

STUDI OPTIMASI POLA OPERASI WADUK SUTAMI AKIBAT PERUBAHAN IKLIM

Harvy Irvani¹, Mohammad Bisri², Widandi Soetopo²

¹Mahasiswa Program Magister dan Doktor Teknik Pengairan,

²Dosen Fakultas Teknik Jurusan pengairan.

e-mail: harvyirvani77@gmail.com.

ABSTRAK

Perubahan iklim global berpengaruh terhadap temperatur suhu, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari, kecepatan angin, curah hujan, dan debit sungai. Tingginya intensitas curah hujan setelah terjadinya perubahan iklim berdampak terhadap fluktuasi debit sungai pada musim hujan dan kemarau. Bencana banjir dan kekeringan merupakan peristiwa alam yang semakin sering di jumpai saat ini. Waduk Sutami adalah waduk yang difungsikan untuk menampung kelebihan air hujan dan debit Sungai Brantas, untuk kemudian disimpan. Debit sungai digunakan untuk memenuhi kebutuhan air dimusim kemarau. Oleh karenanya untuk menghadapi dampak ekstrim tersebut diperlukan perencanaan pengelolaan pola operasi waduk yang terkelola dengan baik dan secara optimal.

Metodologi yang digunakan dalam analisis perubahan iklim terhadap pola operasi waduk sutami dengan menggunakan Program Dinamik Stokastik maka akan diperoleh suatu sistem kebijakan lepasan pola operasi waduk sebelum dan setelah perubahan iklim.

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan iklim di waduk sutami dimana di tandai dari kebijakan lepasan waduk optimal mengalami perubahan. Pada tabel kebijakan lepasan optimal menunjukan sebelum perubahan iklim kebijakan lepasan masih dalam kondisi yang baik sedangkan setelah perubahan iklim kebijakan lepasan mengalami perubahan kebijakan dimana telah terjadi pergeseran musim basah dan musim kering yang menyebabkan debit yang masuk ke waduk sutami mengalami perubahan dari yang di harapkan.

Kata kunci: Perubahan Iklim, Pola operasi waduk, Program Dinamik Stokastik

ABSTRACT

The change of global climate influences the temperature, relative humidity, sunlight time, wind rate, rain rate, and river debit. The higher intensity of rain rate after the change of climate influences the fluctuation of river debit in rainy or dry season. Flood and dryness are natural occasions, which are usually occurring. Sutami Reservoir is functioned to retain water excess from rain and river debit from Brantas River, which in the future it would be stored. River debit is used to fulfill water need in dry season. Therefore, to face the extreme effect, there is needed management planning of reservoir operation managed well and optimally.

Methodology used in climate change analysis toward operation model of Sutami Reservoir is Stochastic Dynamic Program and it is obtained a policy system of operation model output before and after climate change.

Based on the result of analysis, it shows that there is climate change in Sutami Reservoir where it is signed that optimally reservoir output is changed. In the table of optimally reservoir output shows that before climate change the output policy is still in good condition while after it, the output policy is change where there is any displacement of wet season and dry season in which it causes the debit to Sutami Reservoir changed from what had been expected.

Key words: climate change, reservoir operation model, stochastic dynamic program

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perubahan iklim merupakan perubahan baik pola maupun intensitas unsur iklim pada waktu tertentu. Lebih sering

terjadinya kejadian cuaca ekstrim, menyebabkan berubahnya pola musim dan peningkatan luasan daerah rawan kekeringan. Perubahan iklim merupakan perubahan pada komponen iklim yaitu suhu, curah hujan,

kelembaban, evaporasi, arah dan kecepatan angin, dan perawanan. Perubahan iklim dapat menyebabkan adanya pergeseran musim. Di Indonesia, musim mengalami pergeseran baik pada awal musim maupun panjang musim. Pergeseran tersebut terjadi di musim kemarau dan musim hujan, baik maju maupun mundur. Penyebab perubahan iklim adalah pemanasan global dan dipercepat secara signifikan oleh aktivitas manusia.

Waduk Sutami adalah waduk yang difungsikan untuk menampung kelebihan air hujan dan debit Sungai Brantas, untuk kemudian disimpan. Debit sungai digunakan untuk memenuhi kebutuhan air dimusim kemarau. Debit yang dialirkan bergantung pada kebutuhan di hilir, yaitu memenuhi kebutuhan air irigasi pada daerah irigasi di hilir Sutami. Daerah hilir waduk termasuk daerah yang memiliki sistem pengairan optimal. Diharapkan dengan adanya waduk ini dapat meningkatkan perekonomian dan kesejahteraan masyarakat di daerah irigasi hilir waduk Sutami, dan masyarakat Sumber Pucung pada umumnya.

Identifikasi Masalah

Melihat masalah perubahan iklim yang terjadi saat ini dan akibatnya pada kapasitas tampungan waduk, maka perlu diadakannya studi analisa terhadap perubahan pola operasi waduk pada saat sebelum dan sesudah perubahan iklim yang terjadi di Waduk Sutami.

Masalah utama dari pengoperasian waduk adalah upaya untuk menyeimbangkan antara debit yang masuk (*inflow*), debit yang keluar (*outflow*), dan perubahan tampungan. Oleh karena itu masalah tentang pengoperasian waduk harus terencana sesuai dengan kapasitas dan debit yang ada.

Batasan Masalah

Studi ini membahas tentang perubahan pola operasi Waduk Sutami akibat perubahan iklim. *Outflow* debit yang dikeluarkan harus sesuai dengan debit *inflow*. Adapun batasan-batasan masalah dalam studi ini adalah:

1. Obyek Studi dilaksanakan pada Waduk Sutami, Desa Karangates, Kecamatan Sumber Pucung, Kabupaten Malang Jawa Timur.
2. Data Debit harian yang digunakan dari tahun 1982 sampai 2011.
3. Data Pola Operasi Waduk Sutami yang digunakan dari tahun 1982 sampai 2011.
4. Data Pola Operasi merupakan data *given* dari instansi Perum Jasa Tirta I.
5. Pengaruh perubahan iklim yang dianalisa hanya pada pola operasi waduk.
6. Tidak merencanakan pola operasi waduk.
7. Tidak menganalisa sedimentasi di waduk.
8. Tidak membahas analisa ekonomi.
9. Tidak membahas biaya konstruksi dan operasi pintu di waduk.

Selain batasan masalah juga digunakan beberapa asumsi, yang nanti sekiranya dapat membantu menyederhanakan masalah dalam pengerjaan studi ini.

Rumusan Masalah

Berdasarkan indentifikasi masalah dan batasan masalah seperti diuraikan di atas maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Sejak kapan terjadinya perubahan iklim ?
2. Bagaimana kondisi pola operasi waduk sutami sebelum perubahan iklim terjadi ?
3. Bagaimana kondisi pola operasi waduk sutami sesudah perubahan iklim terjadi ?

Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari studi ini adalah untuk menganalisa keadaan pola operasi waduk sebelum dan sesudah terjadinya perubahan iklim setelah ditentukan basis perubahan iklimnya, apakah terdapat perubahan yang dapat mempengaruhi pola operasi waduk

yang sudah ada dengan membandingkan kedua pola operasi waduk tersebut.

Manfaat dari studi ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap kondisi debit *inflow* dan tampungan pada waduk. Untuk dapat selalu memasok air secara cukup baik dalam kondisi musim yang berjalan normal maupun kondisi musim yang berubah secara ekstrem akibat perubahan iklim.

