

POLA OPERASI WADUK BENDO DENGAN MODEL FUZZY STOCHASTIC DYNAMIC PROGRAMMING

Anggara WWS

Dosen Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
email: anggara.wws@ub.ac.id

Abstrak Pola operasi waduk untuk mendapatkan lepasan waduk yang optimal telah lama diteliti selama bertahun-tahun. Berbagai teknik telah dikembangkan dan diaplikasikan untuk pola operasi waduk dalam hubungannya dengan ketidakpastian akibat sifat stokastik pada tiap objective yang berada dalam operasi waduk serta akibat ketidaktepatan nilai tujuan pada setiap fungsi kegunaan waduk.

Model fuzzy stochastic dynamic programming digunakan untuk mengkalkulasi lepasan waduk yang optimal dari operasi waduk multipurposes. Untuk menjabarkan sebuah pola operasi untuk waduk multipurpose maka dibuat sistem pola operasi dengan menggunakan model stokastik dinamik. Pola operasi ini dibuat dengan berdasarkan kepada lepasan waduk optimum untuk setiap operasi waduk yang dihasilkan dari metode fuzzy stochastic dynamic programming. Model fuzzy rule base berdasar pada prinsip "IF-THEN", dimana "IF" adalah sebab dan "THEN" adalah fuzzy consequences.

Volume tampungan waduk, estimasi inflow, dan kebutuhan digunakan sebagai sebab dan lepasan waduk diambil sebagai fuzzy consequences. Performance indices untuk reliability, repairability, periode kegagalan dan vulnerability digunakan untuk mengevaluasi performa dari tiap pola operasi waduk.

Kata kunci : Fuzzy Rule Base, Operasi Waduk, Membership Function

Abstract: Reservoir operation to find an optimal release has been researched for many years. Various techniques have been developed and adopted for reservoir operation rule incorporating the uncertainty due to stochastic nature of objectives in the reservoir operation and due to imprecise goal values in the reservoir purposes.

The fuzzy stochastic dynamic programming model is used to calculate an optimal release from the operation of multipurpose single reservoir. To derive operation rule for a multipurpose single reservoir a stochastic dynamic model operation rule is constructed. Operation rule are generated based on optimal release for reservoir operation resulted from fuzzy stochastic dynamic programming method. The fuzzy rule base model operates on an "IF-THEN" principle, where the "IF" is a vector of fuzzy explanatory variable or premises and "THEN" of fuzzy consequences.

The reservoir storage volume, estimated inflows, and demand are used as the premise and release from the reservoir is taken as consequences. Performance indices namely reliability, repairability, incident period and vulnerability are used to evaluate performance of the reservoir operation rules.

Keywords : Fuzzy Rule Base, Reservoir Operation, Membership Function

PENDAHULUAN

Tampungan waduk diperlukan untuk memenuhi berbagai macam kebutuhan bagi suatu sistem sungai seperti penyedia air baku, irigasi, PLTA dan rekreasi. Selain itu bendungan beserta bangunan pelengkapanya juga digunakan sebagai pengatur fluktuasi debit sungai sehingga dapat berfungsi sebagai pengendali banjir untuk mengurangi

kerugian yang diakibatkan oleh kejadian banjir.

Pola operasi waduk yang bersifat multipurpose selalu dihadapkan pada konflik antara memaksimalkan jumlah air yang tersedia untuk memenuhi berbagai keperluan yang direncanakan dengan memaksimalkan jumlah ruang kosong yang tersedia untuk menyimpan debit banjir sehingga akan mengurangi kerugian di hilir sungai akibat adanya banjir.

