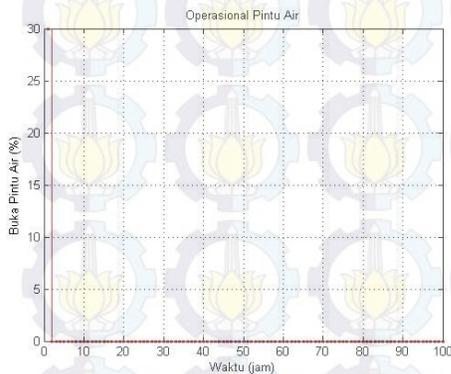


Gambar 11. Estimasi Debit Air pada Aliran Air rendah

Dari grafik didapatkan ketinggian yang tidak terlalu banyak berubah dengan ketinggian dari 16,25 sampai 16,6 meter. Sedangkan untuk debit air mengalami peningkatan hingga $340 \text{ m}^3/\text{s}$. Dari simulasi yang ketiga ini didapatkan RMSE untuk ketinggian air sebesar 0,00974 dan RMSE untuk debit sebesar 0,1224



Gambar 12. Hasil Pengendalian Ketinggian Air pada Aliran Air rendah



Gambar 13. Operasional Pintu Air pada Aliran Air Rendah

Dari hasil pengendalian pintu air menggunakan FSMC ketika ketinggian air lebih kecil dari ketinggian yang diinginkan maka pintu air akan menutup 100% hingga air naik sampai ketinggian yang diinginkan. Dalam kasus ini karena debit air sangat kecil maka ketinggian air tidak bisa mencapai ketinggian yang diinginkan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis terhadap hasil simulasi estimasi menggunakan metode EnKf dan pengendalian pintu air menggunakan fuzzy sliding mode control, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan metode *ensemble* Kalman filter Estimasi ketinggian air dan debit air cukup bagus dikarenakan Root Mean Square Error sangat kecil sehingga tidak jauh beda dalam pengukuran untuk ketinggian awal dan debit awal berapapun yang ingin dimasukkan.
2. Desain pengendalian FSMC merupakan *control input OP* yang diperoleh dari hasil fuzzyfikasi dengan masukan S_p dan d yang dapat mengatur besar buka tutup pintu air dengan otomatis.
3. Dari hasil analisa pengendalian pintu air dengan metode FSMC diperoleh bahwa:
 - a) Ketika debit air normal, pengendali FSMC bekerja dengan baik dan mampu mengendalikan ketinggian air sesuai dengan ketinggian yang diinginkan. Ketika

debit air normal FSMC menghasilkan error sekitar 0,04 meter atau 4 cm.

- b) Ketika debit air tinggi, FSMC juga mampu mengendalikan pintu air sehingga ketinggian turun hingga ketinggian yang diinginkan. Dalam kasus ini error yang dihasilkan sebesar 0,09 meter atau sekitar 9 cm
- c) Ketika debit air rendah dan ketinggian dibawah ketinggian yang diinginkan, FSMC melakukan pengendalian dengan menutup pintu air hingga ketinggian naik sampai mencapai ketinggian yang diinginkan, karena debit yang dimasukkan tergolong rendah, ketinggian air tidak bisa mencapai ketinggian yang diinginkan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1.] Keputusan Menteri Pekerjaan Umum No. 268/KPTS/M/2010 tentang *Pola Pengelolaan Sumber daya Air Wilayah Sungai Brantas*.
- [2.] Purnaningrum, E. (2014). *Pengendalian Pintu air Bendung Gerak Dengan Metode Ensemble Kalman Filter Berbasis Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)*. Surabaya: Jurusan Matematika, FMIPA ITS.
- [3.] Zhou, W., Thoresen, H. M., & Glemmstad, B. (2012). *Application of Kalman Filter Based Nonlinear MPC for Flood Gate Control of Hydropower Plant*. Power and Energy Society General Meeting, Hal. 1-4.
- [4.] Rizan, R. I. (2008). *Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control*. Surabaya: Jurusan Matematika, FMIPA ITS
- [5.] Perruquetti, W. dan Barbot, J.P. 2002. *Sliding Mode Control in Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [6.] Palm, R., Driankov, D., dan Hellendoorn, H. 2013. *Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers*. Berlin: Springer-Verlag.