

PENGOPERASIAN WADUK DALAM RANGKA PENANGANAN BAHAYA KEKERINGAN DAN BANJIR

Suharyanto ¹

ABSTRACT

This paper present the use of stored water in reservoir more optimally by developing operation policy which is able to anticipate the dry and wet (flood) conditions. The reservoir operation policy which is able to anticipate those conditions will result in more efficient use of water throughout the whole year season, i.e., minimising spillage during wet (flood) season and yet conserving water during dry season. When the dry season is incoming, the operation policy will direct to release less water than during the normal condition, thus conserving water. When the wet (flood) season is coming, the operation policy will direct to release more water to give attenuation volume in the reservoir such that during the rainstorm it can store the excess water.

The operation policy which has capability to anticipate the incoming condition is developed by employing Stochastic Dynamic Programming (SDP) imbedded with fuzzy infrencing technique. The performance of the generated operating policy from SDP is evaluated by simulating the reservoir operation implementing the generated operation policy under three conditions, i.e., normal, dry and wet (flood) conditions. It shows that the use of fuzzy inferencing embedded within the SDP program and in the simulation program can result in more flexible operation policy.

Keywords: Pengoperasian Waduk, Optimasi, Fuzzy Inferencing

PENDAHULUAN

Hampir setiap tahun terutama pada awal-awal bulan Juli/ Agustus, di beberapa kota/ daerah di Jawa Tengah sudah mulai mengalami kondisi kekeringan. Karena kondisi kekeringan ini, biasanya kebutuhan air bersih bagi masyarakat di beberapa kabupaten seperti Kabupaten Grobogan, Demak, Kendal, Blora, Sragen, Boyolali, dan Wonogiri sudah harus dipenuhi dari dropping air tangki PDAM bantuan PEMDA setempat.

Di sisi lain, pada musim penghujan kelebihan air menyebabkan sering terjadi banjir. Bahkan, beberapa waduk dilaporkan sering melimpahkan/ membuang air

tampungannya dengan tujuan supaya waduk agak kosong guna mengantisipasi terjadinya volume air hujan yang berlebihan. Kebijakan pengoperasian di atas yang diimplementasikan secara kurang tepat justru akan memperbesar skala banjir kiriman yang masih sering terjadi (Suara Merdeka, 26, 27, 28, 29 Januari 1993) dan cenderung merugikan. Fungsi waduk yang seharusnya juga digunakan untuk tujuan pengendalian banjir dan pemenuhan kebutuhan air, oleh karenanya, belum dapat sepenuhnya diharapkan.

Keadaan seperti tersebut di atas mengilustrasikan keadaan antagonis yang selalu saja terjadi dari tahun ke tahun. Tingkat permasalahan yang dihadapi yaitu

¹ Pengajar Jurusan Teknik Sipil UNDIP,
Sekretaris Program Doktor Teknik Sipil UNDIP.

kekurangan air selama musim kemarau dan banjir selama musim penghujan dapat dilihat dari pemberitaan koran setempat, yang hampir tiap hari melaporkan keadaan tersebut di atas. Hal ini menunjukkan bahwa perlu dilakukan pengkajian pola dan kebijaksanaan pengoperasian waduk yang fleksibel sehingga mampu mengantisipasi datangnya kekeringan dan musim banjir, sehingga tidak harus terjadi setiap tahun.

Dalam makalah ini disajikan bahwa penentuan kebijakan pola pengoperasian waduk dengan mempertimbangkan secara langsung kondisi-kondisi kekeringan dan banjir akan dihasilkan pola pengoperasian waduk yang lebih optimal, efisien, dan antisipatif baik pada musim kering, musim banjir (penghujan), serta tidak mengurangi kinerja waduk pada periode-periode normal. Pola pengoperasian yang diharapkan adalah pola pengoperasian yang mampu mengurangi frekuensi serta intensitas kekeringan (kekurangan air bersih dan irigasi) dan juga mampu mengendalikan (mengurangi) dan memperlambat (*attenuate*) terjadinya debit banjir. Meskipun demikian, pola pengoperasian yang dimaksud masih tetap mampu dalam pemenuhan kebutuhan air selama periode-periode normal dan lebih terjamin.

Dalam paper ini, disajikan model-model optimasi stokastik dengan memasukkan (embed) prosedur fuzzy inferens di dalam prosedur optimasi guna menghasilkan pola pengoperasian yang mempertimbangkan secara eksplisit kondisi-kondisi pengoperasian yang non-normal (yaitu musim kekeringan atau musim banjir). Pola pengoperasian yang dihasilkan selanjutnya di implementasikan yaitu dengan melakukan simulasi pengoperasian dimana model simulasi yang digunakan juga memasukkan prosedur fuzzy inferens. Kinerja pengoperasian waduk sebagai hasil dari penerapan prosedur fuzzy inferens di atas dapat dibandingkan dengan hasil dari penerapan prosedur konvensional.