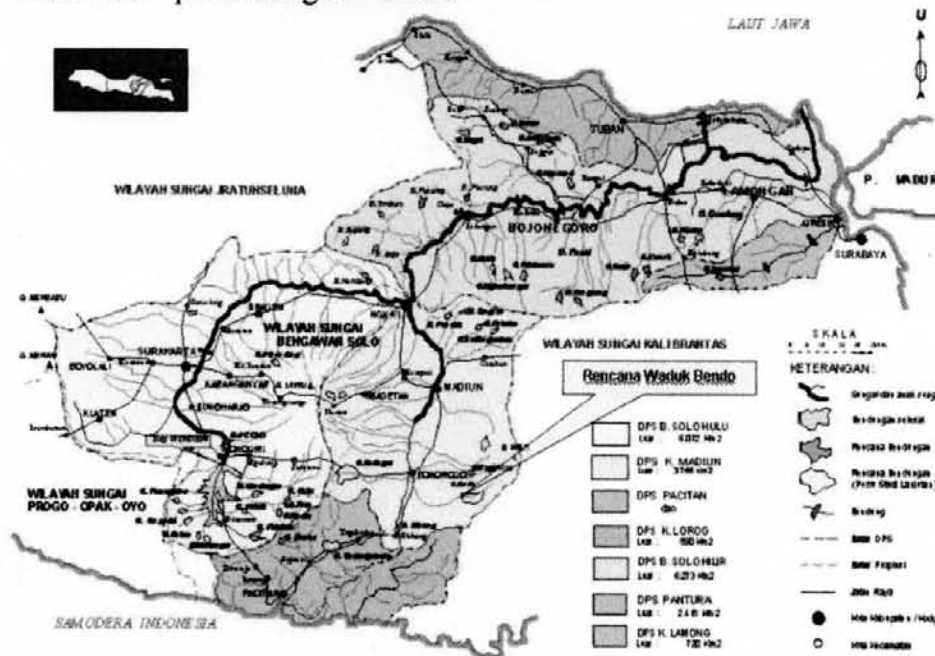
Pada kenyataannya pembuatan pola operasi waduk sangat kompleks. Operasi waduk sangat berhubungan dengan ketidakpastian inflow yang masuk (*input*), sedangkan di sisi lain harus memenuhi berbagai keperluan (*demand*) tanpa melebihi keterbatasan fisik dari waduk.

Beberapa penelitian untuk mengaplikasikan pendekatan fuzzy untuk operasi waduk telah dilakukan. Shrestha dkk. (1996) menjabarkan *fuzzy rules* dari serangkaian data pengamatan dan menggunakan model *fuzzy rule base* pada pola operasi waduk. Russel dkk (1996) menggunakan logika fuzzy untuk menemukan pola operasi bagi waduk single purpose PLTA. Tilmant dkk (2002) mengembangkan fuzzy SDP model dan membandingkannya dengan model SDP untuk mencari lepasan waduk yang optimal dalam pelaksanaan operasinya. Dubrovin (2002) menguraikan model *real time fuzzy control* untuk operasi waduk multipurpose. Hasebe dan Nagayama (2002) membuat perbandingan antara

operasi waduk menggunakan fuzzy dan sistem *neural network* dan pola operasi yang aktual yang dilakukan oleh operator. Mousavi dkk (2004) mengenalkan *fuzzy state SDP* untuk lebih mengakomodasi ketidakpastian dalam pemakaian SDP untuk operasi waduk. Karaboga dkk (2004) menghitung performa dari *fuzzy logic control* berdasarkan operasi yang dilakukan *real time* pada pintu pelimpah waduk.

LOKASI STUDI

Waduk Bendo yang digunakan dalam studi ini adalah salah satu waduk yang berada pada DAS Bengawan Solo. Waduk tersebut terletak di sungai Keyang yang merupakan anak sungai dari kali Madiun di desa Ngindeng. Untuk menuju lokasi waduk Bendo dapat dicapai dengan kendaraan dari kota Ponorogo sejauh 16 km dan dilanjutkan dengan jalan setapak sejauh 5 km melintasi kampung dan hutan. Lokasi studi dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Studi

Sungai Keyang dengan luas DAS 120,63 km² mempunyai rata-rata inflow tahunan sebesar 181,11 juta m³. Kapasitas tampungan normal yang tersedia pada waduk Bendo adalah sebesar 27,802 juta

m³ dengan kapasitas tampungan mati 13,530 juta m³. (Anonim, 2003)

Waduk Bendo direncanakan sebagai penyedia air untuk irigasi seluas 7799 Ha serta mensuplai air baku untuk

kota Ponorogo dan kota sekitarnya sebesar 790 l/detik. disamping fungsinya sebagai pengendali banjir.