TINJAUAN PUSTAKA

Perubahan Iklim

Dampak dari pemanasan global terhadap lingkungan dan kehidupan, dapat dibedakan menurut tingkat kenaikan suhu dan rentang waktu. Bila suhu bumi meningkat hingga 3°C diramalkan sebagian belahan bumi akan tenggelam, karena meningkatnya muka air laut akibat melelehnya es di daerah kutub, misalnya Bangladesh akan tenggelam. Bencana tsunami akan terjadi lagi di beberapa tempat, kekeringan dan berkurangnya beberapa mata air, kelaparan dimana-mana. Akibatnya banyak penduduk dari daerah-daerah yang terkena bencana akan mengungsi ke tempat lain. Peningkatan jumlah pengungsi di suatu tempat akan berdampak terhadap stabilitas sosial dan ekonomi, kejadian tersebut sudah sering kita dengar terjadi di Indonesia pasca bencana.

Model Optimasi

Dalam hal Yang dimaksud model optimasi adalah penyusunan suatu model sistem yang sesuai dengan keadaan nyata yang nantinya dapat diubah ke dalam model matematis dengan pemisahan elemen-elemen pokok, agar suatu penyelesaian yang sesuai dengan sasaran atau tujuan pengambilan keputusan dapat tercapai (Subagyo, 1984:4). Hal ini melibatkan pandangan pada masalah dalam tautan keseluruhan sistem.

Optimasi Dengan Program Dinamik Stokastik

Suatu proses pengambilan keputusan (*decision*) yang multistap dikatakan bersifat stokastik apabila paling sedikit satu dari keputusan-keputusan dalam proses tersebut bersifat acak (*random*). Dalam kasus operasi waduk dalam studi ini, bersifat *random* terjadi menurut cara berikut :

Return-return ditentukan secara unik (deterministik) oleh state-state yang diakibatkan oleh satu atau lebih keputusan bersifat tidak pasti (*random*). Yang dioptimasi (fungsi tujuan) yaitu *expected value* (nilai yang diharapkan yang biasanya disingkat EV) dari return yang berupa energi listrik yang dihasilkan oleh PLTA. Secara umum, suatu nilai EV (*Expected Value*) dihitung dengan rumus :

$$E.V = \sum (\text{Nilai komponen kejadian}) \times (\text{Probabilitas komponen kejadian})$$

Dimana :

$$\sum (\text{Probabilitas Komponen Kejadian}) = 1$$

Karena komponen EV yang stokastik tergantung dari nilai optimal tahap berikutnya, maka prosedur penyelesaiannya harus dengan cara *backward recursive*.

Prosedure penyelesaian untuk permasalahan ini adalah sebagai berikut :

1. Proses *backward recursive* ini dimulai dari tahap Desember dan bergerak mundur ke arah Januari.
2. Untuk setiap kombinasi pasangan state volume tampungan waduk awal tahap dan keputusan besarnya lepasan waduk, hitung EV return tahap ini dengan menggunakan persamaan $E.V = \sum$. Komponen kejadian di sini adalah volume *inflow* untuk tahap ini. Sedangkan nilai komponen kejadian adalah *net benefit* yang merupakan selisih dari *benefit* PLTA dan *cost*

banjir yang dapat dicari dengan cara sebagai berikut :

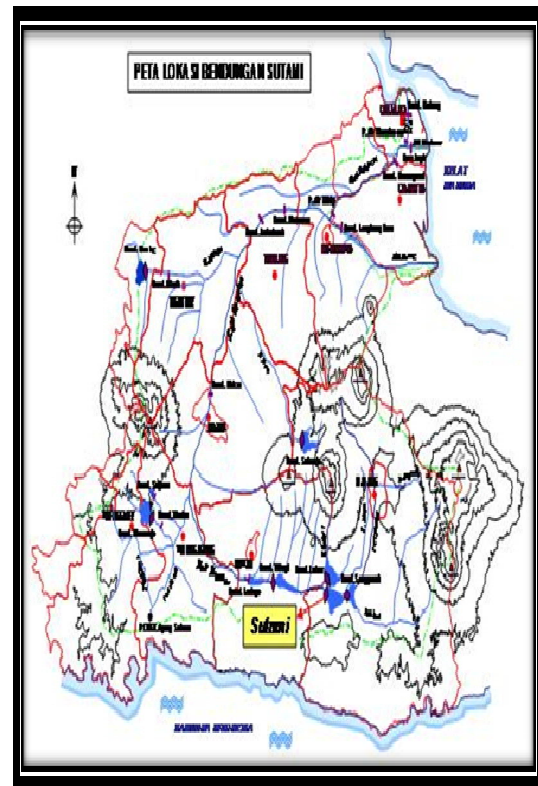
- Dengan persamaan stage transformation hitunglah state volume tampungan waduk akhir tahap.
 - Nilai ini, bersama dengan state volume tampungan waduk awal tahap, digunakan untuk mencari *net benefit* per unit volume inflow.
3. Untuk setiap kombinasi pasangan state volume tampungan waduk awal tahap dan keputusan besarnya lepasan waduk, hitung *EV return* optimal tahap berikutnya dengan menggunakan persamaan $E.V = \Sigma$. Komponen kejadian di sini adalah volume inflow untuk tahap ini. Sedangkan nilai komponen kejadian adalah *return* optimal tahap berikutnya, yang dapat dicari dengan cara sebagai berikut :
 - Dengan persamaan stage transformation hitunglah state volume tampungan waduk akhir tahap.
 - Nilai ini digunakan sebagai indeks untuk mencari *return* optimal tahap berikutnya.
 4. Untuk setiap kombinasi pasangan state volume tampungan waduk awal tahap dan keputusan besarnya lepasan waduk, hitung *EV return* = *EV return* tahap ini (dari no.2 + *EV return* optimal tahap berikutnya (dari no.3).
 5. Dari semua *EV return* untuk suatu state volume tampungan waduk awal tahap tertentu, pilih yang optimum (maksimum). Juga dicatat keputusan besarnya lepasan waduk yang berhubungan nilai optimum ini.
 6. Apabila semua sel pada tabel optimasi telah terisi, maka lakukan lagi prosedur tersebut di atas (mulai langkah no.2) untuk tahap sebelumnya (karena bergerak mundur).

Kondisi Daerah Studi

Waduk Sutami merupakan salah satu waduk besar yang berada pada Provinsi Jawa Timur. Lokasi waduk ini terletak di Desa Karangates, Kecamatan

Sumberpucung, Kabupaten Malang. Lokasi waduk berada pada Sungai Brantas, ± 14 km di hilir Waduk Sengguruh dan ± 35 km disebelah selatan kota Malang. Waduk Sutami dilaksanakan mulai tahun 1961 sampai tahun 1972.