Oleh karenanya, dalam makalah ini dibuat model-model optimasi stokastik secara "crisp" (stochastic crisp dynamic programming-SCDP), optimasi stokastik secara "fuzzy" (stochastic fuzzy dynamic programming-SFDP), model simulasi "crisp" (crisp simulation-CRSim), dan model simulasi (fuzzy simulation-FISim).

DASAR-DASAR TEORI

1. Teknik Konvensional Penentuan Pola Pengoperasian Waduk

Dewasa ini tersedia beberapa teknik dalam menentukan kebijakan pola pengoperasian waduk. Secara prinsip dapat dikatakan ada 5 cara penentuan pola atau kebijaksanaan pengoperasian waduk (*reservoir operating policy*). Cara-cara tersebut adalah : 1) pembagian zona-peruntukan serta dengan cara "rule-curve", 2) Pola Pengoperasian Baku (*Standard Operating Policy, SOP*), 3) linear program, 4) dinamik program deterministik ataupun implisit stokastik (*deterministic or implicitly stochastic dynamic programming*), dan 5) dinamik program stokastik (*stochastic dynamic programming*).

Banyak pola pengoperasian waduk yang saat ini diterapkan adalah berupa "rule curve". Beberapa kerugian dan kelemahan dari pola pengoperasian yang berupa "rule curve" adalah (Loucks dkk., 1981 dan Wurbs, 1996) :

- a. secara periodik harus selalu di sesuaikan dengan perkembangan musim dan kondisi pengopersian,
- b. kurang sesuai untuk regime inflow yang mempunyai variasi musiman cukup besar,
- c. hanya berlaku pada kondisi-kondisi pengoperasian normal,
- d. perubahan pelepasan sering terlalu besar (*abrupt change in the release volume*) pada kondisi pengoperasian non-normal hingga dapat menyebabkan "overshooting" atau "undershooting".

Oleh karenanya, perlu dilakukan evaluasi pada pola pengoperasian "rule curve" karena 1) keterbatasan range kondisi-kondisi pengoperasian waduk, 2) kondisi pengoperasian waduk memerlukan pola pengoperasian yang berlaku atau "applicable" pada range pengoperasian yang cukup luas yaitu musim kering, musim banjir, dan keadaan normal, dan 3) untuk keperluan di atas, maka perlu digunakan teknik pemodelan pengoperasian waduk yang secara eksplisit mampu merepresentasikan kondisi-kondisi pengoperasian tersebut.

2. "State of the Art" Teknik-teknik Pengoperasian Waduk

Pengoperasian waduk secara efisien dan optimal merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan beberapa faktor seperti :

- a. kebutuhan air baik untuk kebutuhan irigasi, air bersih, pelestarian lingkungan, dan kebutuhan pengendalian banjir,
- b. debit inflow yang akan masuk ke waduk yang tergantung dari keandalan peramalan debit inflow yang akan masuk ke waduk tersebut,
- c. pola dan kebijakan pengoperasian (*operational policy*) waduk,
- d. keandalan peramalan besar dan waktu akan terjadinya debit banjir,
- e. keandalan perkiraan kebutuhan air yang aktual,
- f. keandalan peralatan monitoring tinggi muka air waduk, debit aliran, dan curah hujan,
- g. koordinasi antara instansi yang terkait,
- h. skill dan intuisi operator-operator,
- i. sinkronisasi pengoperasian jangka pendek, jangka panjang, serta pengoperasian "real time".

Kondisi pengoperasian waduk sering dianggap sebagai kondisi deterministik dimana faktor-faktor yang berpengaruh terhadap pengoperasian waduk seperti informasi mengenai inflow dan kebutuhan

air dianggap diketahui dengan pasti (*certain*). Pada kenyataannya, data inflow maupun data kebutuhan air aktual tidak atau belum diketahui dengan pasti pada saat keputusan mengenai jumlah volume air yang harus dilepaskan (release) dilakukan/ditetapkan. Kedua faktor tersebut secara "inherent" mempunyai tingkat "uncertainty" yang tinggi, sehingga langkah perencanaan pengoperasian waduk harus mempertimbangkan kedua faktor tersebut sebagai bilangan yang "uncertain". Salah satu cara untuk memasukkan faktor-faktor yang "uncertain" tersebut secara eksplisit adalah dengan menggunakan metode-metode stokastik, misalnya dengan menggunakan teknik optimasi stokastik dan teknik simulasi stokastik.