Rata-rata inflow dan kebutuhan air pada sistem waduk untuk periode bulanan ditunjukkan pada tabel 1.

METODOLOGI

Aplikasi *fuzzy rule base* untuk operasi waduk yang digunakan pada studi ini dilakukan dengan menjabarkan *fuzzy rule base* berdasarkan pada rangkaian input dan output data yang dihasilkan oleh model *fuzzy stochastic dynamic programming*. Model *fuzzy stochastic dynamic programming* (FSDP) digunakan untuk mengoptimasi lepasan waduk yang dalam pola operasi waduk. Untuk mendapatkan lepasan yang optimal, model FSDP menggunakan pendekatan fuzzy yang dilakukan dengan menguraikan *fungsi objective* dan menggambarkannya sebagai *membership function*.

Tabel 1. Debit inflow bulanan dan kebutuhan

Month	Water demand	Average inflow
Jan	15.09	38.33
Feb	12.80	27.50
Mar	11.56	36.75
Apr	23.26	30.33
May	29.82	6.69
June	23.45	3.36
July	18.71	2.40
Aug	8.51	0.90
Sept	15.01	0.23
Oct	10.30	0.33
Nov	8.09	9.33
Dec	10.73	24.97
Total	187.32	181.11

Sumber : hasil perhitungan

Untuk mengakomodasi sifat stokastik dari inflow yang masuk ke waduk, pada *Stochastic Dynamic Programming* digunakan Model *markov chain*. Sedangkan untuk menjelaskan *fuzzy rule base system* dibuat tiga buah variasi *membership function*. Melalui simulasi untuk tiap pola operasi waduk, pengaruh pemilihan *membership function* untuk tiap pola operasinya akan ditunjukkan dengan

performance indices yang didapatkan dari hasil simulasi tersebut.

SIMULASI PERFORMANCE INDICES

Performance indeks adalah ukuran performa dari sistem pada suatu pola operasi yang direncanakan. *Performance indeks* didapatkan dengan melihat tingkat kegagalan yang terjadi pada sistem. Jika beban disimbolkan λ dan ketahanan disimbolkan sebagai ρ , maka kegagalan didefinisikan sebagai :

Kegagalan μ terjadi jika dan hanya jika $\lambda > \rho$

Dalam permodelan operasi waduk kegagalan dihitung dalam kaitannya dengan parameter target yang akan dicapai. Beban disini adalah kebutuhan dan ketahanan adalah lepasan dari waduk. Dari sini dapat didefinisikan bahwa kegagalan akan terjadi jika lepasan yang dikeluarkan waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan.

Empat buah *performance indices* yang digunakan dalam studi ini adalah *reliability*, *incident period*, *vulnerability* dan *repairability* atau *resilience*. Penjelasan dari keempat *performance indices* tersebut dapat dilihat dibawah ini (Shrestha, 1996) :

- *Reliability* adalah estimasi dari frekuensi relatif pada sistem (waduk), yang dinotasikan sebagai Z , yang tidak berada dalam kondisi kegagalan yang dinotasikan sebagai μ . Dalam fungsi indikator $\delta(\mu, t)$ didefinisikan :

$$\delta(\mu, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z \text{ is in mode } \mu \text{ at operation } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

reliability dalam hubungannya dengan kegagalan μ dan total waktu dari keseluruhan waktu simulasi pola operasi waduk, didefinisikan

$$PI^1(\mu, T) = \frac{T+1 - \sum_{i=0}^T \delta(\mu, t)}{T+1} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^T \delta(\mu, t)}{T+1}$$

- *Incident period* adalah rerata waktu periode antar kegagalan μ , atau dapat juga disebut *recurrence time*. Jika

$d_2(\mu, n)$, $n \geq 1$, menyatakan durasi waktu antar kegagalan ke n , maka

$$PI^2(\mu, T) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} d_2(\mu, n)$$

Dimana $N=N(\mu)$ = jumlah kegagalan μ sepanjang waktu T .