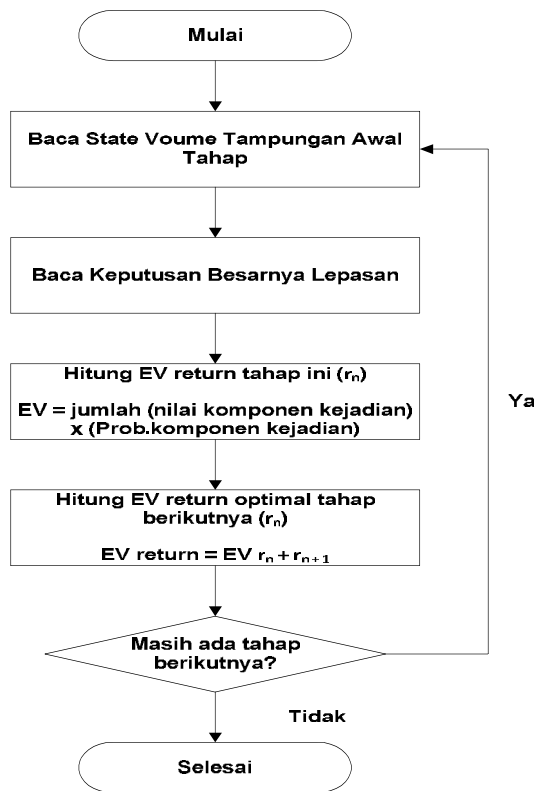
DAS Brantas yang secara geografi masuk dalam Wilayah Daerah Aliran Sungai Brantas yang terletak pada titik koordinat $110^{\circ}30' - 112^{\circ}55'$ Bujur Timur dan $7^{\circ}01' - 8^{\circ}15'$ Lintang Selatan. Secara administratif berbatasan dengan:
 Sebelah Utara : Kabupaten Mojokerto
 Sebelah Timur : Kabupaten Sidoarjo
 Sebelah Selatan : Kabupaten Malang
 Sebelah Barat : Kabupaten Nganjuk



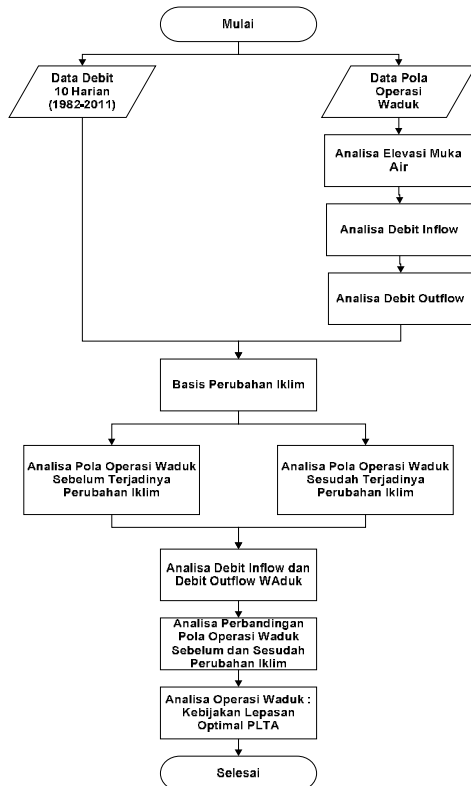
Gambar 1. Lokasi Studi

Metode Penelitian

Metode penelitian dalam kajian ini adalah penelitian yang merupakan penelitian kasus dan penelitian lapangan (*case study and field reseacrd*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sistem kebijakan pola operasi waduk sutami akibat perubahan iklim.



Gambar 2. Bagan Alir Optimasi Program Dinamik Stokastik



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan *Basis Perubahan Iklim*

Perubahan iklim merupakan suatu fenomena yang diakibatkan oleh beberapa faktor alam seperti curah hujan, klimatologi, dan lain-lain. Sampai saat ini masih dilakukan penelitian di beberapa negara untuk mengetahui secara pasti faktor yang paling berpengaruh dalam perubahan iklim ini sendiri.

Penentuan waktu dasar perubahan iklim ini dengan cara membandingkan data inflow daerah pengaliran sungai kali brantas dari tahun 1982 – 1996 dengan tahun 1997 – 2011.

Menurut dari berbagai referensi yang didapat, *basis* perubahan iklim terjadi pada tahun 1997. Dengan referensi dari berbagai sumber tersebut dapat diasumsikan untuk waktu dasar penentuan perubahan iklim pada tahun 1997.

Analisa Debit

Data debit *inflow* historik yang dibutuhkan adalah data debit bulanan total yang masuk ke dalam sistem waduk sutami dan waduk lahor. Data debit *inflow* historik yang tersedia seluruhnya sepanjang 30 tahun (1978 s/d 2011). Dari data *inflow* yang ada diuji untuk mencari sebaran yang sesuai, dengan menggunakan uji Chi-Square dan uji Smirnov Kolmogorov.