Dalam metode-metode stokastik, besarnya inflow yang akan terjadi pada bulan ini sebenarnya tidak atau belum diketahui dengan pasti, dan biasanya hanya diketahui secara probabilistik saja yang merupakan fungsi dari (mempunyai korelasi tinggi dengan) state inflow bulan-bulan sebelumnya. Kebutuhan air untuk irigasi, misalnya, biasanya ditentukan pada awal musim tanam dan keputusan ini harus dipertahankan selama musim tanam tersebut (yaitu sekitar ± 4 bulan). Pada kenyataannya, kebutuhan air irigasi yang aktual berfluktuasi dari hari ke hari dan merupakan fungsi dari faktor-faktor klimatologi daerah tersebut yang secara "inherent" juga merupakan proses stokastik. Kebutuhan air irigasi juga tergantung pada tingkat pertumbuhan tanamannya.

Review teknik-teknik optimasi dan simulasi pada pengoperasian waduk dapat dijumpai pada Yeh (1985) dan Loucks dkk. (1981). Studi-studi lanjutan tentang teknik-teknik penentuan pola pengoperasian waduk selanjutnya diarahkan pada pemodelan proses pengoperasian yang lebih realistis dan representatif.

Secara konvensional, pola pengoperasian waduk yang ada ditentukan/ ditetapkan untuk pengoperasian waduk dalam kondisi

normal, yaitu pada kondisi muka air waduk berada di antara muka air minimum dan muka air normal maksimum. Jika muka air waduk turun di bawah muka air minimum, maka waduk tidak dioperasikan. Jika muka air waduk naik di atas muka air normal maksimum, maka pelepasan (release) air waduk akan diperbesar. Pada kenyataannya di lapangan, batas-batas muka air minimum dan muka air normal maksimum tersebut tidak merupakan batas yang tegas atau "crisp". Pada saat-saat muka air waduk turun dan mendekati muka air minimum, biasanya operator sudah harus mulai menggunakan intuisi, persepsi, dan pengalamannya untuk mengurangi pelepasan air (*hedging the release*). Selain itu, waduk juga masih dioperasikan meskipun muka air waduk berada di bawah muka air waduk minimum. Pada saat-saat muka air waduk naik dan mendekati muka air waduk normal maksimum, operator juga sudah mulai menggunakan intuisi, persepsi, dan pengalamannya untuk memperbesar pelepasan (*excess release*). Oleh karenanya, batas-batas muka air waduk seperti di atas harus dianggap sebagai batas-batas yang "imprecise" dan fuzzy. Dalam hal ini, pola pengoperasian waduk juga harus mampu secara "gradual" mengenal adanya transisi zona pengoperasian tersebut di atas. Untuk kasus-kasus seperti di atas di mana parameter pengoperasian juga bersifat fuzzy, maka seharusnya teknik optimasi penentuan pola pengoperasian waduk serta teknik simulasi juga harus mampu memasukkan parameter-parameter fuzzy. Parameter-parameter pengoperasian waduk yang secara "real" berupa informasi dan kuantitas yang "imprecise" atau fuzzy adalah faktor kendala (*constraints*), pengetahuan kita tentang inflow yang akan datang yang juga bersifat probabilistik, dan kebutuhan aktual.

Teori fuzzy (Zadeh, 1965) merupakan teori yang ditujukan untuk mengolah/menganalisis informasi-informasi yang bersifat linguistik, "imprecise", "ambiguity", dan non-spesifik secara kuantitatif. Dasar-

dasar fuzzy modeling dan aplikasinya dengan menerapkan teknik-teknik logika fuzzy (*fuzzy logic*) dapat dijumpai pada Cao dkk. (1992), Lin (1994), dan Wang (1994). Khusus penerapan teknik fuzzy modeling di bidang pengoperasian waduk didemonstrasikan oleh Ikebuchi dkk. (1994), Russell dan Campbell (1996), dan Shresta dkk. (1996). Sistem logika fuzzy yang dikembangkan dalam studi-studi di atas menitik beratkan pada sistem logika fuzzy dimana domain proses yang ditinjau atau "knowledge" direpresentasikan sebagai kumpulan dari aturan-aturan (*rules*). Sehingga, fuzzy logic seperti tersebut di atas sering juga disebut sebagai *fuzzy rule base*. Mekanisme pengambilan keputusan/tindakan/ "action" dari beberapa aturan fuzzy yang "applicable" diperoleh dengan prosedur fuzzy inferens (*fuzzy inferencing*).