- *Repairability* adalah rerata waktu recovery sistem dari kegagalan μ . Jika $d_3(\mu, n)$, $n \geq 1$ adalah durasi dari kejadian kegagalan μ ke n ($n = 1, 2, \dots, N$)

$$PI^3(\mu, T) = \frac{\sum_{n=1}^N d_3(\mu, n)}{N}$$

Resilience adalah ukuran "seberapa cepat sistem akan kembali pada kondisi diinginkan". Sehingga *resilience* dapat didefinisikan sebagai kebalikan dari *repairability*. *Resilience* yang besar mengindikasikan kondisi kembalinya sistem kepada kondisi yang normal dalam waktu yang cepat atau waktu yang pendek saat sistem berada dalam kondisi kegagalan sedangkan *resilience* yang kecil mengindikasikan fenomena yang sebaliknya.

- *Vulnerability* adalah besarnya kejadian defisit yang terbesar sepanjang waktu T (Moy, 1986).

FUZZY STOCHASTIC DYNAMIC PROGRAMMING

Ketika proses markov terjadi dalam proses *inflow* ke tampungan waduk, model *Stochastic Dynamic Programming* (SDP) biasanya dipakai untuk mendapatkan pola yang optimal dalam operasi waduk (Loucks et al., 1981). Konsep dari proses *Markov Chain* dalam proses hidrologi diuraikan dalam Kottegoda (1982), Loucks et al. (1981), and Wurbs (1996).

Fuzzy set teori dan logika fuzzy merupakan pendekatan matematika yang dapat digunakan pada kondisi dimana

terdapat ketidakjelasan pada obyek (*vague*) dan hanya berdasarkan pada perkiraan. Tilmant dkk mengembangkan pendekatan model *fuzzy stochastic dynamic programming* dengan *fuzzy operating objectives* dan *fuzzy intersection* yang akan memperkirakan kondisi yang diambil saat ini dan konsekuensinya sehubungan dengan keputusan pada lepasan waduk yang diambil sedangkan untuk dapat memperlihatkan derajat kepuasan yang berhubungan dengan kondisi sistemnya diperlihatkan dengan *Fuzzy criterion*.

Pada studi ini *Fuzzy Stochastic Dynamic Programming* diimplementasikan penggunaannya pada optimasi operasi waduk pada bendungan Bendo. Dan untuk yang merefleksikan derajat kepuasan untuk pengendalian banjir dan kebutuhan air, digunakan sebagai pengganti dari fungsi *cost* dan *benefit* digunakan *membership grade*.

Untuk menghitung lepasan yang optimal dari operasi waduk digunakan langkah-langkah *Fuzzy Stochastic Dynamic programming* sebagai berikut. Tampungan aktif waduk Bendo dibagi menjadi 16 kondisi sedangkan untuk *inflow* yang masuk ke waduk akan dibagi menjadi 12 kondisi. Untuk membangkitkan *inflow* waduk secara sintesis yang nantinya akan digunakan untuk membuat matriks *transitional probability* yang dibutuhkan dalam model FSDP digunakan Model Thomas Fiering. ini *Inflow* bulanan hasil dari bangkitan dengan Model Thomas Fiering selanjutnya digunakan pada model yang akan dibagi menjadi 12 kondisi.