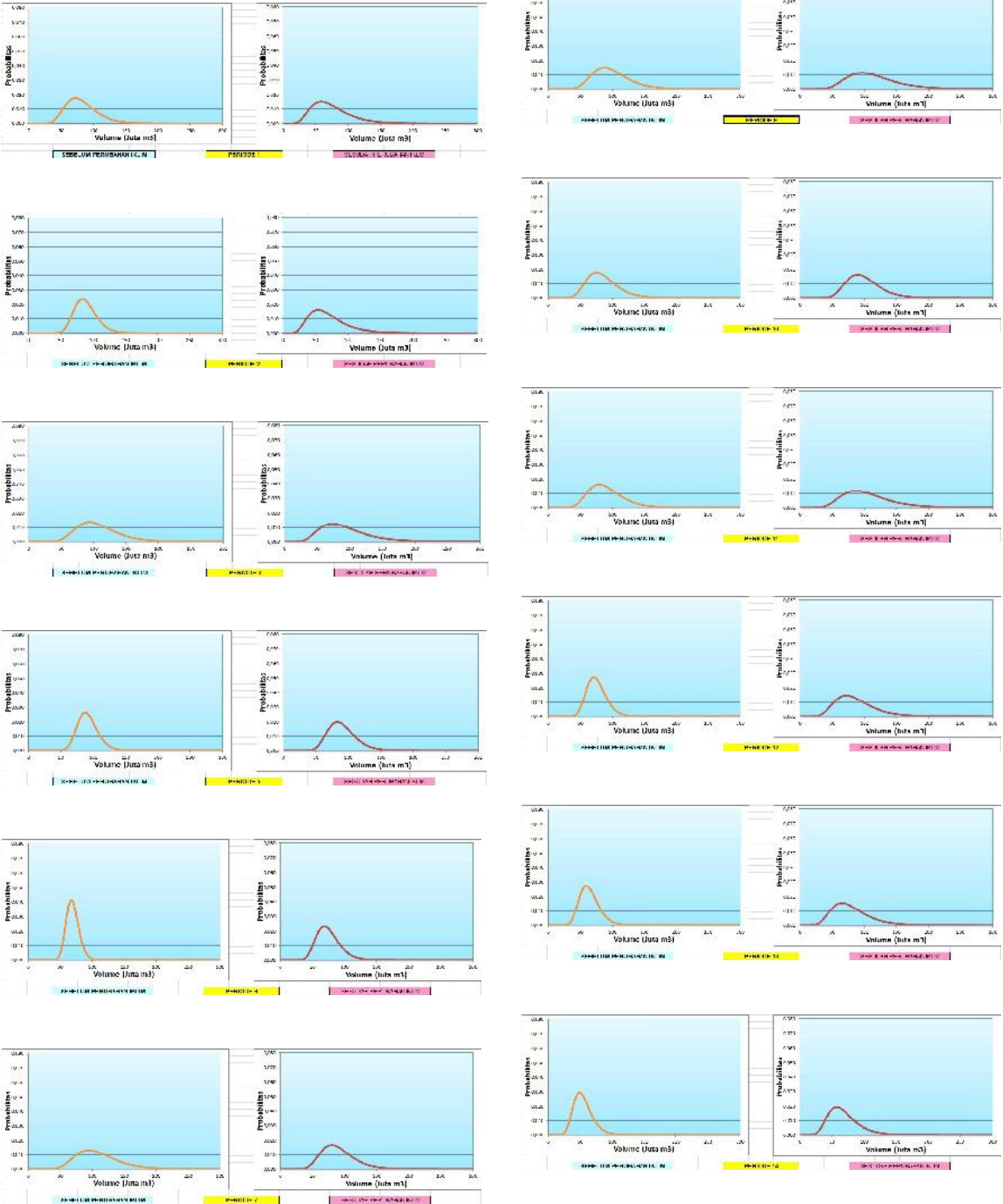
Distribusi Probabilitas

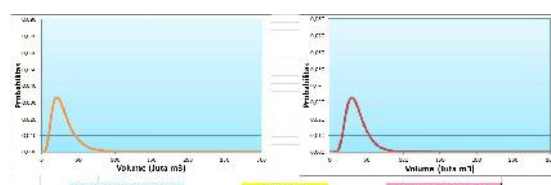
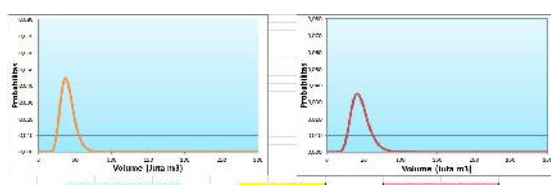
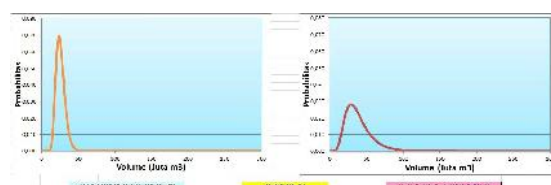
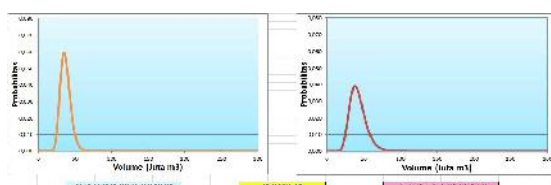
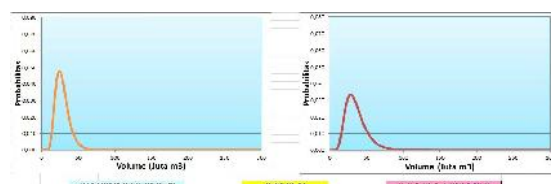
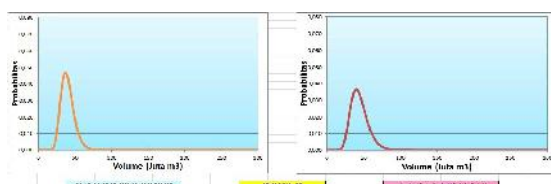
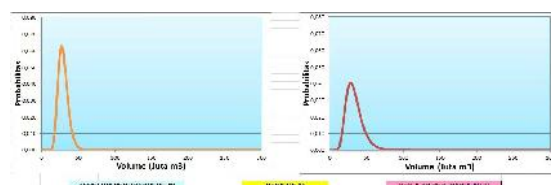
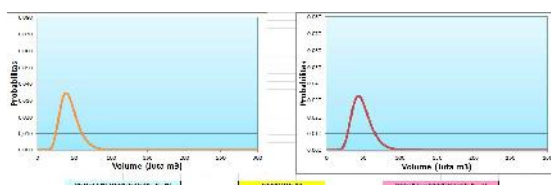
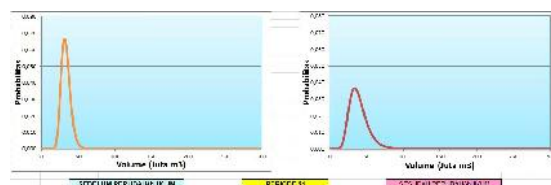
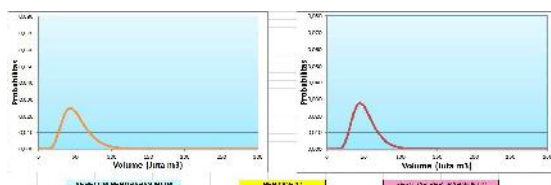
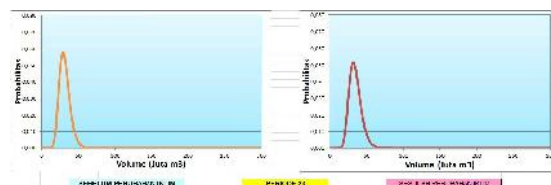
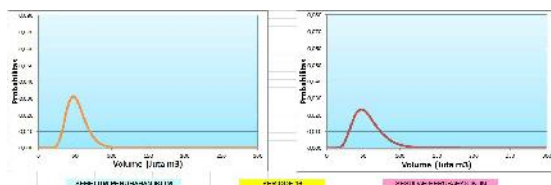
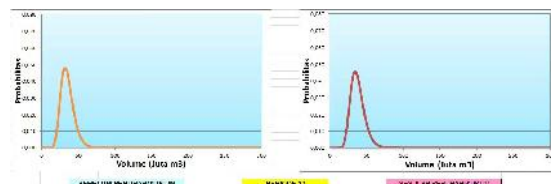
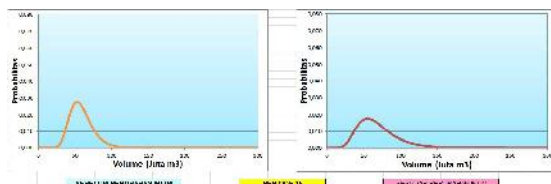
Untuk mencari sebaran probabilitas sebelumnya data debit *inflow* yang ada diubah menjadi data volume *inflow* bulanan. Dari volume *inflow* bulanan yang ada sepanjang 30 tahun dihitung nilai rata-rata dan simpangan baku dari volume *inflow* tiap bulan.

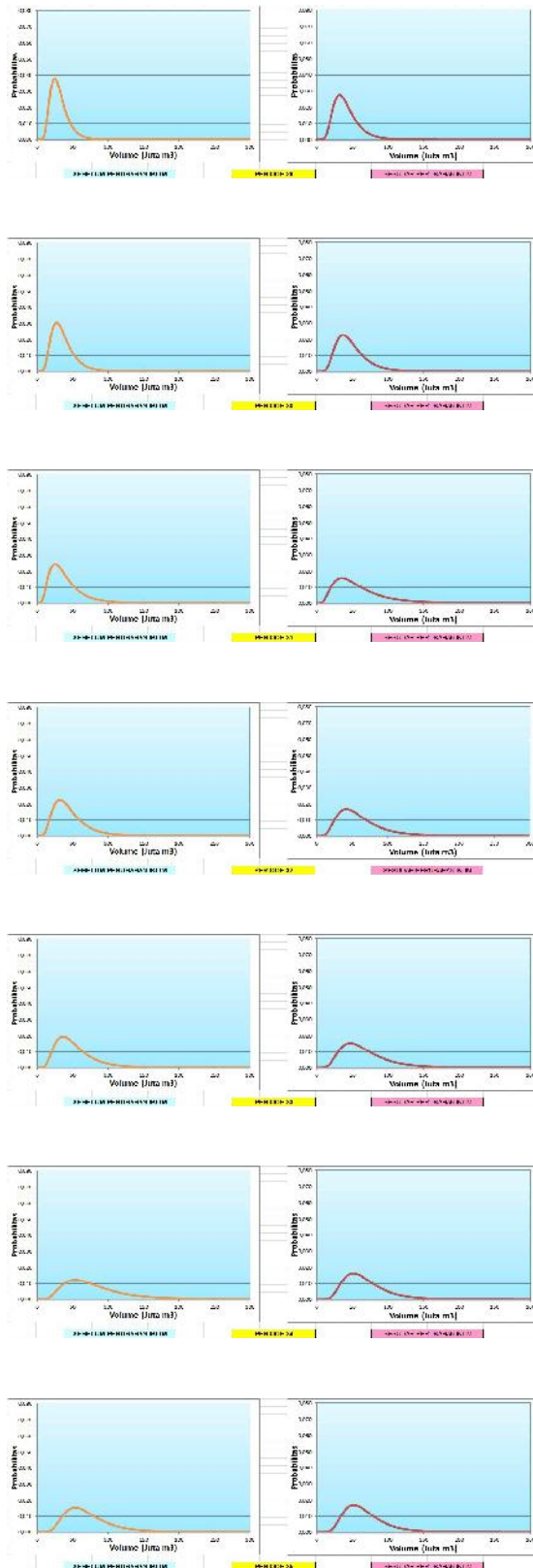
Besarnya *inflow* yang masuk ke dalam waduk *unregulated* dan acak. Dalam analisa ini diambil nilai 0 hingga 350. Bila nilai rata-rata dari simpangan baku telah diketahui, maka dapat dicari

