

Optimasi Pola Operasi Produksi Listrik Waduk Saguling

Muhammad Reza Fahlevi Khalawi^(*)

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275, Indonesia. Email: redisuf21man@gmail.com

Sriyana

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275, Indonesia

Hari Nugroho

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275, Indonesia

Abstrak.

Waduk Saguling sebagai pembangkit tenaga listrik yang dikelola oleh PT. Indonesia Power. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Saguling yang terletak dikawasan Bandung Barat, Bandung, Jawa Barat merupakan waduk yang mendukung sistim listrik untuk Jawa-Bali. PLTA Saguling memproduksi 700 MW dan berkontribusi 2,5 persen ke sistem Jawa-Bali yang memiliki total kapasitas 27.700 MW (M. Ahsin Sidqi, 2021). Waduk Saguling dengan luas 5.600 ha pada ketinggian 645 m diatas permukaan laut dan beroperasi dalam satu sistem kaskade yang membendung sungai Citarum sejak tahun 1988. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif untuk mengetahui pola operasi Waduk Saguling yang optimal menggunakan Metode Linear programming dan diharapkan dapat digunakan sebagai masukan dalam pola operasi Waduk Saguling. Berdasarkan hasil analisis pada optimasi menggunakan software Solver LINDO dapat disimpulkan hasil optimasi pola operasi produksi listrik menggunakan software Solver LINDO Waduk Saguling adalah hasil optimasi produksi listrik kondisi Tahun Basah, sebesar 3.877 GW, hasil optimasi produksi listrik kondisi Tahun Normal, sebesar 2.383 GWh., hasil optimasi produksi listrik kondisi Tahun Kering, sebesar 1.830 GWh. Hasil analisis biaya dari hasil optimasi untuk produksi listrik yang ditetapkan oleh PLN tahun 2022 adalah pada Tahun Basah sebesar, Rp 5.600.654.913.820,00, pada Tahun Normal sebesar, Rp 3.443.229.424.068,00, ada Tahun Kering sebesar, Rp 2.643.474.548.653,00.

Kata kunci: Waduk Saguling, PLTA

Abstract.

Saguling Reservoir works as a powerplant managed by PT. Indonesia Power. The Saguling Hydroelectric Power Plant (PLTA) located in West Bandung, West Java is a reservoir that supports the Java-Bali electricity system. The Saguling's PLTA produces 700 MW and contributes 2.5 percent to the Java-Bali system has a total capacity 27,700 MW (M. Ahsin Sidqi, 2021). Saguling Reservoir with an area of 5,600 ha at an altitude of 645 m above sea level and has been operating in a cascade system that dams the Citarum river since 1988. This research is a quantitative descriptive to determine the optimal pattern of operation the Saguling Reservoir using the Linear programming method which expected to the results can be used as input in the operation pattern of the Saguling Reservoir. Based on the analysis, the results of the optimization using the Solver LINDO software can be obtained, result from condition of optimation production electricity at Wet Year condition, amounting to 3.877 GWh, Normal Year condition, amounting to 2.383 GWh, Dry Year condition, amounting to 1.854 GWh. The results of the cost analysis from the optimization results for electricity production set by PLN in 2022 are Rp. 5.600.654.913.820,00 in the Wet Year. in the Normal Year, Rp. 3.443.229.424.068,00. In the Dry Year, it is Rp. 2.643.474.548.653,00.

Keywords: Saguling reservoir, PLTA

1. Pendahuluan

Bendungan adalah bangunan berupa urugan tanah, urugan batu, dan beton, yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk. Waduk adalah wadah buatan yang terbentuk sebagai akibat

dibangunnya bendungan. Fungsi waduk adalah untuk penyediaan air baku, penyediaan air irigasi, pengendalian banjir dan/atau pembangkit listrik tenaga air (Kementerian PUPR, 2015).

Waduk Saguling berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik yang dikelola oleh PT. Indonesia Power. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Saguling yang

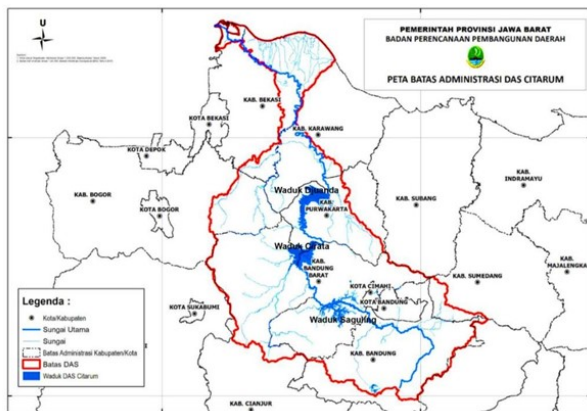
* Penulis Korespondensi: redisuf21man@gmail.com

terletak dikawasan Bandung Barat, Bandung, Jawa Barat merupakan waduk yang mendukung sistim listrik untuk Jawa-Bali. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Saguling memproduksi sebanyak 700 MW dan berkontribusi sebesar 2,5 persen ke sistem Jawa-Bali yang memiliki total kapasitas 27.700 MW (M. Ahsin Sidqi, 2021). Waduk Saguling dengan luas 5.600 ha pada ketinggian 645 m diatas permukaan laut dan mulai beroperasi dalam satu sistem kaskade yang membendung sungai Citarum sejak tahun 1988.