Dalam "approach" yang lain, Suharyanto dkk. (1995), Suharyanto dan Saleh Wasimi (1996), Suharyanto dan Goulter (1996), Goulter dan Suharyanto (1996), Suharyanto dkk. (1996), dan Xu dkk. (1998) meninjau beberapa parameter model sebagai informasi fuzzy. Parameter-parameter fuzzy tersebut ditinjau secara eksplisit dan "embeded" di dalam proses-prose optimasi dan simulasi. Goulter dan Suharyanto (1996) disamping memasukkan parameter-parameter fuzzy, juga menerapkan prosedur fuzzy inferencing di dalam proses optimasi dan simulasinya.

3. Kinerja Pengoperasian Waduk

Untuk dapat melakukan evaluasi tentang kinerja (*performance*) dari suatu pengoperasian waduk, maka diperlukan adanya indikator atau indeks dari kinerja. Evaluasi tentang filosofi dan karakteristik dari masing-masing indikator unjuk kerja pengoperasian waduk serta aplikasinya pada waduk Wadaslintang di Propinsi Jawa Tengah dapat dijumpai pada Suharyanto (1997). Indikator atau kinerja yang digunakan dalam mengevaluasi efisiensi dan

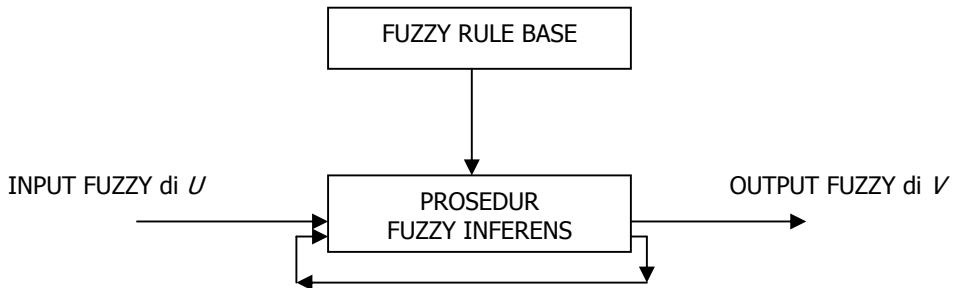
optimalisasi dari pengoperasian waduk dapat meliputi :

- keandalan (*reliability*) pemenuhan kebutuhan-kebutuhan air sesuai dengan peruntukannya,
- kelentingan (*resiliency*) waduk yang mengukur kecepatan waduk untuk kembali ke keadaan "satisfactory" setelah waduk mengalami keadaan "unsatisfactory". Sistem pengoperasian yang menghasilkan kelentingan yang tinggi (yaitu semakin cepat waduk kembali ke keadaan "satisfactory"), sistem pengoperasiannya semakin baik yaitu semakin lenting.
- kerawanan (*vulnerability*) yang mengukur besar, intensitas, serta frekuensi terjadinya pemenuhan kebutuhan air yang "unsatisfactory",
- volume dan frekuensi terjadinya pelimpahan air saat musim penghujan,

- tolok ukur pengoperasian lain yang relevan yang akan ditentukan dalam penelitian sesuai dengan karakteristik pengoperasian waduk yang ditinjau.

4. Pengambilan Keputusan Dengan Logika Fuzzy

Secara prinsip, suatu sistim logika fuzzy (*fuzzy logic*) dapat digambarkan seperti pada Gambar 2 (Wang, 1994). Pada gambar tersebut domain pengetahuan direpresentasikan dengan sekumpulan aturan fuzzy (*fuzzy rules*). Domain pengetahuan ini disebut sebagai *fuzzy rule base*. Dalam suatu sistem logika fuzzy, suatu input crisp akan menyebabkan lebih dari satu aturan fuzzy yang berlaku (*applicable*). Pengambilan keputusan atau tindakan dari beberapa aturan fuzzy yang "applicable" tersebut dilakukan dengan prosedur fuzzy inferens.



Gambar 1 : Konfigurasi dari Sistem Logika Fuzzy Dasar

Suatu misal, suatu kelompok aturan fuzzy dapat di-representasikan dengan notasi aturan fuzzy IF-THEN, dimana domain dari input dan output masing-masing adalah di U dan di V . Aturan fuzzy tersebut dapat secara matematik di sajikan ke dalam persamaan :

$$R^{(l)} : \text{IF } (x_1 \text{ is } F_1^{(l)}, \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^{(l)}, \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^{(l)}) \text{ THEN } (y \text{ is } G^{(l)}) \quad \forall l=1, 2, \dots, M$$

dimana $F_i^{(l)}$ dan $G^{(l)}$ masing-masing adalah premise dari input yang berupa fuzzy set dan keputusan/ action untuk aturan fuzzy l . Output atau tindakan yang harus

diambil berdasarkan aturan fuzzy yang "applicable" diperoleh dengan prosedur fuzzy inferens yang secara matematik dapat disajikan sebagai berikut :

$$\mu_{T \circ R^{(l)}}(y) = \max_{x \in U} \left[\mu_T(x) \min \mu_{F_1^{(l)} \times F_2^{(l)} \times \dots \times F_n^{(l)} \rightarrow G^{(l)}}(x, y) \right]$$