distribusi probabilitas dari debit *inflow* dari nilai 0 hingga 350 berdasarkan persamaan densitas variabel acak normal.

Grafik 1. Probabilitas Sebelum dan Sesudah Perubahan Iklim







Optimasi Program Dinamik Stokastik Waduk Sutami

Optimasi berarti mencari nilai terbaik dari fungsi sasaran. Dalam kajian ini sebagai fungsi sasaran adalah memperoleh nilai kebijakan lepasan yang paling optimal pada pola operasi waduk Sutami. Fungsi sasaran ini juga harus melalui atau memenuhi kendala yang ada.

Pada optimasi waduk stokastik ini mempertimbangkan semua kemungkinan state tampungan waduk. State tampungan waduk ditetapkan pada nilai minimum (tampungan LWL) hingga tampungan maksimum (tampungan HWL) yaitu pada state tampungan 43 juta m^3 hingga 177 juta m^3 .

Pada recursive pertama dimulai dengan nilai *return* = 0 untuk semua state tampungan waduk pada tahap Periode 1 sampai periode 36. Hasil optimasi operasi waduk stokastik ini adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Kebijakan Lepasn Sebelum Perubahan Iklim

TABEL KEBIJAKAN LEPASAN OPTIMAL										(Sebelum Perubahan Iklim)										
Periode	STATUS TAMPUNGAN AWAL WADUK																			
ke	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
36	51	51	52	53	53	54	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
35	27	28	29	30	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
34	18	19	20	21	22	23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	3	4	5	6	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8	6	7	8	9	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
7	29	30	31	32	33	34	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
6	1	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	2	3	4	6	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
4	16	17	18	19	20	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
3	31	32	33	34	35	36	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
2	23	24	25	27	28	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
1	16	17	18	19	20	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Sumber	Perubahan																			

Sumber : Perhitungan

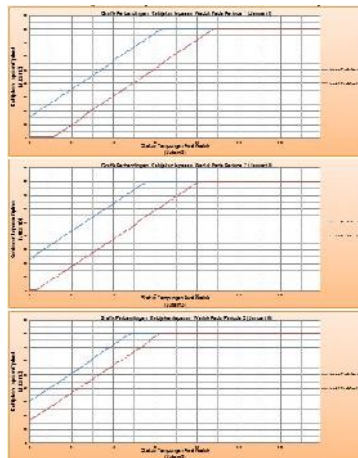
Tabel 2. Kebijakan Lepasn Sesudah
Perubahan Iklim

Periode	STATUS TAMPUNGAN AWAL WADUK										133	134	135	136	137	138	139
18	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	80	80	80	80	80	80	80
19	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	80	80	80	80	80	80	80
20	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	80	80	80	80	80	80	80
21	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	80	80	80	80	80	80	80
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
43	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
44	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
46	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
48	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
49	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
53	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
56	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
57	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
61	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
64	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
66	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
67	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
68	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
69	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
71	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
74	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
76	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
78	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
79	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
82	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
83	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
84	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
85	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
86	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
87	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
88	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
89	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
91	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
93	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
94	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
96	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
97	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80	80	80	80	80	80	80

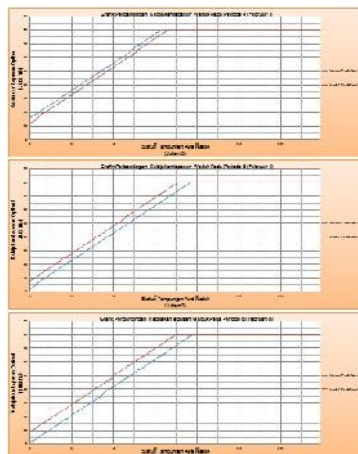
Sumber : Perhitungan

Gratik Perbandingan Kebijakan Lepasn
Waduk Sebelum dan Sesudah Perubahan
Iklim Tiap Periode