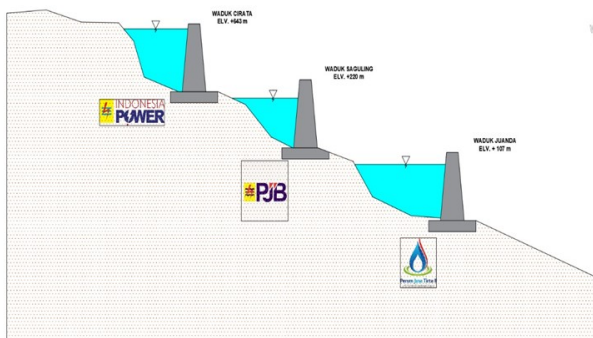
Sesuai dengan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 Tentang Bendungan Pasal 47 disebutkan bahwa setiap bendungan pengelolaan sumber daya air harus memiliki pola operasi waduk (POW). Pola Operasi Waduk (POW) adalah patokan operasional bulanan suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus mengikuti ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai rancangan.

2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan Waduk Kaskade Citarum adalah tiga buah waduk seri yang terletak di S. Citarum, berturut-turut dari hulu ke hilir Waduk Saguling, Waduk Cirata dan Waduk Ir. H. Djuanda. Secara administratif, Waduk Saguling terletak di Kabupaten Bandung dan Kabupaten Cianjur; Waduk Cirata terletak di Kabupaten Bandung Barat, Kabupaten Cianjur dan Kabupaten Purwakarta; dan Waduk Djuanda terletak di Kabupaten Purwakarta.



Gambar 1. Lokasi DAS Citarum berdasarkan wilayah administratif (Sumber: BAPEDA Jabar)



Gambar 2. Lokasi waduk Kaskade Citarum

2.1 Waduk kaskade Citarum

Waduk kaskade terdiri dari beberapa waduk dikarenakan dalam satu badan Sungai ada Waduk Saguling, Waduk Cirata, dan Waduk Juanda. Yang mengelola juga berbeda-beda. Waduk Saguling dan Waduk Cirata yang terletak di hulu berfungsi sebagai pembangkitan tenaga listrik sedangkan Waduk Juanda sebagai waduk serba guna.

3. Materi dan Metode

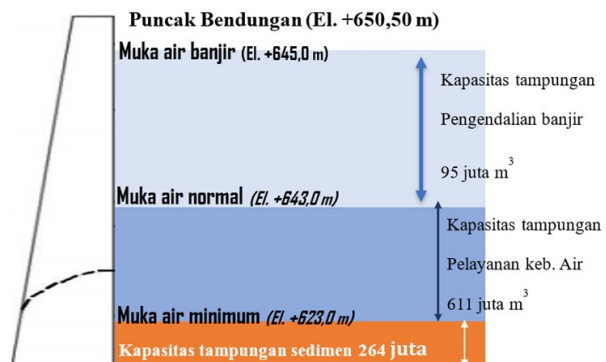
Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif untuk mengetahui pola operasi Waduk Saguling yang optimal dengan menggunakan Metode Linear programming dan diharapkan hasilnya dapat digunakan sebagai masukan dalam pola operasi Waduk Saguling.

3.1 Bendungan Saguling

Studi ini hanya meninjau waduk Saguling saja dan menganggap waduk Saguling ini sebagai suatu sistem waduk tunggal/parsial. Bendungan saguling berada di lokasi paling hulu sistem kaskade. Bendungan Saguling merupakan bendungan kedua yang dibangun setelah Bendungan Jatiluhur. Tipe Bendungan adalah Bendungan Urugan Bantu dengan Inti Tanah. Kapasitas tampungan saat ini adalah 525 juta m³ dan luas permukaan 50 Ha. Puncak bendungan berada pada elevasi 650.5 m. Bendungan ini dilengkapi dengan Turbin sebanyak 4 buah dengan kapasitas masing-masing 175 MW. Kapasitas masing-masing turbin adalah 54 m³/s. Bendungan Saguling merupakan bendungan kedua yang dibangun setelah Bendungan Jatiluhur. Pelimpah Bendungan saguling terletak di tepi kiri sungai (**Gambar 2**). Bangunan pelimpah terdiri dari 2 (dua) bagian yaitu pelimpah berpintu (elevasi puncak 634,7 m) dan Pelimpah tidak berpintu (elevasi puncak 643.0 m). Pelimpah berpintu diatur dengan 3 (pintu), masing-masing lebarnya 10.0m dan panjang overflow 63,6m. Pelimpah kedua berbentuk ogee. Kapasitas debit dari seluruh pelimpah adalah 2.400 m³/s pada Muka air maksimum 645 m.

