

2 LANDASAN TEORI

2.1 Bendungan

Menurut Peraturan Pemerintah No 37 Tahun 2010 tentang bendungan menyebutkan, bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk.

Pembangunan bendungan dan pengelolaan bendungan beserta waduknya bertujuan untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, pengawetan air, pengendalian daya rusak air, dan fungsi pengamanan tampungan limbah tambang (*tailing*) atau tampungan lumpur. Berdasarkan tujuan pembangunannya, bendungan dibagi menjadi dua yaitu:

1. Bendungan dengan tujuan tunggal (*Single Purpose Dam*), merupakan bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk pembangkit listrik saja, untuk irigasi (pengairan), atau untuk pengendalian banjir saja, dll.
2. Bendungan serbaguna (*Multi Purpose Dam*), merupakan bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya untuk pembangkit listrik (PLTA) dan irigasi (pengairan), atau untuk pengendalian banjir dan PLTA, air minum dan air industri, dll.

Dalam (Nuramini, 2017) berdasarkan kegunaannya potensi waduk dalam menampung air (kapasitas waduk atau *storage capacity*) dapat dibedakan menjadi 3 bagian, yaitu :

1. Kapasitas mati (*dead storage zone*), dipergunakan untuk pengumpulan sedimen.
2. Kapasitas efektif (*effective/usefull storage*), merupakan kapasitas yang dipergunakan untuk konservasi sumber air (penyediaan air baku, irigasi, dll), sehingga setiap pemanfaatan waduk dalam konservasi waduk dapat memenuhi kapasitas efektif waduk.

3. Kapasitas penahan banjir (*flood control*), merupakan kapasitas waduk yang bertujuan untuk menahan kelebihan air guna mengurangi potensi kerusakan akibat banjir.

Salah satu metode yang bisa digunakan dalam perhitungan kapasitas waduk yaitu metode *Ripple*. Metode ini pertama kali dikemukakan oleh *Ripple* (1883) untuk menghitung besarnya kapasitas tampungan *reservoir* yang memadai pada saattingkat kebutuhan air tertentu. *Ripple* atau kurva masa merupakan garis yang memperlihatkan debit aliran pada waktu tertentu, dengan asumsi ketika komulatif draft lebih besar dari komulatif *inflow* maka bendungan tidak dapat melayani kebutuhan (Linsley, 1979 dalam (Wijanarka et al., 2011)). Perhitungan kapasitas bendungan digunakan persamaan:

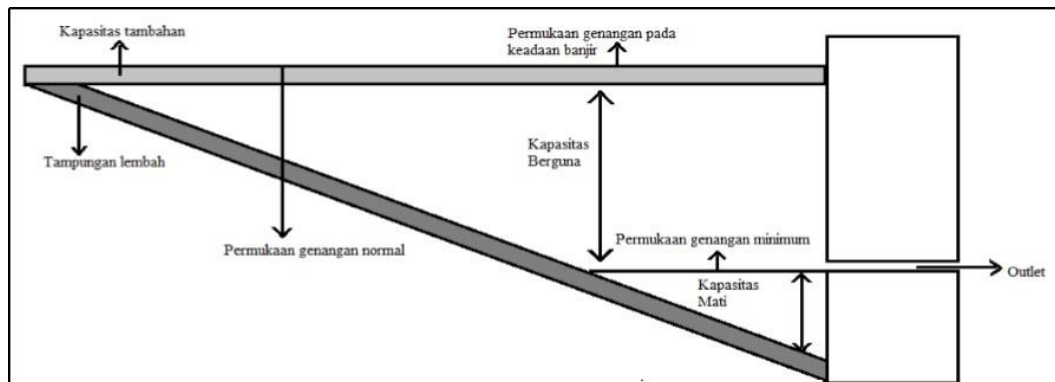
$$Z = (Q_{in} - Q_{out}) + \text{Volume tertampung bulan } 1,2, 3, \dots n \quad 2.1$$

Keterangan:

Z = Kapasitas bendungan

Q_{in} = Hujan rerata + debit *inflow* (m^3)

Q_{out} = Debit *outflow* + evaporasi + draft kebutuhan (m^3)



Gambar 2.1 Bagian-Bagian Tampungan Bendungan

(Sumber : Linsley dan Franzini, 1979)

2.2 Inflow

Menurut BMKG, tahun normal adalah tahun pada saat curah hujan berkisar antara 85% sampai 115 % dari curah hujan rata-rata hasil pengamatan. Berdasarkan pernyataan tersebut maka tahun basah adalah tahun pada saat debit

lebih besar dari 115% dan tahun kering adalah tahun pada saat debit kurang dari 85% dan debit rata-rata tahun normal berkisar pada kisaran 100% (Kementerian PUPR, 2017)

Dalam (Kementerian PUPR, 2017) dijelaskan bahwa besarnya debit air yang masuk (*inflow*) ke waduk dapat diperoleh melalui dua cara yaitu pencatatan debit dan transformasi data curah hujan. Panjang data debit yang digunakan minimal merupakan data sepuluh (10) tahun terakhir.

1. Pencatatan Debit

Metode ini diterapkan pada bendungan atau waduk yang telah beroperasi lama. Debit lokal adalah debit tambahan yang dapat dimanfaatkan atau diperhitungkan untuk memenuhi kebutuhan air yang tidak langsung masuk ke bendungan. Debit lokal ini perlu dipertimbangkan sebagai bagian ketersediaan air selain yang dikeluarkan bendungan.

2. Transformasi dari Data Curah Hujan

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mentransformasi data curah hujan menjadi data aliran. Model hidrologi yang biasa digunakan yaitu Dr. Mock dan NRECA, Model Tank, SSARR, Sacramento, dan Stanford. Pada beberapa metode diperlukan proses kalibrasi untuk mendapatkan hasil keluaran debit. Data yang dibutuhkan untuk kalibrasi yaitu data debit aktual tercatat.