Sistem logika fuzzy yang lain dimana bagian premise IF dan bagian konsekuen THEN berupa bilangan crisp dapat dijumpai pada Takagi and Sugeno's (1985). Pada sistim logika fuzzy dari Takagi and Sugeno,

tindakan atau output dapat diperoleh dengan persamaan :

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M w^{(l)} y^{(l)}}{\sum_{l=1}^M w^{(l)}}$$

dimana $w^{(l)}$ adalah tingkat keanggotaan suatu input pada aturan fuzzy l . $y^{(l)}$ adalah output crisp yang berlaku pada aturan l .

5. Program Dinamik Stokastik

Secara prinsip, teknik-teknik pemodelan yang digunakan adalah teknik optimasi dinamik program stokastik (*stochastic "crisp" dynamic programming*) biasa (non-fuzzy), optimasi dinamik program stokastik fuzzy (*stochastic "fuzzy" dynamic program*), teknik simulasi stokastik non-fuzzy (*crisp simulation*), teknik simulasi stokastik fuzzy (*fuzzy simulation*), dan analisis statistik komparasi multi-dimensi indikator-indikator unjuk kerja (*performance*).

Teknik optimasi stokastik non-fuzzy yang digunakan adalah perumusan oleh Butcher (1971), dimana persamaan rekursiv dinamik program stokastiknya disajikan dalam persamaan berikut.

$$f_t^n(k, i) = \min_{R_{r,t} \in \bar{R}_t} \left\{ B_{r,t} + \frac{1}{(1+d)} \sum_{j=1}^{N(i)} P_{i,j}^{t-1} f_{t+1}^{n-1}(l, j) \right\}$$

Fungsi kendala pengoperasian waduk adalah pada volume waduk yang harus berada di antara volume waduk minimum dan voume waduk maksimum dan pada kapasitas pelepasan (release) minimum dan maksimum. Fungsi kendala tersebut disajikan secara matematik sebagai berikut.

$$S_{\min, t+1} \leq S_{t+1} \leq S_{\max, t+1} \quad \forall t$$

Sedangkan teknik optimasi dinamik program stokastik fuzzy digunakan perumusan oleh Goulter dan Suharyanto (1996) yang selanjutnya dikembangkan dalam Suharyanto (1998). Persamaan rekursiv

dinamik program stokastik fuzzy adalah (Suharyanto, 1998) :

$$f_t^n(k, i) = \min_{R_{r,t} \in \bar{R}_t} \left\{ B_{r,t} + \frac{1}{(1+d)} \sum_{j=1}^{N(i)} P_{i,j}^{t-1} f^* \right\}$$

Dimana f^* dapat dicari dengan menggunakan perumusan "minimal weighted long-term consequence" sebagai berikut.

$$f^* = f_{t+1}^{n-1}(l^*, j)$$

$$\min_l \left(\frac{f_{t+1}^{n-1}(l, j)}{\mu_l(S_{t+1})} \right) \quad \forall l \mid \mu_l(S_{t+1}) > 0.0$$

6. Simulasi Pengoperasian Waduk

Teknik simulasi stokastik merupakan simulasi pengoperasian waduk dimana debit inflow yang masuk ke waduk merupakan hasil pembangkitan (*generation*) baik secara "off line" maupun secara "on line" yang dapat pula digabungkan dengan data kebutuhan air hasil pembangkitan juga. Dalam simulasi stokastik non-fuzzy, penentuan volume pelepasan didasarkan pada pola pengoperasian/ pedoman pengoperasian hasil optimasi stokastik non-fuzzy sebagai fungsi dari volume waduk awal bulan dan besarnya debit inflow bulan lalu. Dengan kata lain, pola pengoperasian waduk yang dihasilkan dari optimasi stokastik non-fuzzy diimplementasikan dalam pengoperasian secara "look-up table" secara "crisp".

Sedangkan dalam simulasi stokastik fuzzy, penentuan atau pemilihan volume release dapat dilakukan dengan menerapkan prosedur fuzzy inferens (*fuzzy inferencing*) seperti yang dirumuskan dalam Cao dkk. (1992) dan Wang (1996). Dalam paper ini, penentuan volume release dilakukan dengan menggunakan prinsip fuzzy inferens seperti perumusan dari Suharyanto dan Goulter (1996), Goulter dan Suharyanto (1996), dan Suharyanto (1998).