3.2 Data teknis bendungan Saguling

Data Teknis pada Bendungan Saguling yang telah didapatkan oleh pihak pengelola yang terdiri dari sebagai berikut:



Gambar 3. Tampungan waduk kondisi awal (Departemen Pekerjaan Umum, 1995)

Tabel 1. Data teknis

Bendungan	
Tipe Bendungan:	Urugan batu dengan membran beton
Tinggi Bendungan:	125,00 m
Panjang Puncak:	453,00 m
Lebar Puncak:	15,00 m
Elevasi Puncak:	+225,00 m
Volume Tubuh Bendungan:	3,90 juta m ³

Tabel 2. Data teknis pelimpah dan intek

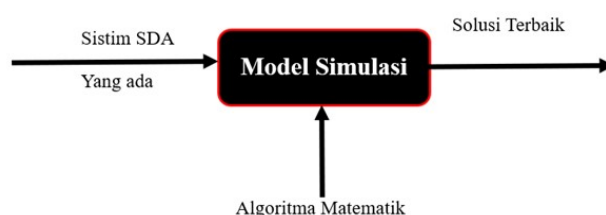
Pelimpah	
Tipe:	Terowong dengan mercu ogee
Banjir desain:	5682 m ³ /dt
Elevasi mercu:	El. +208,50 m
Pengambil (Intek)	
Tipe:	Terowong
Kapasitas:	135 m ³ /dt
Panjang:	639 m

3.3 Program dan model optimasi operasi waduk

Menurut Anggraheni, D & Jayadi, Rachmad, dan I. (2017), ada tiga tahapan dalam mempersiapkan model optimasi, yaitu:

1. Mengidentifikasi fungsi objektif untuk mengukur efektivitas atau kegunaan yang menghubungkan beberap kombinasi dari variabel. Fungsi objektif merupakan fungsi yang dioptimasi baik maksimum atau minimum. Contoh fungsi objektif adalah minimum kekurangan (minimum shortage), atau maksimum keuntungan.
2. Mengidentifikasi decision variable secara kuantitatif dan menentukan ketelitiannya.
3. Mengidentifikasi faktor-faktor tertentu yang membatasi (decision variable), tahapan ini akan menghasilkan persamaan kendala (constraints) yaitu persamaan aljabar atau ketidaksamaan atau dalam beberapa kasus sama dengan persamaan differensial dimana persamaan tersebut harus dipenuhi dalam menentukan nilai maksimum atau minimum dari fungsi objektif.

Model optimasi adalah penyusunan suatu model system yang sesuai dengan keadaan nyata yang nantinya dapat dirubah ke dalam model matematis dengan pemisahan elemen-elemen pokok, agar suatu penyelesaian yang sesuai dengan sasaran atau tujuan pengambilan keputusan dapat tercapai (Subagyo, 1984) disajikan dalam skema pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Skema model optimasi

Model optimasi disebut juga sebagai model pengambilan dan penentuan keputusan dimana pada dasarnya mempunyai sistematika kerja yang membandingkan semua keputusan-keputusan yang dapat dilaksanakan dan pada akhirnya memilih satu alternatif yang baik. Model optimasi biasanya dibentuk dengan cara mengkombinasikan kelakuan system disebut kendala (*constraint*) dan *system objektif* dibentuk menjadi fungsi tujuan (*objective function*). Kemudian algoritme matematika yang cocok akan terpilih untuk diterapkan ke dalam model optimasi tersebut, kadangkala untuk memenuhi persyaratan salah satu algoritme optimasi, model optimasi suatu system perlu disederhanakan dalam bentuk algoritme optimasi yang dipakai. Kelebihan dari Teknik optimasi adalah dapat memberikan solusi yang baik dan semua alternatif dapat dievaluasi secara bersama. Kelebihan dari metode simulasi adalah dapat mensimulasi masukan data dalam jumlah yang cukup banyak dan dapat membandingkan beberapa manajemen kebijaksanaan.

Program Teknik optimasi antara lain program linier, program non linier, program dinamik, program genetik, jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*), dan logika kabur (*fuzzy logic*). Pemilihan Teknik optimasi sangat bergantung pada karakteristik waduk yang ditinjau, ketersediaan data, tujuan, dan kendala yang dipakai. Dalam penelitian ini program Teknik optimasi yang akan dibahas selanjutnya adalah *Linear programming*.