2.2.1 Debit Andalan

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Jika ditetapkan debit andalan sebesar 80 % berarti akan dihadapi resiko adanya debit – debit yang lebih kecil dari debit andalan sebesar 20 % pengamatan. Perhitungan debit andalan disini dimasukan untuk mencari besarnya debit sesuai untuk pemanfaatan air baku dan air irigasi. Langkah awal untuk menentukan debit andalan yaitu dengan mengurutkan debit yang ada dari nilai terbesar hingga terkecil. Perhitungan debit andalan dilakukan dengan metode tahun dasar (*basic year*), yaitu dengan mengambil suatu pola debit dari tahun ke tahun tertentu pada setiap kondisi

keandalan debit. Rumus yang digunakan yaitu rumus Weibull (Sosrodarsono, Suyono : 1985 dalam (Fachrurrozi, 2017)):

$$P = \frac{m}{n + 1} \times 100 \quad 2.2$$

Dimana:

P = Probabilitas (%)

m = Nomor urut data debit

n = Jumlah data pengamatan debit

2.2.2 Penetapan Keandalan Debit

Keandalan debit adalah ketersediaan air di sungai yang melampaui atau sama dengan suatu nilai yang keberadaannya dikaitkan dengan prosentasi waktu atau kemungkinan terjadi. Data yang dibutuhkan dalam perhitungan debit andalan adalah data debit bulanan atau harian yang merupakan hasil rekaman pos duga air dilokasi terdekat. Probabilitas perhitungan debit andalan digunakan dan disesuaikan untuk perencanaan pola operasional bendungan.

Dalam (Elsaputra & Anwar, 2017) debit andalan merupakan debit yang tersedia yang dapat diperhitungkan guna keperluan tertentu sepanjang tahunnya. Semakin besar angka keandalan maka akan semakin kecil debit yang dihasilkan. Perhitungan debit andalan bisa dilakukan dengan menggunakan metode tahun dasar (*basic year*).

Pengelolaan sumber daya air harus memperhatikan potensi sumber daya air yang ada. Ketersediaan air dinyatakan dalam debit andalan (*dependable flow*) atau debit minimum sungai yang kemungkinan terpenuhi 20% (kondisi musim basah Q20%), 50% (kondisi normal, Q50%), dan 80% (kondisi musim kering, Q80%).

2.2.3 Perhitungan Keandalan Debit

Terdapat empat metode untuk analisa debit andalan (Sari et al., 2012) antara lain:

1. Metode debit rata-rata minimum

Karakteristik metode ini, dalam satu tahun hanya diambil satu data (data debit rata-rata harian dalam satu tahun), metode ini sesuai untuk daerah aliran sungai dengan fluktuasi debit maksimum dan debit minimum tidak terlalu besar dari tahun ke tahun serta kebutuhan relatif konstan sepanjang tahun.

2. Metode *flow characteristic*

Debit berbasis tahun normal adalah jika debit rata-rata tahunannya kurang lebih sama dengan debit rata-rata keseluruhan tahun. Untuk debit berbasis tahun kering adalah jika debit rata-rata tahunannya lebih kecil dari debit rata-rata keseluruhan tahun. Sedangkan untuk debit berbasis tahun basah adalah jika debit rata-rata tahunannya lebih kecil dari debit rata-rata keseluruhan tahun. Metode ini cocok untuk DAS dengan fluktuasi debit maksimum dan debit minimum relatif besar dari tahun ke tahun, kebutuhan relatif tidak konstan sepanjang tahun, dan data yang tersedia cukup panjang. Keandalan berdasar kondisi debit dibedakan menjadi 4 antara lain:

- Debit air musim kering, yaitu debit yang dilampaui debit-debit sebanyak 355 hari dalam 1 tahun, keandalan: 97,3%.
- Debit air rendah, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam 1 tahun, keandalan: 75,3%.
- Debit air normal, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam 1 tahun, keandalan: 50,7%.
- Debit air cukup, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam 1 tahun, keandalan: 26,0%.

3. Metode tahun dasar perencanaan

Analisa debit andalan menggunakan metode ini biasanya digunakan dalam perencanaan atau pengelolaan irigasi. Umumnya di bidang irigasi dipakai debit dengan keandalan 80 %, sehingga rumus untuk menentukan tahun dasar perencanaan adalah sebagai berikut:

$$R_{80} = \frac{n}{5} + 1 \quad 2.3$$

Keterangan:

n = kala ulang pengamatan yang diinginkan

R80 = debit yang terjadi < R80 adalah 20%.

4. Metode bulan dasar perencanaan

Analisa debit andalan menggunakan metode ini hampir sama dengan Metode Flow Characteristic yang dianalisa untuk bulan-bulan tertentu. Metode ini paling sering dipakai karena keandalan debit dihitung bulan Januari sampai dengan Bulan Desember, jadi lebih bisa menggambarkan keadaan pada musim kemarau dan penghujan.

2.2.4 Debit *Inflow* Bangkitan Metode Thomas-Fiering

Terdapat tiga model yang digunakan dalam perhitungan-perhitungan hidrologi yaitu model deterministik, model probabilistik, model stokastik. Model stokastik mampu mengisi kekosongan diantara kedua model tersebut, yaitu mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan runtun waktu kejadiannya. Termasuk dalam model stokastik adalah proses perpanjangan runtun data. Pembangkitan data menggunakan metode Thomas Fiering dapat digunakan untuk memecahkan persoalan kurang panjangnya data hidrologi. Rumus yang digunakan dalam metode Thomas Fiering yaitu sebagai berikut (Fachrurrozi, 2017).

$$Q_{i+1j} = Q_j + b_j (Q_{ij-1} - Q_{j-1}) + t_i S_d_j (1 - r_j)^{1/2} \quad 2.4$$

Dimana:

Q_{i+1} = debit hasil pembangkitan untuk bulan j dan tahun ke (i+1).