Pada studi yang dilakukan ini telah diasumsikan bahwa pendapat ahli sudah tersedia. *Membership function* dari *flood control* dan kebutuhan air diimplementasikan secara langsung berdasar pendekatan tersebut, dimana *membership function* terdiri dari kondisi tinggi tampungan dan lepasan waduk yang paling dapat diterima diberikan *membership degree* 1 dan kondisi yang paling sedikit dapat diterima diberikan *membership degree* 0.

Membership function untuk tinggi tampungan dalam fungsinya sebagai

pengendali banjir pada bendungan dibuat linear mulai dari tampungan penuh yang mempunyai *membership degree* 0 hingga tampungan mati dengan *membership degree* 1. Pada tingkat kepuasan pemenuhan kebutuhan air, *membership function* 1 diberikan pada kondisi kebutuhan air terpenuhi 100% oleh lepasan waduk dan *membership function* kebutuhan air akan bernilai 0 jika terpenuhi dibawah 60% dari kebutuhan rencana. *Membership degree* akan bervariasi mulai dari 0 hingga 1 pada kisaran 60% hingga 100% terpenuhinya kebutuhan air.

Model FSDP pada studi ini selanjutnya digunakan untuk dapat memaksimalkan *membership grade* dari rangkaian keputusan yang didapatkan dari kombinasi antara fungsi pengendalian banjir dan pemenuhan kebutuhan air. Pada kasus ini pengendalian banjir mempunyai bobot 0,7. Bobot disini merefleksikan fungsi tingkat kepentingan pada pola operasi waduk.

Model FSDP adalah sebagai berikut :

$$\mu_{G_t}^*(S_t, Q_t) = \left\{ \max_{R_t} \left[\mu_{C_t}(S_t, Q_t, R_t) \cap \sum_{Q_{t+1}} p(Q_{t+1} | Q_t) \cdot \mu_{G_{t+1}}^*(S_{t+1}, Q_{t+1}) \right] \right\}$$

subject to

$$\max(R_{min,t}, S_t + Q_t - S_{max}) \leq R_t \leq \min(R_{max,t}, S_t + Q_t - S_{min})$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t$$

Model FSDP dihitung hingga tercapai kondisi yang *steady*. Kondisi *steady* ini tercapai jika bentuk *membership grade* yang diharapkan telah mendekati konstan untuk seluruh variabel yang diperhitungkan.

Selanjutnya dilakukan Agregasi terhadap *fuzzy constraint* yang didapatkan dengan cara menjumlahkan bobot untuk menggambarkan tingkat kepentingan relatifnya. Jika *nc* adalah jumlah dari *operating objective* dan ω menunjukkan bobot, maka operasi agregasinya berbentuk :

$$\mu_{C_t}(S_t, Q_t, R_t) = \sum_{i=1}^{nc} \omega_i^i \mu_{C_t}^i(S_t, Q_t, R_t)$$

$$\text{dimana } \sum_{i=1}^{nc} \omega_i^i = 1$$

Tilmant dkk (2002) memperkenalkan logika “AND” sehubungan dengan *compensation problem*, logika ini digantikan dengan operator “fuzzy AND” yang direpresentasikan oleh fungsi parametrik dimana parameter kompensasi γ dapat dimodifikasi sehingga dapat menyesuaikan dengan arti “AND” dari operator min yang lama menjadi *operatic mean*

$$\mu_{C_t} \cap \mu_{G_{t-1}} = \gamma \min[\mu_{C_t}(\cdot), \mu_{G_{t-1}}(\cdot)] + (1-\gamma) \frac{\mu_{C_t}(\cdot) + \mu_{G_{t-1}}(\cdot)}{2}$$

Dimana Q_t = karakteristik aliran; S_t = karakteristik volume tampungan; S_{min} = kapasitas tampungan mati; S_{max} = kapasitas tampungan maksimum; R_t = lepasan sepanjang bulan *t*; R_{min} = lepasan minimum; R_{max} = lepasan maksimum; ω = koefisien bobot; μ_{Ct} = *membership function*; γ = *parameter compensation aggregation* dan $p(\cdot)$ = *transition probability* dari aliran.