3.4 Metode pengambilan data

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mendapatkan hasil yang baik dan mengurangi kesalahan dalam penelitian. Tahapan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 4**. Berikut ini merupakan garis besar tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini:

- a. Tahapan Persiapan
Pada tahap persiapan dilakukan studi literatur yang terkait dengan penelitian. Sumber literature dari buku, jurnal penelitian dan informasi lainnya yang bisa diakses melalui website.
- b. Mengumpulkan data pendukung berupa data sekunder
Pengumpulan data sekunder yang akan dibutuhkan untuk penelitian.
- c. Melakukan pemodelan
Pemodelan Optimasi lempasan dilakukan menggunakan metode Linear Programming dengan alat bantu software Solver LINDO untuk mendapatkan pelepasan optimal pada Waduk Saguling.
- d. Melakukan pembahasan
Melakukan pembahasan berdasarkan hasil simulasi pemodelan pengoperasian produksi listrik dan harga.

3.5 Data inflow waduk Saguling

Data Inflow Waduk Saguling terdokumentasikan dengan baik oleh pengelola bendungan. Data yang tersedia untuk penelitian ini adalah Inflow Waduk hasil pencatatan dari AWLR yang tersedia. Data pencatatan inflow waduk saguling, dalam penelitian ini data inflow dari tahun 2010 sampai 2017, yang diinformasikan dalam **Table 3**.

Tabel 3. Data debit inflow

TAHUN	Jan	Peb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nop	Des
2010	152	297	306	145	168	91,2	66,9	68,3	164	121	175	203
2011	58,7	55,7	67,3	121	125	43,3	33,9	12,0	12,4	17,8	119	124
2012	95,2	124	112	154	102	57,7	15,2	11,4	16,4	30,4	93,2	197
2013	146	205	145	275	201	119	93,0	34,5	29,2	40,7	57,2	165
2014	127	92,8	218	185	133	97,1	69,1	40,9	22,8	19,2	80,6	201
2015	106	156	151	173	77,6	28,4	17,0	16,4	16,2	25,3	90,9	120
2016	117	135	211	219	167	110	101	47,1	126	165	215	117
2017	62,5	122	192	164	87,0	69,3	37,4	16,1	25,1	77,8	196	112

3.6 Data elevasi, storage dan area

Data diperoleh berdasarkan laporan Pola Operasi Waduk Saguling, sebagai berikut:

3.8 Data PLTA

Waduk Saguling memiliki fungsi pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Total kapasitas daya turbin yang

dimiliki waduk Saguling hanya 700,8 MW karena volume efektifnya kecil tetapi tinggi jatuh (head) yang dimiliki sangat tinggi sehingga produksi listrik yang akan dihasilkan lebih kurang sebesar 1 KWh untuk 1 m³ /s air yang dikeluarkan. Berikut data PLTA Waduk Saguling yg disajikan dalam Tabel 5.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis data inflow

Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan pada tahun 2010 - 2021 data di dapatkan dari data sekunder (Tabel 6). Lalu di bagi menjadi 3 kondisi yang dimana tahun basah, normal dan kering (Tabel 7).

Data pada Tabel 7 dilakukan perhitungan simulasi untuk dibagi menjadi tiga periode yaitu Tahun Basah, Tahun Normal dan Tahun Kering. Untuk simulasi menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

4.2 Analisis data teknis waduk

Data teknis waduk diperlukan untuk memmodelkan batasa-batasan yang akan ditetapkan dalam optimasi. Volume tampungan waduk dihilir mempengaruhi batasan pelepasan maksimal waduk. Batasan kapasitas tampungan waduk dapat di lihat pada Gambar 5 sebagai berikut:

Selanjutnya data yang teknis yang diperlukan adalah kurva kapasitas tampungan waduk saguling. Dari

Tabel 4. Data E-S-A waduk Saguling

Elevasi [m+MSL]	Kapasitas [Jt m ³]	Luas [km ²]
620	90,44	8,52
621	99,32	9,24
622	108,91	9,94
623	119,19	10,63
624	130,19	11,38
625	142,07	12,39
626	154,88	13,23
627	168,9	14,82
628	184,84	17,1
629	202,79	18,81
630	222,29	20,19
631	243,25	21,75
632	265,79	23,32
633	289,99	25,1
634	316,05	27,04
635	344,18	29,24
636	374,36	31,14
637	406,51	33,16
638	440,68	35,19
639	476,91	37,28
640	515,33	39,57
641	555,93	41,64
642	598,69	43,89
643	644,26	47,28