$Q_{i j-1}$ = debit pada tahun ke i, pada bulan sebelumnya (j-1).

r_j = korelasi antara debit bulan sebelumnya (j-1) dan bulan j.

b_j = koefisien regresi antara debit bulan j dan j-1.

t_i = bilangan random normal.S

d_j = standar deviasi bulan j.

2.3 *Outflow*

Outflow atau perhitungan debit keluar, dihitung berdasarkan kebutuhan air sesuai dengan fungsi bendungan. Bendungan dengan satu fungsi (*single purpose*), *outflow* dihitung hanya untuk pemenuhan suatu kebutuhan saja, namun pada

bendungan *multi purpose outflow* bendungan merupakan total dari seluruh kebutuhan, seperti irigasi, air baku, dan PLTA.

2.3.1 Kebutuhan Air Irigasi

Dalam (Kementerian PUPR, 2017) kebutuhan irigasi merupakan kebutuhan air sesuai dengan Rencana Tata Tanam Global (RTTG) atau Rencana Tata Tanam Deatil (RTTD) yang telah ditetapkan oleh pejabat yang berwenang untuk mendapatkan alikasi air dari waduk.

Kebutuhan air irigasi adalah jumlah volume air yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan evaporasi, kehilangan air, kebutuhan air untuk tanaman dengan memperhatikan jumlah air yang diberikan oleh alam melalui hujan dan kontribusi air tanah. (Langoy, 2016) Kebutuhan air irigasi untuk padi ditentukan beberapa faktor yaitu, penyiapan lahan, penggunaan konsumtif, perkolasi dan rembesan, pergantian lapisan air, serta curah hujan efektif. KAI (Kebutuhan Air Irigasi) dapat dihitung dengan persamaan:

$$KAI = \frac{(Etc + IR + WLR + P - Re)}{IE} \quad 2.5$$

Keterangan:

KAI = Kebutuhan air irigasi di sawah (lt/s)

IR = Kebutuhan air untuk penyiapan lahan (mm/hari)

Etc = Kebutuhan air konsumtif (mm/hari)

WLR = Kebutuhan air untuk mengganti lapisan air (mm/hari)

P = Perkolasi (mm/hari)

Re = Hujan efektif

IE = Efisiensi irigasi (%)

A = Luas areal irigasi (ha)

2.3.1.1 Areal Tanam

Areal tanam adalah lahan yang menjadi daerah aliran jaringan irigasi. Luas areal tanam di suatu daerah pengairan yang memiliki jaringan irigasi yang baik untuk tanaman akan mempengaruhi besarnya kebutuhan air.

2.3.1.2 Pola Tanam

Pola tanam adalah suatu pola penanaman jenis tanaman selama satu tahun yang merupakan kombinasi urutan penanaman. Rencana pola dan tata tanam dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air, serta menambah intensitas luas tanam. Untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman, penentuan pola tanam merupakan hal yang perlu dipertimbangkan. Tabel dibawah ini merupakan contoh pola tanam yang dapat dipakai (Anton, 2014).

Tabel 2.1 Pola Tanam

Ketersediaan Air untuk Jaringan Irigasi	Pola Tanam Dalam Satu Tahun
Tersedia air cukup banyak	Padi - Padi - Palawija
Tersedia air dalam jumlah cukup	Padi - Padi - Padi
	Padi - Padi - Palawija
Daerah yang cenderung kekurangan air	Padi - Palawija - Padi
	Palawija - Padi - Padi

Sumber : Anton, 2014

Penentuan pola tanam merupakan hal yang perlu dipertimbangkan untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman. Tujuan menyusun rencana tata tanam adalah untuk menyusun pola pemanfaatan air irigasi yang tersedia untuk memperoleh hasil produksi tanam yang maksimal bagi usaha pertanian.

2.3.1.3 Sistem Golongan

Debit yang tersedia diolah kembali untuk memperoleh areal tanam yang optimal dari dengan cara golongan, yaitu pembagian luas areal tanam pada suatu daerah irigasi dengan mulai awal tanam yang tidak bersamaan. Cara perencanaan golongan teknis yaitu dengan membagi suatu daerah irigasi dalam beberapa golongan yg mulai pengolahan tanahnya dengan selang waktu 10 atau 15 hari. Dengan pengunduran waktu memulai pengolahan tanah pada setiap golongan maka kebutuhan air dapat terpenuhi sesuai dengan debit yg tersedia.

2.3.1.4 Perkolasi

Perkolasi merupakan gerakan air mengalir ke bagian *moisture content* atas yang lebih dalam sampai air tanah. Laju perkolasi sangat tergantung kepada sifat-sifat tanah. Pada tanah lempung berat dengan karakteristik pengolahan yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1 – 3 mm/hari. Pada tanah yang lebih ringan, laju perkolasi bisa lebih tinggi. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah pertanian dan penyelidikan kelulusan, besarnya laju perkolasi serta tingkat kecocokan tanah untuk pengolahan tanah dapat ditetapkan dan dianjurkan pemakaiannya. Guna menentukan laju perkolasi, tinggi muka air tanah juga harus diperhitungkan. Perembesan terjadi akibat meresapnya air melalui tanggul sawah.

2.3.1.5 Evapotranspirasi

Evaporasi adalah iklim, sedangkan untuk transpirasi adalah iklim varietas, jenis tanaman, dan umur tanaman. Faktor iklim terdiri dari suhu udara, kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara dan sinar matahari. Evapotranspirasi merupakan gabungan dari evaporasi dan transpirasi yang terjadi secara bersamaan. Evaporasi merupakan peristiwa berubahnya air dari bentuk cair menjadi uap dan bergerak dari permukaan tanah atau permukaan air menuju ke udara. Transpirasi merupakan proses penguapan yang terjadi melalui tumbuhan (Elsaputra & Anwar, 2017).