Dari hasil simulasi stokastik non-fuzzy dan fuzzy dapat dihasilkan sejumlah "sample" dari indikator unjuk kerja pengoperasian waduk yang dihasilkan sebagai fungsi dari pembangkitan beberapa skenario deret inflow secara stokastik. Analisis statistik terhadap indikator-indikator unjuk kerja tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi tentang keberhasilan/ keuntungan dari pola pengoperasian hasil optimasi non-fuzzy dan fuzzy.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

1. Deskripsi Sistem

Teknik pemodelan untuk pembuatan pola pengoperasian dan teknik simulasi untuk mengkaji implementasi dari pola pengoperasian yang dihasilkan diterapkan pada Waduk Fairbairn di Queensland, Australia. Waduk ini dibuat pada tahun 1972 pada sungai Nogoia yang mempunyai luas daerah tangkapan sebesar 16.320 km². Waduk dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan irigasi. Sesuai dengan luas DAS yang cukup besar, waduk mempunyai kapasitas efektif sebesar 1.443.000 Megaliter (=1.443 juta m³), yang cukup besar jika dibandingkan dengan debit inflow rata-ratanya yang sebesar 512.000 Megaliter (=512 juta m³). Kapasitas efektif minimum waduk adalah sebesar 123.000 Megaliter (=123 juta m³).

Air waduk terutama dimanfaatkan untuk mengairi daerah irigasi, memenuhi kebutuhan air baku, dan kebutuhan air industri di Emerald, Queensland. (Gubbels, 1994; and Queensland Water Resources Commission, 1992). Kapas merupakan tanaman utama di daerah irigasi di atas. Pertumbuhan kapas biasanya meliputi masa persiapan lahan antara bulan September sampai Oktober, masa pertumbuhan pada bulan Desember sampai Februari, dan masa panen pada bulan Februari sampai Maret. Jenis tanaman lain adalah kadelai dan kacang-kacangan yang

ditanam pada bulan-bulan musim kemarau (summer).

Pengalokasian air di daerah irigasi dilakukan di setiap awal musim tanam dan dilakukan penyesuaian secara periodic selama musim tanam (Tickle and Goulter, 1992). Petani di Queensland diberi surat ijin pemanfaatan air (jumlah nominalnya dan waktunya). Alokasi di atas merupakan alokasi nominal, sedangkan alokasi aktual yang diberikan di tiap-tiap musim tanam yang sesungguhnya ditinjau/ disesuaikan pada setiap musim tanam dan tergantung dari ketersediaan air aktual serta kecenderungan (likelihood) dari debit air yang masuk waduk pada tahun ini kedepan.

Pada setiap awal musim tanam, kepala pengelola pengairan setelah melakukan dialog dengan petani, mengumumkan alokasi air yang cenderung akan diperoleh oleh tiap petani pada satu tahun ke depan. Alokasi ini merupakan "announced allocation", yang nilainya bisa lebih tinggi, lebih rendah, atau bahkan sama dengan alokasi nominalnya. Selanjutnya, kepala pengelola pengairan bersama-sama dengan petani selalu melakukan review tentang "announced allocation" di atas serta melakukan penyesuaian (menambah) alokasi air sesuai dengan kecenderungan ketersediaan air (Tickle and Goulter, 1992).

2. Skenario Analisa

Dalam paper ini dibuat model optimasi stokastik secara "crisp" (stochastic crisp dynamic programming-SCDP), optimasi stokastik "fuzzy" (stochastic fuzzy dynamic programming-SFDP), model simulasi "crisp" (crisp simulation-CRSim), dan model simulasi (fuzzy simulation-FISim).

Analisa dilakukan pada kondisi pengoperasian normal, kondisi pengoperasian di musim kering, dan kondisi pengoperasian di musim banjir. Kondisi pengoperasian normal adalah dimana pengoperasian didasarkan pada inflow waduk normal yaitu data series sepanjang

Pengoperasian Waduk Dalam Rangka Penanganan
Bahaya Kekeringan dan Banjir

90 tahun (data historik ataupun data pembangkitan). Kondisi kering didefinisikan sebagai kondisi dimana waduk hanya menerima inflow dari 10 tahun data terkering (terkecil), sedangkan kondisi musim banjir didefinisikan sebagai kondisi pengoperasian waduk dengan debit inflow sebesar 10 tahun terbasah (terbesar).