Diukur Tahun 2016, dipublis 2019

Tabel 5. Data PLTA

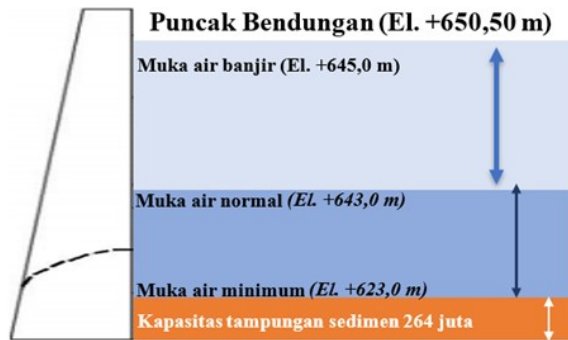
Waduk	Jumlah Turbin (Unit)	Daya Per Unit (MW)	Total Daya (MW)	Debit Per Unit (m ³ /dtk)	Debit Max (m ³ /dtk)	Energi Tahunan (GWh)	Produksi RataRata 2010-2020 (GWh)
Saguling	4	175,2	700,8	56,0	224,0	2156,0	2652,39

Tabel 6. Data inflow 2010-2017

TAHUN	Jan	Peb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nop	Des
2010	152	297	306	145	168	91,2	66,9	68,3	164	121	175	203
2011	58,7	55,7	67,3	121	125	43,3	33,9	12,0	12,4	17,8	119	124
2012	95,2	124	112	154	102	57,7	15,2	11,4	16,4	30,4	93,2	197
2013	146	205	145	275	201	119	93,0	34,5	29,2	40,7	57,2	165
2014	127	92,8	218	185	133	97,1	69,1	40,9	22,8	19,2	80,6	201
2015	106	156	151	173	77,6	28,4	17,0	16,4	16,2	25,3	90,9	120
2016	117	135	211	219	167	110	101	47,1	126	165	215	117
2017	62,5	122	192	164	87,0	69,3	37,4	16,1	25,1	77,8	196	112

Tabel 7. Kondisi tahun basah, tahun normal, dan tahun kering

Bulan	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Basah	136	183	220	206	167	104	82	48	86	86	132	171
Normal	101	139	163	182	107	71	32	21	20	50	124	117
Kering	84	116	129	142	89	39	20	13	16	24	102	136



Gambar 5. Volume tampungan awal waduk Saguling

lengkung kapasitas waduk ini akan diketahui berapa besarnya tampungan pada elevasi tertentu, sehingga dapat ditentukan ketinggian muka air yang diperlukan untuk mendapatkan besarnya volume tampungan pada suatu elevasi. Kurva ini juga dipergunakan untuk menentukan besarnya kehilangan air akibat perkolasi yang dipengaruhi oleh luas muka air pada elevasi tertentu.

4.3 Data evaporasi

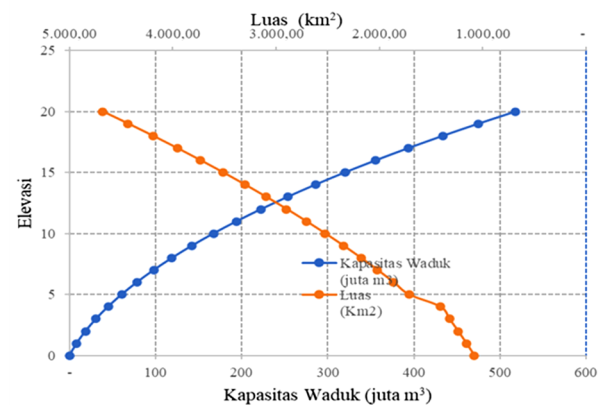
Data Evaporasi diperoleh dalam satuan dalam satuan milimeter (mm) dalam waktu bulanan dan harian. Data evaporasi digunakan untuk mengetahui kehilangan air waduk. Sebagai berikut pada Tabel 8.

4.4 Target optimum

Suatu model dapat dikatakan optimum jika mampu mencapai batas tertentu yang ditetapkan. Penetapan batas tersebut dapat berupa kapasitas maksimum atau berdasarkan kebutuhan tertentu. Optimasi dalam penelitian ini ditujukan untuk memaksimalkan fungsi

Tabel 8. Evaporasi

Bulan	Evaporasi Harian	(mm) Bulanan
Jan	2,9	87,81
Feb	2,9	88,08
Mar	3,0	90,70
Apr	2,9	88,33
May	3,0	91,49
Jun	3,1	92,68
Jul	3,1	92,86
Aug	3,1	92,48
Sep	3,1	92,50
Oct	3,1	91,96
Nov	3,0	91,20
Dec	3,0	90,01



Gambar 6. Kurva elevasi-volume-area waduk Saguling

dari masing-masing waduk dalam setiap periode operasi. Waduk Saguling mempunyai target operasi menghasilkan listrik.

Optimasi pada penelitian ini menggunakan Metode *Linear Programming* dengan bantuan *Software Solver Linear Interaktif Discrete Optimizer* (LINDO). Tujuan dari optimasi ini adalah untuk optimasi pola operasi produksi listrik. Hasil yang dikeluarkan dari model optimasi ini berupa debit optimum.