Evapotranspirasi adalah evaporasi dari permukaan lahan yang ditumbuhi tanaman. Berkaitan dengan tanaman, evapotranspirasi sama dengan kebutuhan air konsumtif yang didefinisikan sebagai penguapan total dari lahan dan air yang diperlukan oleh tanaman. Perhitungan evaporasi dan transpirasi dilakukan secara bersama-sama (Triatmodjo, Bambang, 2008 dalam (Nuramini, 2017)).

Nilai evapotranspirasi dapat dihitung dengan menggunakan beberapa metode, diantaranya metode Blaney-Criddle, Persamaan Empiris Thornthwaite dan metode Penman Modifikasi. Penelitian ini, digunakan metode Penman modifikasi agar hasil yang didapat lebih realistis karena menggunakan sebagian besar data klimatologi.

Tabel 2.2 Perbandingan Penggunaan Beberapa Metode untuk Perhitungan Evapotranspirasi

No	Metode	Temp	Humidity	Sun Shine	Kec. Angin	Radiant	Evaporasi
		Temp	RH	N	H	Ra	E
1	Pan Evaporasi	-	-	-	-	-	v
2	Penman	v	v	v	v	v	-
3	Thornth Waite	v	-	-	-	-	-
4	Blaney Criddle	v	-	-	-	-	-

Sumber :

Perhitungan evapotranspirasi dengan menggunakan metode Penman modifikasi menggunakan persamaan sebagai berikut (Nuramini, 2017).

$$ET_0 = C \{W \cdot R_n + (1 \cdot W) \cdot f(u) \cdot (ea \cdot ed)\} \quad 2.6$$

Keterangan:

- ET₀ = Evapotranspirasi tanaman referensi (mm/hari).
- C = Angka koreksi Penman untuk kompensasi efek kondisi Cuaca siang dan malam hari (Tabel Penman).
- W = Faktor pemberat untuk pengaruh penyinaran matahari pada Evapotranspirasi potensial (Tabel Penman)
- (1-W) = Faktor pemberat untuk pengaruh kecepatan angin dan kelembaban (Tabel Penman).
- (ea - ed) = Perbedaan tekanan uap air jenuh pada suhu udara rata-rata dengan tekanan uap air nyata rata-rata di udara.
- $$ed = ea \times RH$$
- RH = Kelembaban udara relatif (%)
- R_n = Radiasi penyinaran matahari bersih (mm/hari) (tabel Penman).
- $$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$
- R_{ns} = R_s (1 - α)
- α = Koefisien pemantulan = 0,75
- R_s = (0,25 + 0,5 (n/N)). Ra
- R_{nl} = 2,01 × 10⁹. T₄ (0,34 • 0,44 ed 0,5). (0,1 + 0,9 n/N)
- f(u) = Fungsi pengaruh angin pada Et₀
- $$0,27 \times (1 + U_2/100), \text{ dimana } U_2 \text{ merupakan kecepatan angin selama 24 jam dalam km/hari pada ketinggian 2m.}$$

Menurut (Triatmodjo, 2008) kebutuhan air konsumtif untuk suatu tanaman, ET_c, dapat dihitung dengan menggunakan metode Blaney-Criddle.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad 2.7$$

Keterangan:

ET₀ = Evapotranspirasi tanaman referensi.

K_c = Koefisien tanaman.

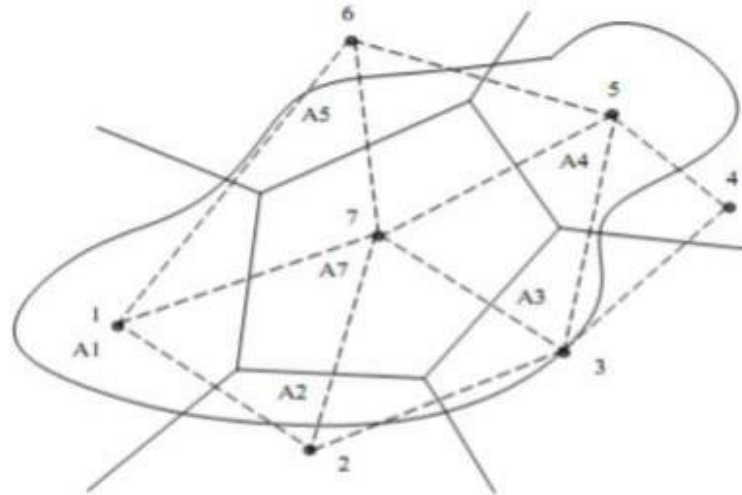
2.3.1.6 Curah Hujan Rata-Rata

Menurut (Suyono; Sosrodarsono & Takeda, 1977) dalam (Wijaya, 1995) menyatakan bahwa curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata diseluruh daerah yang bersangkutan, curah hujan diperkirakan diambil dari beberapa stasiun terdekat. Menurut (Suyono; Sosrodarsono & Takeda, 1977) dalam (Wijaya, 1995) menyatakan bahwa curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata diseluruh daerah yang bersangkutan, curah hujan diperkirakan diambil dari beberapa stasiun terdekat.

Suatu daerah memiliki intensitas curah hujan yang berbeda beda. Jika titik-titik pengamatan pada suatu daerah tidak tersebar merata, maka perhitungan dilakukan dengan cara memperhitungkan daerah daerah pengaruh pada tiap titik pengamatan. Menurut (Hartini, 2017) terdapat tiga metode dalam perhitungan curah hujan rata rata yaitu:

1. Metode *Thiessen Polygon*

Pada metode ini dilakukan dengan membuat *polygon* yang memotong tegak lurus pada tengah tengah garis penghubung dua stasiun hujan. Penerapan metode ini disajikan dalam gambar berikut, (Hartini, 2017).