3. Hasil Analisis

hasil analisis dicantumkan pada Tabel 1, yang menunjukkan nilai kuadrat dari penyimpangan rata-rata tahunan dari pelepasan terhadap kebutuhannya (expected annual deviation-EAD) hasil optimasi secara crisp dan secara fuzzy. Pada optimasi dengan menggunakan prosedur fuzzy, pembagian interval dari storage dapat

mempunyai fungsi keanggotaan (*membership function*) sebagai bentuk segitiga maupun trapesium. Dari Tabel 1 tersebut dapat dilihat bahwa nilai EAD pada optimasi fuzzy menghasilkan nilai yang lebih rendah dari hasil optimasi crisp.

Hasil simulasi pengoperasian dengan mengimplementasikan pola pengoperasian yang dihasilkan oleh prosedur optimasi pada kondisi pengoperasian NORMAL, KERING, and MUSIM BANJIR disajikan pada Tabel-tabel 2, 3, dan 4. Sementara itu, untuk lebih memberikan gambaran tentang peningkatan kinerja pengoperasian waduk pada kondisi pengoperasian KERING, maka perlu disajikan frekuensi kegagalan bulanan seperti dicantumkan pada Tabel 5.

Tabel 1. Nilai EAD hasil dari Model SCDP dan model SFDP yang menggunakan "Minimal Inferencing"

	Model (SCDP)	Model Fuzzy (SFDP) dengan Interval Storage mempunyai :	
		Fungsi Keanggotaan Segitiga	Fungsi Keanggotaan Trapesium
$KS_{\min} = KS_{\max} = 10^7$	1.897×10^6	1.624×10^6	5.436×10^5

Tabel 2. Kinerja pengoperasian waduk pada kondisi NORMAL

Kinerja Pengoperasian waduk	Pengoperasian Secara Crisp	Pengoperasian dengan Prosedur Fuzzy Inferens :	
		Fungsi Keanggotaan Segitiga	Fungsi Keanggotaan Trapesium
p(fail)	1.583	1.583	1.583
p(full)	5.917	6.000	6.000
p(empty)	0.000	0.000	0.000
Reliability	98.417	98.417	98.417
Resiliency	36.842	36.842	36.842
Dev.	5.398×10^9	5.468×10^9	5.449×10^9
Vulnerability-1	0.257	0.282	0.282
Vulnerability-2	0.536	0.587	0.587

Tabel 3. Kinerja pengoperasian waduk pada kondisi KERING

Kinerja Pengoperasian waduk	Pengoperasian Secara Crisp	Pengoperasian dengan Prosedur Fuzzy Inferens :	
		Fungsi Keanggotaan Segitiga	Fungsi Keanggotaan Trapesium
p(fail)	38.333	26.667	26.667
p(full)	0.000	0.000	0.000
p(empty)	0.000	0.000	0.000
Reliability	61.667	73.333	73.333
Resiliency	32.609	37.500	37.500
Dev.	9.568×10^7	9.532×10^7	9.792×10^7
Vulnerability-1	0.257	0.254	0.259
Vulnerability-2	0.555	0.492	0.492

Tabel 4. Kinerja pengoperasian waduk pada kondisi MUSIM BANJIR

Kinerja Pengoperasian waduk	Pengoperasian Secara Crisp	Pengoperasian dengan Prosedur Fuzzy Inferens :	
		Fungsi Keanggotaan Segitiga	Fungsi Keanggotaan Trapesium
p(fail)	1.667	1.667	1.667
p(full)	13.333	16.667	16.667
p(empty)	0.000	0.000	0.000
Reliability	98.333	98.333	98.333
Resiliency	50.000	50.000	50.000
Dev.	8.074×10^8	1.081×10^9	1.070×10^9
Vulnerability-1	0.500	0.500	0.500
Vulnerability-2	1.000	1.000	1.000

Tabel 5. Frekuensi kegagalan pada kondisi pengoperasian KERING

Bulan	Target Kebutuhan (MGL)	Pengoperasian dengan Prosedur "Crisp"		Pengoperasian dengan Prosedur Fuzzy Inferens			
				Fungsi Keanggotaan Segitiga		Fungsi Keanggotaan Trapesium	
		N(fail)	MaxDef	N(fail)	MaxDef	N(fail)	MaxDef
Jan.	40000.00	4.00	40000.00	2.00	35000.00	2.00	35000.00
Feb.	36100.00	5.00	34433.30	3.00	34433.30	3.00	34433.30
Mar.	10000.00	3.00	5000.00	3.00	5000.00	3.00	5000.00
Apr.	4600.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
May	5900.00	1.00	4233.30	1.00	4233.30	1.00	4233.30
Jun.	7000.00	6.00	2000.00	4.00	2000.00	4.00	2000.00
Jul.	5100.00	1.00	3433.30	0.00	0.00	0.00	0.00
Aug.	7800.00	6.00	2800.00	4.00	2800.00	4.00	2800.00
Sep.	12100.00	6.00	7100.00	5.00	7100.00	5.00	7100.00
Oct	31100.00	6.00	26100.00	4.00	26100.00	4.00	26100.00
Nov.	9800.00	4.00	4800.00	3.00	4800.00	3.00	4800.00
Dec.	30600.00	4.00	25600.00	3.00	25600.00	3.00	25600.00