4.6 Input data optimasi

Optimasi yang akan dilakukan pada penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan pola operasi waduk yang optimum pada pengoperasian tahun basah, normal dan kering. Proses optimasi dilakukan sebanyak 3 (tiga) kali dengan input data yang berbeda. Langkah pertama Optimasi menggunakan debit inflow setiap tahun basah, tahun normal dan tahun kering. Data Inflow Waduk Saguling 2010-2021 pada Tabel 6.

Dalam *Software Linear Interaktif Discrete Optimizer* (LINDO), kita bisa langsung memasukkan nilai fungsi Tujuan dan fungsi Kendala dan jendela *Linear Interaktif Discrete Optimizer* (LINDO). Kemudian dapat langsung dijalankan simulasinya dengan menekan "Solve". Dalam *Software Linear Interaktif Discrete Optimizer* (LINDO) dalam mengoperasikan maka ada persyaratan yaitu:

- Fungsi Tujuan

Dalam optimasi penelitian ini fungsi tujuan yaitu total daya listrik yang optimal. Karena penelitian ini mau mencari produksi listrik pertahunnya pada setiap kondisi Tahun Basah, Tahun Normal, dan Tahun Kering.

$$\text{MAX } P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6+P_7+P_8+P_9+P_{10}+P_{11}+P_{12} \quad (1)$$

Keterangan:

MAX = Maksimum tujuan optimasi.
P = Daya listrik yang dihasilkan oleh waduk.
1,2,3, ..., 12 = Bulan

• Fungsi Kendala (*SUBJECT TO*)

Dalam software LINDO ini fungsi kendala adalah *SUBJECT TO*. Ada beberapa variabel yang di masukan ke LINDO tersebut yang terdiri dari:

1. Initial Tampung dan Kapasitas Tampung Waduk (m³/bulan) (Storage MAX)

```
SUBJECT TO
S1 <=518
S2 <=518
S3 <=518
S4 <=518
S5 <=518
S6 <=518
S7 <=518
S8 <=518
S9 <=518
S10 <=518
S11 <=518
S12 <=518
```

2. Tampung Minimum Waduk (m³/bulan) (Storage MIN)

```
S1 >=119.2
S2 >=119.2
S3 >=119.2
S4 >=119.2
S5 >=119.2
S6 >=119.2
S7 >=119.2
S8 >=119.2
S9 >=119.2
S10 >=119.2
S11 >=119.2
S12 >=119.2
```

Keterangan:

S = Volume Tampung Waduk
1,2, ..., 12 = Bulan

Pada optimasi diawali S1 <=518 m³/bulan adalah tinggi maksimum, untuk awal optimasi menggunakan tinggi muka air waduk dan <=518 m³/bulan adalah max storage pada waduk. Dan untuk min storage pada waduk yaitu >=119.2 ini posisi di intake.

3. Kapasitas Turbin (jt/m³)

Keterangan:

P = Daya Listrik pada turbin.
1,2, ..., 12 = Bulan

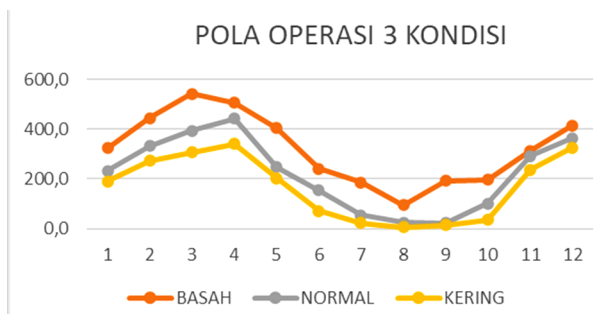
Untuk mencari optimasi produksi listrik butuh daya listrik dan batas maksimum daya. Kapasitas debit 54,80 m³/s maka kalau di jadikan perbulan 568,17 juta m³/bulan.

```
P1 <=568.1
P2 <=568.1
P3 <=568.1
P4 <=568.1
P5 <=568.1
P6 <=568.1
P7 <=568.1
P8 <=568.1
P9 <=568.1
P10 <=568.1
P11 <=568.1
P12 <=568.1
```

4. Pola operasi yang terdiri dari Inflow, Evaporasi, dan Debit Pemeliharaan ini kondisi Basah:

S1	-	S12	+	P1	=	405.8
S2	-	S1	+	P2	=	242.4
S3	-	S2	+	P3	=	185.5
S4	-	S3	+	P4	=	95.4
S5	-	S4	+	P5	=	193.5
S6	-	S5	+	P6	=	195.9
S7	-	S6	+	P7	=	313.8
S8	-	S7	+	P8	=	416.3
S9	-	S8	+	P9	=	323.5
S10	-	S9	+	P10	=	444.9
S11	-	S10	+	P11	=	541.8
S12	-	S11	+	P12	=	506.3