Gambar 2.2 Penerapan Metode Thiessen Polygon Pada Suatu DAS
(Sumber : Triatmodjo, 2008)

Adapun persamaan untuk perhitungan sebagai berikut:

$$d = \frac{A1. d1 + A2. d2 + A3. d3 + \dots + An. dn}{\Sigma A} = \frac{\Sigma Ai. di}{\Sigma A} \quad 2.8$$

Keterangan:

A = Luas areal (km²)

d = Tinggi curah hujan rata rata areal

d1, d2, d3, ... dn = Tinggi curah hujan di pos 1, 2, 3, ...n

A1, A2, A3, ...An = Luas daerah pengaruh pos 1, 2, 3, ...n

2. Metode Rata-Rata Aljabar

Metode Rata-Rata Aljabar adalah metode yang paling praktis digunakan untuk mencari data curah hujan yang hilang. Stasiun hujan yang digunakan dalam hitungan biasanya adalah yang berada didalam DAS, tetapi stasiun diluar DAS yang masih berdekatan juga bisa diperhitungkan.

$$\bar{R} = \frac{1}{n} (R1 + R2 + \dots + Rn) \quad 2.9$$

3. Metode Isohyet

Metode ini harus terlebih dahulu menggambarkan kontur dengan tinggi curah hujan yang sama (isohyet). Luas bagian diantara isohyet-isohyet yang

berdekatan diukur dan harga rata-ratanya dihitung sebagai harga rata-rata berimbang dari nilai kontur pada persamaan berikut, dengan penerapan metode disajikan dalam gambar berikut, (Hartini, 2017):

$$d = \frac{\frac{d_0 + d_1 \cdot A}{2} A + \frac{d_1 + d_2}{2} A + \dots + \frac{d_{n-1} + d_n}{2} A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad 2.10$$

$$d = \frac{\sum \frac{d_{i-1} + d_i}{2}}{\sum A_i}$$

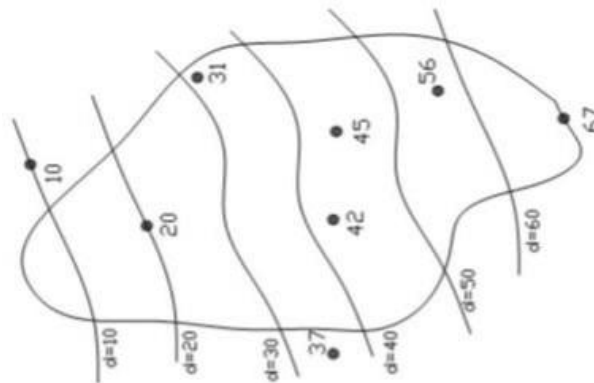
Keterangan:

A = Luas areal (km²)

d = Tinggi curah hujan rata rata areal

d₀, d₁, d₂, ... d_n = Tinggi curah hujan di pos 0, 1, 2, ... n

A₁, A₂, A₃, ... A_n = Luas bagian areal yang dibatasi oleh isohyet



Gambar 2.3 Penerapan Metode Isohyet Pada Suatu DAS

(Sumber : Triatmodjo, 2008)

2.3.1.7 Curah Hujan Efektif

Dijelaskan dalam (Hidayat & Empung, 2016) bahwa curah hujan efektif merupakan besaran curah hujan yang langsung dapat dimanfaatkan tanaman pada masa pertumbuhannya. Besaran curah hujan yang terjadi berpengaruh terhadap areal pertanian, kapasitas drainase, dan bangunan air di kedua daerah tersebut. Besaran curah hujan efektif yang terukur dan terhitung dengan baik akan berdampak pada pengoptimalan hasil panen terutama pada saat pembagian air pada areal irigasi. Pada drainase dan bangunan air, besaran curah hujan akan

sangat membantu dalam menentukan dimensi saluran dan elevasi mercu bangunan air.

Curah hujan efektif merupakan curah hujan yang jatuh pada suatu daerah dan dapat digunakan tanaman untuk pertumbuhannya untuk memenuhi kehilangan air akibat evapotranspirasi tanaman, perkolasi dan lain-lain (Elsaputra & Anwar, 2017). Jumlah hujan yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman tergantung pada jenis tanaman. Curah hujan yang turun tidak semuanya dapat digunakan untuk tanaman dalam pertumbuhannya, maka perlu dicari curah hujan efektif.

Dijelaskan dalam (Elsaputra & Anwar, 2017) curah hujan efektif (R_{eff}) ditentukan berdasarkan besarnya R_{80} yang merupakan curah hujan yang besarnya dapat dilampaui sebanyak 80% atau dengan kata lain dilampauinya delapan kali kejadian dari sepuluh kali kejadian. Maka, jika besar curah hujan yang terjadi lebih kecil dari R_{80} mempunyai kemungkinan hanya 20%. Perhitungan besarnya curah hujan efektif berdasarkan R_{80} , dinyatakan dengan rumus sebagai berikut (Nuramini, 2017):

$$R_{80} = \left(\frac{n}{5}\right) + 1 \quad 2.11$$

Keterangan:

$R_{\text{eff}} = R_{80}$ = Curah hujan efektif 80% (mm/hari)

$\left(\frac{n}{5}\right) + 1$ = Ranking curah hujan efektif dihitung dari curah hujan terkecil.

n = Jumlah data

Berdasarkan Standar Perencanaan Irigasi KP-01 (Direktorat Jendral SDA, 2013) perhitungan curah hujan efektif untuk beberapa jenis tanaman adalah sebagai berikut:

1. Curah Hujan Efektif Padi

Curah hujan efektif untuk padi adalah 70% dari curah hujan tengah bulanan yang terlampaui 80% dari waktu dalam periode tersebut yang dapat dihitung melalui simulasi dengan memanfaatkan data curah hujan harian sekurang-kurangnya 10 tahun.

$$Re_{padi} = \frac{R80 \times 70\%}{\text{Jumlah Pengamatan}} \quad 2.12$$

Keterangan :

Re_{padi} = Curah hujan efektif tanaman padi (mm/hari).