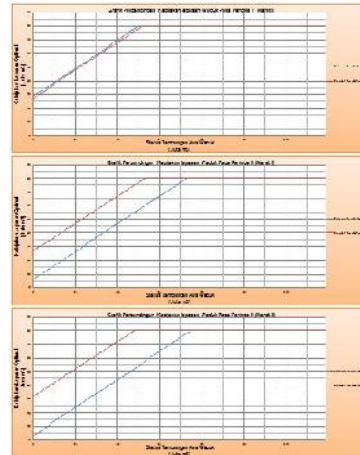
Gratik 2. Bulan Januari



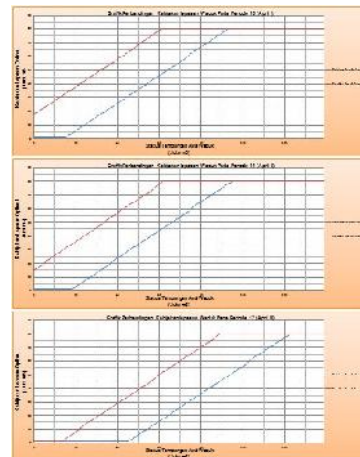
Gratik 3. Bulan Februari



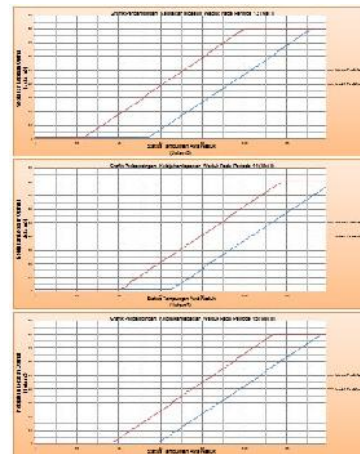
Gratik 4. Bulan Maret



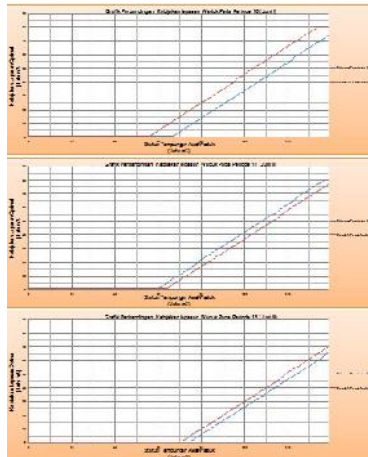
Gratik 5. Bulan April



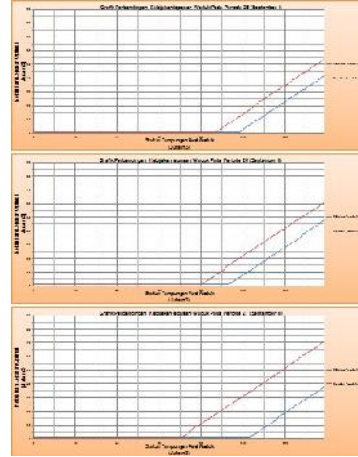
Gratik 6. Bulan Mei



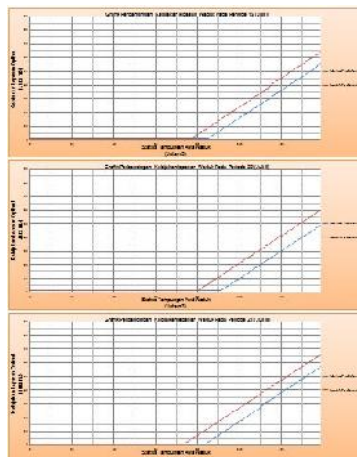
Grafik 7. Bulan Juni



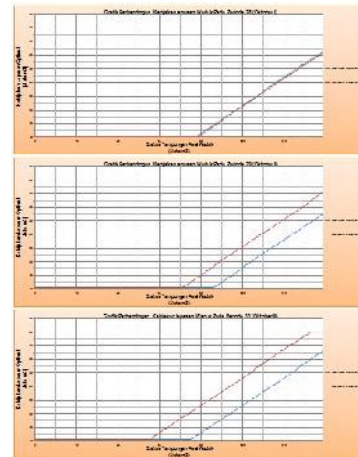
Grafik 10. Bulan September



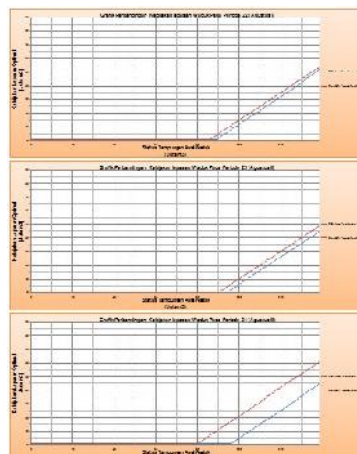
Grafik 8. Bulan Juli



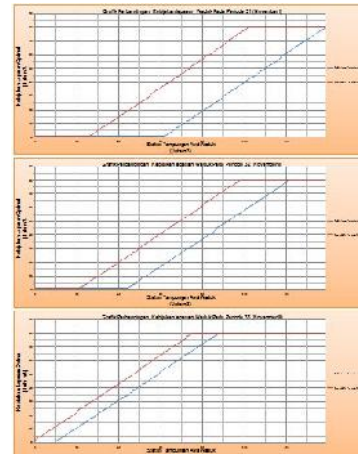
Grafik 11. Bulan Oktober



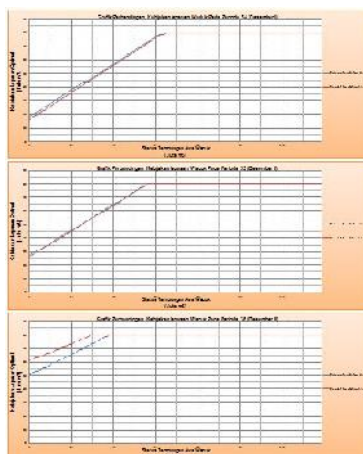
Grafik 9. Bulan Agustus



Grafik 12. Bulan November



Grafik 13. Bulan Desember



Pembahasan Proses Kebijakan Lepas Optimal Waduk

Perubahan iklim dikemukakan pertama kali pada awal abad 19 pada tahun 1938 oleh insinyur berkebangsaan Inggris, Guy Stewart Callendar. Dia mengungkapkan bahwa perubahan iklim ini disebabkan oleh efek rumah kaca.

Methane: Pada tahun 1859, John Tyndall menetapkan bahwa gas batubara, campuran metana dan gas lainnya, sangat diserap radiasi inframerah. Metana kemudian terdeteksi di atmosfer pada tahun 1948, dan pada 1980-an ilmuwan menyadari bahwa emisi manusia memiliki dampak yang besar. [Spencer Weart (2003). "Other Greenhouse Gases". The Discovery of Global Warming.]

Chlorofluorocarbon: Pada tahun 1973, ilmuwan Inggris James Lovelock berspekulasi bahwa chlorofluorocarbons (CFC) dapat memiliki efek pemanasan global. Pada tahun 1975, V. Ramanathan menemukan bahwa molekul CFC bisa 10.000 kali lebih efektif dalam menyerap radiasi inframerah dari molekul karbon dioksida, membuat CFC potensial penting meskipun konsentrasi yang sangat rendah di atmosfer. Sementara sebagian besar pekerjaan awal CFC terfokus pada peran mereka dalam penipisan ozon, pada tahun 1985 para

ilmuwan telah menyimpulkan bahwa CFC bersama dengan metana dan gas-gas lainnya bisa sepenting efek iklim seperti kenaikan CO₂. [Spencer Weart (2003). "Other Greenhouse Gases". The Discovery of Global Warming.]

Perubahan iklim global berpengaruh terhadap temperatur suhu, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari, kecepatan angin, curah hujan dan debit di sungai. Tingginya intensitas curah hujan setelah terjadinya perubahan iklim berdampak terhadap fluktuasi debit sungai pada musim hujan dan kemarau. Bencana banjir dan kekeringan merupakan peristiwa alam yang semakin sering di jumpai saat ini. Menurut *History of climate change science* perubahan iklim awal mulanya terjadi pada tahun 1990 (*first Assessment Report*) dimana pada tahun tersebut siklus permusiman sudah tidak menentu dimana untuk daerah tropis seperti Indonesia yang memiliki 2 musim yaitu musim hujan dan musim kemarau, siklusnya yaitu pada saat musim kemarau terjadi hujan yang cukup besar sedangkan pada saat musim hujan terjadi defisit air karena meningkatnya suhu bumi. Kemudian *Assessment Report* keluar lagi pada tahun 1995, 2001, 2007, jadi dapat disimpulkan bahwa perubahan iklim terjadi antara tahun 1990 – 2007 dimana di antara tahun tersebut terjadi puncak-puncaknya perubahan iklim global yang bisa dirasakan manusia seperti kemarau panjang, naiknya suhu bumi secara ekstrem, dan terjadinya banjir di beberapa daerah.

Yang dimaksud dengan perubahan iklim adalah adanya perubahan mengenai :

1. Perubahan Konsentrasi Karbon Dioksida

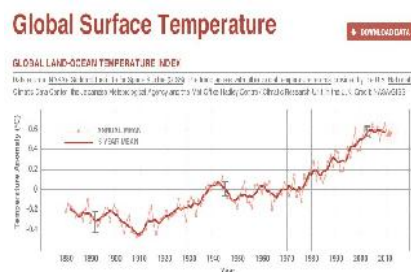
Carbon Dioxide Concentration



Berdasarkan data yang diperoleh dari badan pusat antariksa Amerika (NASA America)

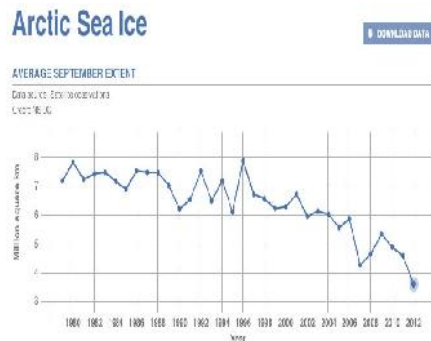
(http://climate.nasa.gov/key_indicators#globalTemp) dapat diketahui bahwa konsentrasi CO₂ tiap tahunnya mengalami perubahan yang cukup signifikan. Dari tren yang terjadi titik tertinggi terjadi pada kurun waktu dari tahun 1950 – sampai 2013. Dan dapat dipastikan akan menjadi semakin tinggi pada tahun – tahun berikutnya.