Tabel 2. Lepasn optimal untuk bulan September

Storage St	Inflow Qt	Release Rt	DOF μ
1.4	1	1	0.3402
1.6	1	1.2	0.5310
1.8	1	1.4	0.7045
2	1	1.6	0.7257
2.2	1	1.6	0.7191
2.4	1	1.6	0.7114
2.6	1	1.6	0.7033
2.8	1	1.6	0.6955
3	1	1.6	0.6878
3.2	1	1.6	0.6800
3.4	1	1.6	0.6723
3.6	1	1.6	0.6647
3.8	1	1.6	0.6575
4	1	1.6	0.6504
4.2	1	1.6	0.6433

Sumber : hasil perhitungan

Dengan pendekatan ini, sistem yang terbaik performanya untuk model FSDP dari sisi *reliability* sistem operasi dan waktu komputasi didapatkan pada *compensation parameter* γ sama dengan 0,8 (Tilmant dkk., 2002).

Contoh hasil dari lepasan optimal pada waduk Bendo yang dihasilkan dengan model FSDP ditunjukkan pada tabel 2.

FUZZY RULES BASE

Dalam ilmu artificial intelligence terdapat berbagai cara untuk merepresentasikan sebuah pengetahuan. Langkah yang paling umum digunakan untuk merepresentasikan pengetahuan manusia adalah dengan cara merubahnya kedalam ekspresi yang berbentuk :

IF premise (antecedent) THEN conclusion (consequent)

Bentuk ini secara umum dikenal dengan bentuk IF-THEN *rule base*. Dimana secara tipikal mengekspresikan jika diketahui suatu fakta (sebab, hipotesa) maka dapat dicari fakta lainnya yang disebut kesimpulan (*consequent*)

FUZZY RULE BASE MEMBERSHIP FUNCTION

Sebuah *fuzzy set* ditunjukkan dengan *membership function* nya. *Membership function* adalah kurva yang menyatakan input yang dijadikan *membership value* (derajat antara 0 dan 1). Salah satu metode membuat *membership function* adalah dengan cara intuisi dari ahli. Bentuk *membership function* yang biasa digunakan digunakan adalah bentuk segitiga.

Fuzzy rule base akan menerangkan tentang definisi dari aturan sistem (*rule*) yang digunakan dalam permodelan. Langkah yang dilakukan dalam fuzzy rule base adalah sebagai berikut (Shreshta, 1996).

1. *Rule* diketahui secara luas oleh ahli dan dapat ditetapkan secara langsung.
2. *Rule* dapat ditetapkan langsung oleh ahli, akan tetapi ketersediaan data harus dipergunakan untuk *update* nya.
3. *Rule* yang tidak diketahui secara eksplisit, tetapi variabel tersebut sangat diperlukan untuk dapat

mendesripsikan sistem dapat ditentukan oleh ahli.

4. *Rule system* haruslah dibuat untuk menjabarkan interkoneksi antara elemen dan data set.

SIMULASI OPERASI WADUK BENDO

Simulasi sangat berguna dalam mengevaluasi performa suatu sistem dan saat melakukan optimasi dikarenakan model simulasi dapat merepresentasikan kondisi hidrologi dengan lebih detail.

Model simulasi pada studi ini berdasarkan kepada sekumpulan prosedur dari kesetimbangan air di waduk. Perhitungan dilakukan berulang untuk tiap interval waktu pada sepanjang periode simulasi. Skenario manajemen air yang telah ditentukan dikombinasikan dengan rangkaian data debit pada lokasi studi, yang merepresentasikan karakteristik hidrologi dari sungai Keyang.

Permodelan operasi waduk berdasarkan kepada kesetimbangan air untuk tiap interval waktu yang diformulasikan :

$$S_{t+\Delta t} = S_t + \text{all inflow} - \text{all outflow}$$

Simulasi dilakukan bulan demi bulan hingga mencapai akhir dari seri data debit. Transisi dari satu bulan ke bulan berikutnya dikontrol dengan perhitungan kontinuitas pada waduk.