R_{80} = Curah hujan efektif (mm/hari)

2. Curah Hujan Efektif Palawija

Curah hujan efektif palawija berbeda dengan padi. Dalam perhitungan curah hujan efektif palawija dibutuhkan kedalaman muka air tanah, dengan rumusan sebagai berikut:

$$Re_{pal} = f_D \times (1,25 \times R_{50}^{0,824} - 2,93) \times 10^{0,00095 \times Et0} \quad 2.13$$

Keterangan:

Re_{pal} = Curah hujan efektif palawija (mm/hari).

f_D = Faktor kedalaman muka air tanah yang diperlukan.

$$= 0,53 + (0,00016 \times 10^{-5} \times D^2) + (2,32 \times 10^{-7} - D^3)$$

D = Kedalaman muka air tanah yang diperlukan.

Adapun nilai kedalaman muka air tanah yang diperlukan pada beberapa tanaman menurut Standar Perencanaan Irigasi KP.01 disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai D Pada Beberapa Tanaman

Tanaman	Dalam Akarnya (m)	Fraksi air yang tersedia	Air Tanah Tersedia yang Siap Pakani		
			(mm)		
			Halus	Sedang	Kasar
Kedelai	0,6-1,3	0,50	100	75	35
Jagung	1,0-1,7	0,60	120	80	40
Kacang Tanah	0,5-1,0	0,40	80	55	25
Bawang	0,3-0,5	0,25	50	35	15
Buncis	0,5-0,7	0,45	90	65	30
Kapas	1,0-1,7	0,65	130	90	40
Tebu	1,2-2,0	0,65	130	90	40

Sumber : Direktorat Jendral SDA, 2013

2.3.1.8 Kebutuhan Air Lapisan (WLR)

Penggantian lapisan air diperlukan untuk mengurangi efek reduksi pada tanah dan pertumbuhan tanaman. Penggantian lapisan air diberikan menurut kebutuhan dan dilakukan setelah pemupukan atau sesuai jadwal. Jika tidak ada penjadwalan, maka dilakukan penggantian sebanyak dua kali, (masing masing sebesar 50 mm dan 3,3 mm/hari selama setengah bulan) selama sebulan dan dua bulan setelah penanaman (Fachrurrozi, 2017).

2.3.1.9 Koefisien Tanaman

Umur dan jenis tanaman yang ada mempengaruhi besar nilai koefisien tanaman. Faktor koefisien tanaman digunakan untuk mencari besarnya air yang habis terpakai untuk tanaman pada masa pertumbuhannya. Koefisien tanaman (Kc) untuk tanaman padi dan palawija dapat diperoleh dari tabel Kriteria Perencanaan Irigasi KP - 01 (Direktorat Jendral SDA, 2013).

Tabel 2.4 Koefisien Tanaman (Kc) Padi

KOEFSISIEN PADI				
Bulan	<i>Nedeco/ Prosida</i>		FAO	
	Varietas Biasa	Varietas Unggul	Varietas Biasa	Varietas Unggul
0,5	1,20	1,20	1,10	1,10
1,0	1,20	1,27	1,10	1,10
1,5	1,32	1,33	1,10	1,05
2,0	1,40	1,30	1,10	1,05
2,5	1,35	1,30	1,10	0,95
3,0	1,24	0,00	1,05	0,00
3,5	1,12	-	0,95	-
4,0	0,00	-	0,00	-

Sumber : Direktorat Jendral SDA, 2013

Tabel 2.5 Koefisien Tanaman (Kc) Palawija

KOEFSISIEN PALAWIJA

Setengah bulan ke-	Koefisien Tanaman					
	Kedelai	Jagung	Kacang Tanah	Bawang	Buncis	Kapas
1	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
2	0,75	0,59	0,51	0,51	0,64	0,50
3	1,00	0,96	0,66	0,69	0,89	0,58
4	1,00	1,05	0,85	0,90	0,95	0,75
5	0,82	1,02	0,95	0,95	0,88	0,91
6	0,45	0,95	0,95	-	-	1,04
7	-	-	0,55	-	-	1,05
8	-	-	0,55	-	-	1,05
9	-	-	-	-	-	1,05
10	-	-	-	-	-	0,78
11	-	-	-	-	-	0,65
12	-	-	-	-	-	0,65
13	-	-	-	-	-	0,65

Sumber : Direktorat Jendral SDA, 2013

2.3.1.10 Efisiensi Irigasi

Efisiensi irigasi adalah persentase perbandingan antara jumlah air yang dapat digunakan untuk pertumbuhan tanaman dengan jumlah air yang dikeluarkan dari pintu pengambilan. Besarnya efisiensi irigasi tergantung dari besarnya kehilangan air yang terjadi pada saluran pembawa, mulai dari embung sampai ke lahan. Kehilangan air tersebut disebabkan karena penguapan, perkolasi, dan lainnya.

1. Kehilangan air di saluran primer, Faktor koefisien 1,10.
2. Kehilangan air di saluran sekunder, Faktor Koefisien 1,15.
3. Kehilangan air di saluran tersier, Faktor koefisien 1,25.