2. Perubahan Suhu Bumi



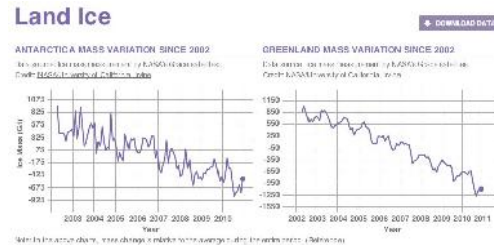
Dampak yang ditimbulkan oleh peningkatan konsentrasi CO₂ pada bumi adalah adanya pemanasan suhu permukaan bumi. Dari data dapat diketahui bahwa tren perubahan suhu tersebut membuat suhu bumi semakin panas dari tahun ketahun.

3. Es Pada Kutub



Dampak dari pemanasan tersebut adalah es yang berada pada masing-masing kutub (dalam hal ini kutub utara dan kutub selatan mengalami penurunan pula. Perubahan ini tentunya akan menyebabkan kondisi yang anomaly (kondisi yang ekstrim yang berbeda) pada bagian bumi lainnya.

4. Permukaan Es



Selain es pada daerah kutub daratan yang tertutup es juga mengalami perubahan (berkurang). Dengan terjadinya 2 kondisi tersebut maka dapat dipastikan perubahan yang terjadi setelahnya adalah kenaikan muka air laut di bumi.

Hubungan keterkaitan antara perubahan iklim global terhadap waduk dan DAS (Daerah Aliran Sungai)

Dampak dari perubahan iklim global terhadap kondisi DAS antara lain adalah

1. Terjadi perubahan iklim

Iklim yang dimaksud disini adalah perubahan rentang waktu hujan. Umumnya (sebelum perubahan iklim terjadi) hujan pada wilayah seperti Indonesia terjadi antara bulan juli – desember. Namun dengan suhu yang cukup panas dan berubahnya ekosistem DAS maka musim hujan mengalami pergeseran waktu.

2. Kondisi curah hujan yang anomaly

Kondisi lain yang dapat kita temui pada saat ini adalah besaran curah hujan yang terjadi pada suatu kawasan DAS. Pada musim hujan, tren menunjukkan hujan yang terjadi cukup tinggi daripada tahun-tahun sebelumnya, sedangkan pada musim kering (kemarau) kondisinya sangat kering.

Dari kedua dampak tersebut mengakibatkan sistem pada suatu DAS juga mengalami perubahan. Jika kita meninjau suatu bangunan air dalam hal ini waduk, tentunya kondisi tersebut tentu sangat mempengaruhi daripada pola operasi suatu waduk.

Untuk waduk sebagai pemasok listrik (PLTA) tentu sangat dirugikan karena jika pada musim kering yang cukup ekstrim tentunya pasokan listrik untuk PLTA akan sangat terhambat. Begitu juga dengan irigasi, dan air baku.

Pada penelitian ini perubahan iklim di lihat dari membandingkan data debit inflow sungai untuk waduk, dimana data debit inflow tersebut sudah dipengaruhi oleh perubahan iklim yang terjadi selama ini. Data debit yang dipergunakan mulai tahun 1982 – 2011 dimana puncak terjadinya iklim itu terjadi diantara tahun 1990 – 2007. Penelitian ini membandingkan debit inflow sungai yang masuk ke waduk antara tahun 1982 – 1996 dengan 1997 – 2011. Penelitian ini menetapkan tahun 1982 – 1996 itu sebagai tahun sebelum terjadi perubahan iklim dan pada tahun 1997 – 2011 itu sebagai tahun terjadinya perubahan iklim.

Pengolahan data debit inflow yang masuk ke waduk itu berpengaruh terhadap kebijakan lepasan pola operasi waduk, di mana disini lokasi yang di pilih yaitu waduk sutami. Jadi penelitian ini melihat bagaimana pola operasi waduk sutami sebelum dan sesudah terjadinya perubahan iklim. Waduk sutami sendiri merupakan waduk harian dimana kebijakan lepasan pola operasinya yaitu kebijakan lepasan optimal untuk PLTA. Jadi penelitian ini membandingkan kebijakan lepasan PLTA sebelum dan sesudah perubahan iklim.

Penelitian “studi optimasi pola operasi waduk sutami terhadap perubahan iklim” dalam pengerjaannya menggunakan metode program dinamik stokastik. Data debit inflow baik sebelum perubahan iklim (1982 – 1996) dan setelah perubahan iklim (1997 – 2011) di olah menjadi data probabilitas (data sebaran / distribusi) kemudian data dihubungkan dengan data kurva kapasitas waduk, disini data kurva kapasitas waduk yang di pakai yaitu kurva kapasitas waduk tahun 1997 dimana dalam kurva

kapasitas tersebut tampungan efektif sudah dipengaruhi oleh besaran sedimen yang dipengaruhi dari tahun – tahun sebelumnya. Setelah mengetahui nilai probabilitas dan tampungan efektif waduk sutami diantara sebelum dan sesudah perubahan iklim maka data diolah menjadi tabel *Recursive* dimana pada tabel ini untuk mendapatkan nilai – nilai *Expected Value* (EV) yang diperoleh dari hubungan debit inflow dan nilai probabilitas yang di buat dari 0 – 350 sebaran di mana data tampungan awal waduk sebesar 139 juta m³ dan lepasan maksimal waduk sebesar 80 juta m³ yang dihubungkan juga dengan nilai Enersi tahap PLTA pada waduk sutami.

Dari tabel *Recursive* diperoleh tabel Nilai Fungsi Tujuan Optimal pada setiap periodenya dimana tiap bulan terdapat 3 periode sehingga dalam setahun terdapat 36 periode dengan Status tampungan awal waduk antara 0 – 139 kemungkinan. Dari tabel Nilai Fungsi Tujuan Optimal di hubungan dengan tabel Perhitungan *Recursive* Stokastik diperoleh tabel Kebijakan Lepas Optimal dalam Juta m³. Dari tabel Kebijakan Lepas Optimal untuk PLTA sebelum dan sesudah perubahan iklim mempunyai nilai debit lepasan yang mempunyai selisih cukup jauh dalam periodenya. Dilihat dari 3 trend perbedaan sebelum dan sesudah terjadinya perubahan iklim yaitu :

- Di lihat dari perbandingan musim basah dan musim kering.

Pada poin pertama dilihat dari perbandingan musim basah dan musim kering, dimana musim basah terdapat pada periode 34,35,36,1 sampai 15 dan musim kering terdapat pada periode 16 sampai periode 32. Pada saat sebelum perubahan iklim yaitu tahun 1982 – 1996 debit inflow yang masuk cukup normal dimana pada saat musim basah dan musim kering dapat di lihat pada tabel kebijakan lepasan sedangkan pada saat sesudah

perubahan iklim debit inflow mulai mengalami perubahan dimana pada transisi kemusim hujan masih terjadi kekurangan debit yang mempengaruhi terhadap kebijakan lepasan waduk pada saat musim basah dan pada transisi dari musim basah kemusim kering debit inflow yang masuk ke waduk masih cukup besar.