Perhitungan untuk pola operasi yang terdiri dari Inflow, Evaporasi, dan Debit pemeliharaan. Inflow yang di maksud adalah setiap masing-masing kondisi. Dalam penelitian ini debit pemeliharaan diasumsikan dengan probabilitas 95% dari data debit inflow selama 10 tahun. Sesudah itu lalu dioptimalkan dengan menekan (*SOLVE*). Hasil pola operasi dari persamaan pada tiga kondisi terdapat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Pola operasi 3 kondisi

4.7 Hasil optimasi software LINDO

Dalam penelitian ini menghitung setiap kondisi Tahun Basah, Tahun Normal dan Tahun Kering. Software LINDO tersebut output nya adalah daya yang optimal (jt m³) per tahun.

• Hasil optimasi pada kondisi Tahun Basah

Pada hasil optimasi kondisi tahun basah yang dikeluarkan oleh *Software LINDO* yaitu *objective function value* sebesar 4152 m³/tahun yang dimana P adalah daya listrik dan S adalah volume tampungan waduk (*storage*). Dimana pada kondisi P6 = 0 yang

OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	4152.000	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
P1	283.899994	0.000000
P2	568.099976	0.000000
P3	499.899994	0.000000
P4	568.099976	0.000000
P5	435.000000	0.000000
P6	0.000000	0.000000
P7	445.000000	0.000000
P8	101.000000	0.000000
P9	248.000000	0.000000
P10	254.000000	0.000000
P11	358.000000	0.000000
P12	391.000000	0.000000
S1	165.300003	0.000000
S2	119.199997	0.000000
S3	163.300003	0.000000
S4	119.199997	0.000000
S5	119.199997	0.000000
S6	367.200012	0.000000
S7	119.199997	0.000000
S8	119.199997	0.000000
S9	119.199997	0.000000
S10	119.199997	0.000000
S11	119.199997	0.000000
S12	119.199997	0.000000

berarti tidak ada daya listrik tetapi pada S6 adanya nilai yang besar dibulan yang lain, dibulan itu ada pengisian waduk.

- Hasil optimasi kondisi Tahun Normal

OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	2576.800	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
P1	0.000000	0.000000
P2	175.500000	0.000000
P3	568.099976	0.000000
P4	568.099976	0.000000
P5	250.000000	0.000000
P6	165.300003	0.000000
P7	0.000000	0.000000
P8	0.000000	0.000000
P9	135.000000	0.000000
P10	0.000000	0.000000
P11	363.700012	0.000000
P12	351.100006	0.000000
S1	337.100006	0.000000
S2	426.100006	0.000000
S3	280.799988	0.000000
S4	119.199997	0.000000
S5	119.199997	0.000000
S6	119.199997	0.000000
S7	196.100006	0.000000
S8	226.899994	0.000000
S9	119.199997	0.000000
S10	201.100006	0.000000
S11	119.199997	0.000000
S12	119.199997	0.000000

Pada hasil optimasi kondisi tahun normal yang dikeluarkan oleh *Software LINDO* yaitu *objective function value* sebesar 2576,8 m³/tahun yang dimana P adalah daya listrik dan S adalah volume tampungan waduk (*storage*). Dimana pada kondisi P1, P7, P8, dan P10 = 0 yang berarti tidak ada daya listrik tetapi pada S1, S7, S8, dan S10 adanya nilai yang besar, dibulan itu berarti ada pengisian waduk.

- Hasil optimasi kondisi Tahun Kering

Keterangan :

P = Daya Listrik yang dihasilkan oleh waduk
S = Volume tampungan waduk

OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	1957.600	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
P1	568.169983	0.000000
P2	246.199997	0.000000
P3	39.430000	0.000000
P4	568.169983	0.000000
P5	234.399994	0.000000
P6	0.000000	0.000000
P7	0.000000	0.000000
P8	0.000000	0.000000
P9	124.500000	0.000000
P10	0.000000	0.000000
P11	176.729996	0.000000
P12	0.000000	0.000000
S1	119.199997	0.000000
S2	119.199997	0.000000
S3	334.470001	0.000000
S4	119.199997	0.000000
S5	119.199997	0.000000
S6	183.800003	0.000000
S7	221.500000	0.000000
S8	230.000000	0.000000
S9	119.199997	0.000000
S10	146.800003	0.000000
S11	213.970001	0.000000
S12	502.070007	0.000000

1,2, ..., 12 = Bulan

Pada hasil optimasi kondisi tahun kering yang dikeluarkan oleh *Software LINDO* yaitu *objective function value* sebesar 1957,6 m³/tahun yang dimana P adalah daya listrik dan S adalah volume tampungan waduk (*storage*). Dimana pada kondisi P6, P7, P8, P10, dan P12 = 0 yang berarti tidak ada daya listrik tetapi pada S6, S7, S8, S10 dan P12 adanya nilai, dibulan itu berarti ada pengisian waduk.