2.3.1.11 Kebutuhan Air dan Persiapan Lahan

Perhitungan kebutuhan irigasi selama persiapan lahan, digunakan metode yang dikembangkan oleh Van de Goor & Zjilstra (1968). Metode tersebut didasarkan pada laju air konstan dalam lt/dt/ha selama periode persiapan lahan dan menghasilkan rumus sebagai berikut:

$$IR = \frac{(M \times e^{\kappa})}{(e^{\kappa} - 1)} \quad 2.14$$

$$K = \frac{M \times T}{S} \quad 2.15$$

Dimana:

IR = Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan (mm/hari)

M = Kebutuhan evaporasi dan perkolasi = $E_0 + P$

E_0 = Evaporasi potensial (mm/hari) = $E_{t0} \times 1,10$

P = Perkolasi (mm/hari)

T = Waktu penyinaran tanah (hari)

S = Kebutuhan air untuk penjemuran ditambah dengan 50 mm

Analisis untuk petak tersier, jangka waktu yang dianjurkan untuk penyiapan lahan adalah 1,5 bulan. Bila penyiapan lahan terutama dilakukan dengan peralatan mesin, jangka waktu satu bulan dapat dipertimbangkan. Kebutuhan air untuk pengolahan 10 lahan sawah (*pudding*) bisa diambil 200 mm meliputi penjemuran (*presaturation*) dan penggenangan sawah. Pada awal transplantasi akan ditambahkan lapisan air 50 mm kembali. Angka 200 mm mengandaikan bahwa tanah tersebut bertekstur berat, cocok digenangi dan lahan belum berair (tidak ditanami) selama lebih dari 2,5 bulan. Jika tanah tersebut dibiarkan berair lebih lama lagi, ambilah 250 mm sebagai air untuk penyiapan lahan. Kebutuhan air untuk penyiapan lahan termasuk kebutuhan air untuk persemaian (Direktorat Jendral SDA, 2013).

2.3.1.12 Penggunaan Konsumtif (Etc)

Penggunaan konsumtif adalah jumlah air yang dipakai oleh tanaman untuk proses fotosintesis dari tanaman tersebut. Penggunaan konsumtif dihitung dengan rumus berikut:

$$Etc = Kc \times E_{t0} \quad 2.16$$

Dimana:

Kc = koefisien tanaman

E_{t0} = Evapotranspirasi potensial (mm/hari)

Koefisien tanaman diberikan untuk menghubungkan E_{t0} dengan E_{tc} dan dipakai dalam rumus Penman. Koefisien yang dipakai harus didasarkan pada pengalaman yang terus menerus, besarnya nilai suatu koefisien tanaman merupakan faktor yang digunakan untuk mencari besarnya air yang habis terpakai untuk tanaman periode 15 harian.

2.3.1.13 Kebutuhan Air Irigasi untuk Palawija

Tanaman palawija memiliki perhitungan yang cukup berbeda dengan tanaman padi mengingat kebutuhan air untuk tanaman palawija tidak sebanyak padi. Persamaan untuk kebutuhan air palawija adalah sebagai berikut:

$$NFR = Etc + P - Re \quad 2.17$$

Dimana:

Etc = *consumptive use* (mm)

P = kehilangan air akibat perkolasi (mm/hari)

Re = curah hujan efektif (mm/hari)

2.3.1.14 Kebutuhan Air Irigasi untuk Padi

Nilai kebutuhan air untuk padi berbeda dengan palawija. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$NFR = Etc + P - Re + WLR \quad 2.18$$

Dimana:

Etc = *consumptive use* (mm)

P = kehilangan air akibat perkolasi (mm/hari)

Re = curah hujan efektif (mm/hari)

WLR = penggantian lapisan air (mm/hari)

2.3.1.15 Kebutuhan Air di Pintu Pengambilan

Kebutuhan air di pintu pengambilan dapat diketahui dengan rumus:

$$DR = NFR/EI \quad 2.19$$

Dimana:

- DR = kebutuhan air di pintu pengambilan (lt/detik/ha)
- NFR = kebutuhan air di sawah (mm/hari)
- EI = efisiensi irigasi (%)

2.3.2 Kebutuhan Air Baku

Perkiraan kebutuhan air baku tergantung dari banyaknya jumlah penduduk (Elsaputra & Anwar, 2017). Banyaknya kebutuhan air baku dapat dikelompokkan menjadi:

1. Kebutuhan rumah tangga (*domestic use*).
2. Kebutuhan industri dan perdagangan (*industrial and commercial use*).
3. Pemakaian fasilitas umum (*public use*).
4. Kehilangan pada sistem, kesalahan meter, pencurian air, dll.

Perhitungan proyeksi jumlah penduduk dapat dilakukan dengan metode geometri:

$$P_n = P_0 + (1 + r)^n \quad 2.20$$

Keterangan:

P_n = Jumlah penduduk n tahun yang akan datang. (jiwa)

P_0 = Jumlah penduduk pada akhir tahun data. (jiwa)

r = Angka pertumbuhan penduduk (%).

n = Interval waktu (tahun).

Persamaan yang digunakan dalam menghitung jumlah kebutuhan air baku yaitu (Elsaputra & Anwar, 2017):

$$Q = P_n \times q \quad 2.21$$

Keterangan:

Q = Kebutuhan air baku. (lt/jiwa/hari)

P_n = Jumlah penduduk terlayani (jiwa).

q = Debit keluaran individu. (lt/hari)

Air baku adalah air yang berasal dari sumber air permukaan, air tanah, air hujan, dan air laut yang memenuhi baku mutu tertentu sebagai air baku untuk minum. Kebutuhan air baku juga diartikan sebagai jumlah kebutuhan air baku yang telah ditetapkan atau diijinkan mendapatkan *supply* dari waduk (Kementerian PUPR, 2017). Kebutuhan air baku dibagi menjadi:

1. Kebutuhan Air Industri

- Kebutuhan air untuk industri umumnya konstan sepanjang tahun, khususnya untuk keperluan industri gula umumnya hanya pada saat giling (± 5 bulan setiap tahun).
- Data penggunaan air untuk industri dapat menggunakan data pemakaian atau rencana penggunaan air yang sudah ditetapkan.