Seperti ditunjukkan pada Tabel 2, kinerja pengoperasian waduk pada kondisi NORMAL dengan prosedur crisp dapat disamai, atau bahkan dilampaui, oleh kinerja pengoperasian waduk dengan prosedur fuzzy inferens. Hal ini jelas menunjukkan bahwa prosedur fuzzy inferens tidak mampu tetap mempertahankan kinerja pengoperasian waduk pada kondisi pengoperasian NORMAL.

Pada kondisi pengoperasian KERING, Tabel 3 menunjukkan bahwa kinerja waduk dengan prosedur pengopeasian fuzzy inferens jauh lebih baik dibanding dengan prosedur crisp. Selanjutnya, pada kondisi pengoperasian MUSIM BANJIR, Tabel 4 menunjukkan bahwa prosedur pengoperasian fuzzy inferens masih lebih baik dibandingkan dengan prosedur pengoperasian crisp.

Hal-hal di atas, menunjukkan bahwa prosedur fuzzy inferens mempunyai fleksibilitas yang cukup baik dalam merespons beberapa kondisi pengoperasian yang lebih luas yaitu kondisi pengoperasian normal, musim kering, dan musim banjir.

KESIMPULAN

1. makalah ini menunjukkan bahwa pedoman pengoperasian waduk dapat dihasilkan dari proses optimasi stokastik dan dengan menggunakan prosedur fuzzy inferens.
2. dengan penggunaan fuzzy inferens baik pada proses optimasi maupun pada proses simulasi, maka dapat dihasilkan pola pengoperasian yang fleksibel dan mempunyai range pengoperasian yang lebih luas (kondisi normal, kering, dan banjir) secara lebih objektif.
3. peningkatan kinerja pengoperasian waduk yang dihasilkan dari penerapan prosedur fuzzy inferens merupakan upaya nyata dalam melakukan pemanfaat air waduk secara lebih optimal dan sekaligus mengurangi bahaya akibat musim kering dan musim banjir.

PUSTAKA ACUAN

Cao, Z., Kandel, A., Li, L., and Han, J. (1992). "The Mechanism of Fuzzy Logic Controllers." In *Analysis and management of Uncertainty : Theory and Applications* (Ayyub, B. M. et al., eds.), Elsevier Science publishers, B. V., pp. 199-208.

Goulter, I. A. and F. K. Tai (1985). "Practical Implications in the Use of Stochastic dynamic Programming for Reservoir Operation", *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 21, No. 1, pp. 65-74.

Goulter, I. C., and Suharyanto (1996). "Application of Fuzzy Inferencing Principles to Reservoir Operation Analysis (invited)." In *Proceedings of the 6th International Conference on Hydraulic Engineering Software : Hydrossoft'96*, (W. R. Blain ed.), Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 491-503 (ISBN: 1-85312-405-2).

Ikebuchi, S., Kojiri, T., Tomosugi, K., and Galvao, C. (1994). "Knowledge-Based System for Reservoir Operation During Low Flows Utilizing Weather Forecast Information." In *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Vol. 4 : Effective Environmental Management for Sustainable Development* (Hipel, K. W., and Fang, L., eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 295-308.

Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Shrestha, B. P., Duckstein, L., and Stakhiv, E. Z. (1996). "Fuzzy Rule-Based Modelling of Reservoir Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 4, pp. 262-269.

Suharyanto (2002). *Improved Reservoir Operating Policy Through Use of fuzzy Set Theory*. PhD Dissertation, Swinburne

University of Technology, Melbourne - Australia.

Suharyanto and I. C. Goulter (1996). *Use of Fuzzy Set Theory for Consideration of Storage Non-specificity in Stochastic Dynamic Programming for Reservoir Operation*. Proceeding of the 7th International Association of Hydraulics Research (IAHR) Conference On Stochastic Hydraulics (Tickle, K. S. et al., eds.), Mackay, 29-31 July 1996, pp. 129-136. (ISBN:90 5410 8177).

Wurbs, R. A. (1996). *Modeling and Analysis of Reservoir System Operations*, PTR Prentice Hall, New Jersey, xvi + 356p.

Yeh, W. G. W. (1985). Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 1797-1818.

Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets". *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.

Zadeh, L. A. (1973). "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC3, No. 1, pp. 28-44.