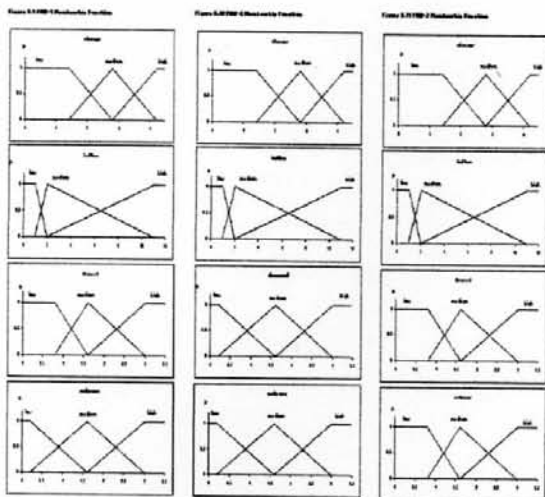
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada simulasi operasi waduk Bendo digunakan tiga *fuzzy rule base*. Pada *fuzzy rule base* I (FRB-1), *membership function* untuk lepasan waduk berbeda dengan kebutuhan. Pada FRB-2 dan FRB-3 *membership function* yang sama digunakan pada lepasan waduk dan kebutuhan, perbedaanya terletak pada FRB-2 nilai minimum diambil pada kebutuhan minimum sedangkan untuk FRB-3 nilai minimum diambil berdasarkan pada lepasan waduk minimum.

Fuzzy rule base untuk operasi waduk dibuat dengan *fuzzy associative memory* (FAM) untuk menjabarkan *fuzzy rule base*

yang berasal dari rangkaian input dan output. Data input dan output pada studi ini dihasilkan dari hasil *fuzzy stochastic dynamic programming*. Dengan metode FAM, ketiga fuzzy rule base dihitung berdasarkan variasi dari membership function nya. *Fuzzy rule base* menggunakan operasi IF-THEN dimana volume tampungan, inflow dan kebutuhan sebagai sebab (*premise*) sedangkan lepasan waduk sebagai *model consequence*.

Membership function yang digunakan dalam *fuzzy rule base* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Membership function

Contoh dari *fuzzy associative memory* untuk FRB-1 dapat dilihat pada gambar 3.

Simulasi dilakukan selama 20 tahun dimana data debit yang ada dibangkitkan dengan pendekatan metode Thomas Fiering yang nantinya digunakan sebagai time series dalam simulasi. Rerata bulanan lepasan untuk tiap pola operasi dibandingkan dengan target kebutuhan

untuk tiap bulannya dan dievaluasi *performance indices* nya

Tabel 3 dan Gambar 4 menunjukkan perbandingan dari rerata unit lepasan waduk dan unit kebutuhan untuk tiap bulannya, dan *performance indices* untuk tiap pola operasi ditunjukkan pada tabel 4.

		Storage	Low	Inflow	Medium	High
Demand	Low		L	M	M	M
	Medium		M	M	M	M
	High		L	M	M	H

		Storage	Medium	Inflow	Medium	High
Demand	Low		M	M	M	M
	Medium		M	M	M	M
	High		M	H	H	H

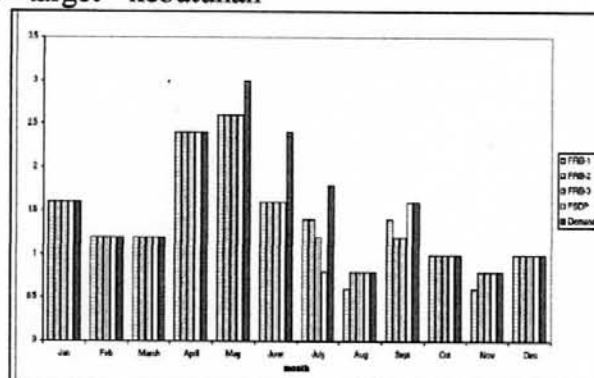
		Storage	High	Inflow	Medium	High
Demand	Low		M	M	M	M
	Medium		M	M	M	M
	High		H	H	H	H