4.8 Analisis biaya

Dari hasil optimasi menggunakan *Software Solver LINDO* maka dapat daya optimum yang di dapatkan untuk masing-masing kondisi Tahun Basah, Tahun Normal dan Tahun Kering. Dasar dari perhitungan analisis biasa dari harga yang ditetapkan oleh pihak PLN pada tahun 2022 dengan harga 1.444,7/kWh.

Dari hasil Analisa, total daya optimum yang didapat untuk masing masing kondisi adalah sebagai berikut

Tahun Basah = 3.877 GWh
Tahun Normal = 2.383 GWh
Tahun Kering = 1.830 GWh

Tabel 9. Biaya semua kondisi

Kondisi	Total Daya (GWh)/tahun	Total Daya (kwh)	Biaya (Rp)/kwh/tahun
Basah	3.877	3.876.690.603	Rp 5.600.654.913.820,00
Normal	2.383	2.383.352.547	Rp 3.443.229.424.068,00
Kering	1.830	1.829.774.060	Rp 2.643.474.584.653,00

Maka dari hasil optimasi Waduk Saguling dapat memproduksi listrik pada tahun Basah, Tahun Normal, dan Tahun Kering 3.877 GWh, 2.383 GWh, dan 1.830 GWh. Maka biaya yang di dihasilkan untuk 1 tahunnya pada kondisi Tahun Basah Rp 5.600.654.913.820,00, Tahun Normal Rp 3.443.229.424.068,00 dan Tahun Kering Rp 2.643.474.584.653,00.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis penelitian ini hasil pada optimasi menggunakan *software Solver LINDO* dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil optimasi pola operasi produksi listrik menggunakan *software Solver LINDO* Waduk Saguling adalah:
 - a. Hasil optimasi produksi kondisi Tahun Basah, sebesar 3.877 GWh
 - b. Hasil optimasi produksi kondisi Tahun Normal, sebesar 2.383 GWh.
 - c. Hasil optimasi produksi kondisi Tahun Kering, sebesar 1.830 GWh
2. Hasil analisis biaya dari hasil optimasi untuk produksi listrik yang ditetapkan oleh PLN tahun 2022 adalah:
 - a. Pada Tahun Basah sebesar, Rp 5.600.654.913.820,00.
 - b. Pada Tahun Normal sebesar, Rp 3.443.229.424.068,00.
 - c. Pada Tahun Kering sebesar, Rp 2.643.474.584.653,00.

5.2 Saran

Saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pola optimasi Waduk Saguling dapat dikembangkan lebih lanjut dengan metode lainnya.
2. Dapat dikembangkan juga analisis terhadap Waduk Kaskade terdiri dari Waduk Ciratra dan Waduk Jatiluhur dalam penelitian kedepannya.

Daftar Pustaka

- Aprizal, A. and Budiman, B, *Optimasi Metaheuristik dalam Penyusunan Pola Operasi Waduk*, pp. 1–11, (2019).
- BBWS Citarum, *Sertifikasi Desain Bendungan Kaskade*.
- BBWS Citarum, *Pedoman Operasi dan Pemeliharaan Bendungan Kaskade*.
- Chen, L. et al., *A Study of Applying Genetic Algorithm to Predict Reservoir Water Quality*, 7(2). doi: 10.7763/IJMO.2017.V7.566, (2017)
- Grey, D. and Sadoff, C. W., *Sink or Swim? Water security for growth and development*, *Sink or Swim? Water Security for Growth and Development*, 9(6), pp. 545– 571. doi: 10.2166/wp.2007.021., (2007)
- Hermanto Teguh. 2010. *Menyelesaikan Masalah Optimasi dalam Program Linear dengan Lindo*. (online): Tersedia: <http://id.scribd.com/>

doc/34179882/Menyelesaikan masalah optimasi (15 Juli 2018)

- Kementerian PUPR, B. (2017) *Modul Operasi Waduk*. Legowo, S., Hadihardaja, I. K. and Rabuanawati, S. (2006) ‘*Pengoperasian dan Umur Guna Waduk*’, *Teknik Sipil*, 13(4), pp. 183–200.
- Klipsch, J. D., & Evans, T. a. (2010). *Reservoir Operations Modeling With Hec-Ressim* Joan. *Reservoir Operations Modeling with HEC-ResSim*. Retrieved from http://www.gcmrc.gov/library/reports/physical/Fine_Sed/8thFISC2006/3rdFIHMC/7E_Klipsch.pdf
- Rani, D. and Madalena, M. (2010) ‘*Simulation – Optimization Modeling : A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation*’, pp. 1107–1138. doi: 10.1007/s11269-009-9488-0.
- Samosir, C. S., Soetopo, W. and Yuliani, E. (2011) ‘*Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)*’.