- Di lihat dari tampungan awal waduk. kalo dilihat dari tampungan awal waduk dapat dilihat pada kondisi sebelum perubahan iklim status tampungan awal waduk mulai maksimal pada status tampungan awal 38 pada periode 36, sedangkan kondisi setelah perubahan iklim status tampungan awal waduk mulai maksimal pada status tampungan awal 29 pada periode 36. Pada periode 30 sebelum perubahan iklim status tampungan awal maksimal tidak terjadi sedangkan setelah perubahan iklim pada periode 30 status tampungan awal waduk maksimal terjadi pada status tampungan awal 133. Begitu juga pada periode berikutnya dimana pada periode tertentu saat musim basah masih saja status tampungan awal waduk masih belum maksimal karen dipengaruhi oleh pergeseran musim basah sehingga pada musim kering malah ditemukan kondisi status tampungan yang maksimal.
- Di lihat dari kebijakan lepasan. Kondisi pola operasi waduk Sutami sebelum perubahan iklim terjadi pada tahun 1982 sampai tahun 1996 memiliki kebijakan lepasan waduk masih baik. Dimana pada musim hujan atau antara periode 34,35,36,1 sampai 15 waduk Sutami memiliki kebijakan lepasan yang tinggi yaitu pada periode musim basah pada kondisi tampungan awal waduk 0-70 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 77 juta m^3 , kondisi tampungan awal waduk 71-139 nilai rata-rata 55 juta m^3 sampai 80 juta m^3

(kebijakan lepasan optimal) dan kondisi tampungan awal waduk 0-70 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 62 juta m^3 dimana di dominasi kebijakan lepasan optimal 1 juta m^3 serta kondisi tampungan awal waduk 71-139 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 80 juta m^3 pada periode musim kemarau 16 sampai 33. Pada periode musim kemarau waduk Sutami masih memiliki debit yang cukup untuk menyuplai air PLTA. Hanya saja pada periode 24 - 27 di daerah waduk sutami mengalami kekurangan debit yang *ekstrem* dikarenakan musim kemarau yang panjang, akibatnya kebijakan lepasan hanya 1 juta m^3 pada kondisi tampungan waduk 0 - 103. Hal tersebut sangat mempengaruhi produksi listrik PLTA waduk Sutami yang terlihat menurun secara signifikan. Rata-rata produksi listrik sebelum perubahan iklim masih diatas 500 juta kWh per tahunnya. Kondisi pola operasi Waduk Sutami sesudah perubahan iklim terjadi pada tahun 1997 sampai tahun 2011 terlihat adanya perbedaan pada kebijakan lepasan waduk di periode musim kemarau dengan kebijakan lepasan waduk sebelum perubahan iklim terjadi. Dapat di lihat dari grafik kebijakan lepasan pada periode musim basah pada kondisi tampungan awal waduk 0-70 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 80 juta m^3 , kondisi tampungan awal waduk 71-139 nilai rata-rata 80 juta m^3 (kebijakan lepasan optimal) dan kondisi tampungan awal waduk 0-70 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 51 juta m^3 dimana di dominasi kebijakan lepasan optimal 1 juta m^3 serta kondisi tampungan awal waduk 71-139 nilai rata-rata 1 juta m^3 sampai 71 juta m^3 pada periode musim kemarau 16 sampai 33. Pada musim kemarau intensitas debit *inflow* yang masuk ke dalam waduk sangat kecil, sehingga produksi listriknya juga ikut menurun sesuai debit *outflow* yang dikeluarkan

waduk.. Namun pada periode tertentu daerah di waduk sutami mengalami musim hujan *ekstrem* yang mengakibatkan debit *inflow* waduk Sutami naik yang tidak langsung mempengaruhi pada kebijakan lepasan waduk.

Maka dalam penelitian ini perubahan iklim yang terjadi selama ini tanpa disadari sangat berpengaruh terhadap sistem pola operasi waduk sutami dari sistem pola operasi waduk yang selama ini sudah direncanakan.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya dan berlandaskan pada rumusan masalah, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari *History Of Climate Change Science* diketahui bahwa puncak perubahan iklim terjadi di antara tahun 1990 – 2007. Sehingga pada penelitian ini dan berdasarkan data yang diperoleh untuk membandingkan bagaimana pola operasi waduk sebelum dan setelah perubahan iklim maka pada tahun 1997 sebagai tahun dasar perubahan iklim.
2. Kondisi pola operasi waduk sutami sebelum perubahan iklim masih berada di kondisi yang baik dimana kebijakan pelepasan untuk PLTA pada saat musim basah dan musim kering itu memenuhi ketersediaan kondisi tampungan awal.
3. Kondisi pola operasi waduk sutami setelah perubahan iklim mulai mengalami pergeseran kebijakan lepasan dimana pada saat memasuki musim kering, kebijakan lepasan waduk masih cukup besar dari yang direncanakan sedangkan saat memasuki musim basah malah kebijakan lepasan waduk cukup kecil/minimum.

Saran

Dalam penelitian ini penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan. Maka dari itu jika penelitian ini dilanjutkan sebaiknya menggunakan data sekunder yang lebih *detail*. Dengan analisa-analisa yang dilakukan pada penelitian ini perlu dilakukan simulasi operasi waduk jika ingin diimplementasikan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Armi, S. Dkk. 2008. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ketinggian Muka Laut Di Wilayah Banjarmasin. *Jurnal Ekonomi Lingkungan* Vol.12/No.2/2008.
- Asri, M., dan Hidayat.1984. *Linear Programming*. Yogyakarta : BPFE Bukti Pemanasan Global tanggal akses 12 Desember 2012
www.drn.go.id/download/Paparan-PemanasanGlobal (Paulus).
[pdfhttp://www.solver.com/pricemenu.html](http://www.solver.com/pricemenu.html).
- Montarich, L., & Soetopo, W.2009. *Pengantar Manajemen Teknik Sumber Daya Air*. Malang : CV Citra.
- Montarich, L. 2009.*Hidrologi Teknik Sumber Daya Air1*.Malang : CV Citra
- Montarich, L. 2010. *Hidrologi Praktis*. Bandung : CV Lubuk Agung.
- Pemanasan dan perubahan iklim tanggal akses 12 Desember 2012. www.ofm-jpic.org/globalwarming/pdf/indonesia.pdf
- Soemarto, C.D. 1986. *Hidrologi Teknik Edisi 1*. Surabaya : Usaha Nasional.
- Sosrodarsono, S dan Takeda, K. 1978. *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta : Pradnya Paramita.
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses Desember 2012
<http://www.atayaya.net>.
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses Juni 2013
<http://www.guardian.co.uk/environment/climate-change>
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses Juni 2013
2012[http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific opinion on climate change](http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_opinion_on_climate_change)
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses Juni 2013

- 2012 https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change_denial
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses
Juni 2013
2012 http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_climate_change_science
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses
Juni 2013
2012 http://mydasdata.larc.nasa.gov/las4/getUI.do?dsid=ISCCPMonthly_avg_nsa&varid=tsa_tovs&auto=true
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses
Juni 2013
http://climate.nasa.gov/key_indicators#globalTemp
- Sekilas Perubahan Iklim atau climate.html.akses
Juni 2013
<http://www.irinnews.org/report/96393/climate-change-new-urgency-to-rethink-dam-projects>