Gambar 3. FAM untuk FRB-1

Tabel 3. Perbandingan antar rerata lepasan waduk bulanan dan kebutuhan

	FRB-1	FRB-2	FRB-3	FSDP	Demand
Jan	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Feb	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
March	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
April	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
May	2.6	2.6	2.6	2.6	3
June	1.6	1.6	1.6	1.6	2.4
July	1.4	1.4	1.2	0.8	1.8
Aug	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
Sept	1.4	1.2	1.2	1.6	1.6
Oct	1	1	1	1	1
Nov	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
Dec	1	1	1	1	1

Sumber : hasil perhitungan



Gambar 4. Grafik perbandingan antar rerata lepasan waduk bulanan dan kebutuhan

Tabel 4. Performance Indices

	R < D	Reliability	Incident Period	Repairability	Vulnerability
FRB-1	122	0.4938	3.50	3.67	1.40
FRB-2	90	0.6266	3.67	2.25	1.40
FRB-3	80	0.6680	3.92	2.00	1.40
FDSP	67	0.7220	6.92	2.68	2.20

Sumber : hasil perhitungan

KESIMPULAN

Pada pendekatan model dengan *fuzzy rule base* FRB-3 dimana *membership function* untuk kebutuhan diambil sama dengan *membership function* untuk lepasan waduk dan nilai minimum *membership function* diambil berdasarkan kepada nilai minimum dari lepasan waduk, mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan FRB-1 dan FRB-2.

Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa pemilihan *membership function* sangat menentukan didalam *fuzzy Rule Base* untuk pola operasi. Pemilihan *fuzzy rule base* yang sesuai akan meningkatkan hasil *performance indices* dari pola operasi waduk.

Masukan dari operator bendungan dan pengalaman dan pengetahuan dari para ahli sangat berguna dalam pemilihan *membership function* untuk *fuzzy rule base* yang digunakan dalam pola operasi waduk.

Berdasarkan *performance indices*, dari sisi *reliability* dan periode kegagalan, pola operasi dengan *fuzzy rule base* mempunyai nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang didapatkan dengan model FSDP tetapi *fuzzy rule base* memiliki *vulnerability* yang lebih baik dibandingkan dengan pola operasi waduk dengan model FSDP.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. (2003). *Penyusunan detail desain berupa review F/S waduk Bendo*. PT.

- Ika Adya Perkasa, Malang.
- Dubrovin, T., Jolma, A., Turunen, E. (2002). "Fuzzy model for real-time reservoir operation." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 128(1).
- Hasebe, M., Nagayama, Y. (2002). "Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support." *Advances in Engineering Software*, 33.
- Karaboga, D., Bagis, A., Haktani, T. (2004). "Fuzzy logic based operation of spillway gates of reservoirs during floods." *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(6).
- Kottegoda, NT. (1982). *Stochastic water resources technology*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Loucks, DP., Stedinger, JR., Haith, DA. (1981). *Water resources systems planning and analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Moy, WS., Cohon, JL., ReVelle, CS. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir" *Water Resources Research*, 22(4).
- Russel, SO., Campbell, PF. (1996). "Reservoir operating rules with fuzzy programming." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 122(3).
- Shresta, BP., Duckstein, L., Stakhiv, EZ. (1996). "Fuzzy rule based modelling of reservoir operation." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 122(4).
- Tilmant, A., Vanclooster, M., Duckstein, L., Persoons, E. (2002). "Comparison of fuzzy and nonfuzzy optimal reservoir operating policies." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 128(6).
- Wurbs, RA. (1996). *Modelling and analysis of reservoir system operations*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.