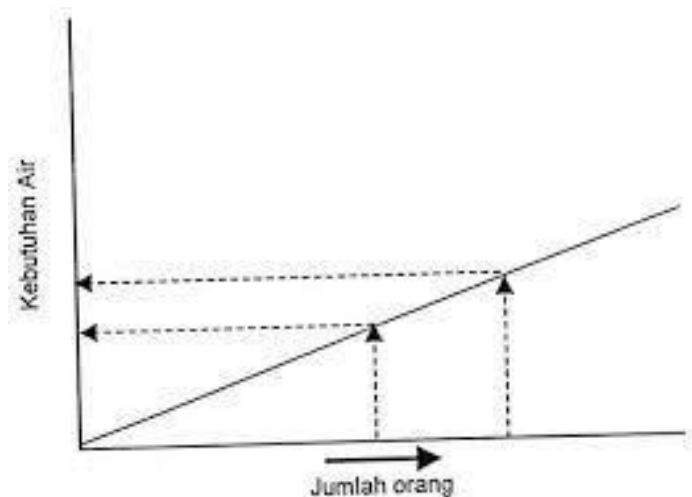
2. Kebutuhan Air Minum

- Kebutuhan air baku umumnya konstan sepanjang tahun.
- Data penggunaan air sesuai dengan data pemakaian atas rencana penggunaan air yang telah ditetapkan.

Besarnya air yang digunakan untuk berbagai jenis penggunaan dikenal dengan sebutan pemakaian air. Standar kebutuhan air baku dibagi menjadi dua yaitu (PUPR, 1996):

2.3.2.1 Standar Penyediaan Air Domestik

Standar penyediaan air domestik ditentukan oleh jumlah konsumen domestik yang dapat diketahui dari data penduduk yang ada. Standar penyediaan kebutuhan domestik ini meliputi minum, mandi, masak, dan lain sebagainya.



Gambar 2.4 Grafik Hubungan Antara Kebutuhan Air dengan Peningkatan
(Sumber: PUPR, 1996)

Kebutuhan air domestik untuk kota dibagi dalam beberapa kategori, yaitu:

- Kota kategori I (Metropolitan)
- Kota kategori II (Kota Besar)
- Kota kategori III (Kota Sedang)
- Kota kategori IV (Kota Kecil)
- Kota Kategori V (Desa)

Tabel 2.6 Kriteria Perencanaan Air Bersih

URAIAN		KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH PENDUDUK (JIWA)				
		>1.000.000	500.000 s/d 1.000.000	100.000 s/d 500.000	20.000 s/d 100.000	< 20.000
		Kota Metropolitan	Kota Besar	Kota Sedang	Kota Kecil	Desa
1		2	3	4	5	6
1.	Konsumsi Unit Sambungan Rumah (SR) (liter/org/hari)	> 150	150 - 120	90 - 120	50 - 120	60 - 80
2.	Konsumsi Unit Hidran(HU) (liter/org/hari)	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20- 4-0	20 - 40
	Konsumsi Unit Non Domestik a. Niaga Kecil (liter/unit/hari)	600 -900	600 -900		600	

URAIAN		KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH PENDUDUK (JIWA)				
		>1.000.000	500.000 s/d 1.000.000	100.000 s/d 500.000	20.000 s/d 100.000	< 20.000
		Kota Metropolitan	Kota Besar	Kota Sedang	Kota Kecil	Desa
1	2	3	4	5	6	
3.	b. Niaga Besar(liter/unit/hari)	1000 - 5000	1000 - 5000		1500	
	c. Industri Besar (liter/detik/ha)	0,2 -0,8	0,2 -0,8		0,2 -0,5	
	d. Pariwisata (liter/detik/ha)	0,1-0,3	0,1 -0,3		0,1-0,3	
4.	Kehilangan Air (%)	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
5.	Faktor Hari Maksimum	1,15 - 1,25 • harian	1,15 - 1,25 • harian	1,15 - 1,25 • harian	1,15 - 1,25 • harian	1,15 - 1,25 • harian
6.	Faktor Jam Puncak	1,75 - 2,0 • hari maks	1,75 - 2,0 • hari maks	1,75 - 2,0 • hari maks	1,75 •hari maks	1,75 •hari maks
7.	Jumlah Jiwa Per SR (Jiwa)	5	5	5	5	5
8.	Jumlah Jiwa Per HU (Jiwa)	100	100	100	100 - 200	200
9.	Sisa Tekan di PenyediaanDistribusi (meter)	10	10	10	10	10
10.	Jam Operasi (Jam)	24	24	24	24	24
11.	Volume Reservoir (%MaxDay Demand)	15 - 25	15 - 25	15 - 25	15 - 25	15 - 25
12.	SR : HU	50 : 50	50 : 50	80 :20	70 :30	70 :30
		s d	s/d			
		80 :20	80 :20			
13.	Cakupan Pelayanan (%)	90	90	90	90	70

Sumber : PUPR, 1996

2.3.2.2 Standar Penyediaan Air Non Domestik

Standar untuk air non domestik ditentukan oleh banyaknya konsumen non domestik yang meliputi fasilitas seperti perkantoran, kesehatan, industri,

komersial, umum, dan lainnya. Konsumsi non domestik terbagi menjadi beberapa kategori yaitu:

- Umum, meliputi: tempat ibadah, rumah sakit, sekolah, terminal, kantor, dan lainnya.
- Komersil, meliputi: hotel, pasar, pertokoan, rumah makan dan sebagainya.
- Industri, meliputi: peternakan, industri, dan sebagainya.

Adapun nilai dari kebutuhan air non domestik untuk kota dengan kategori I, II, III, IV disajikan dalam Tabel 2.7 sedangkan untuk kategori V disajikan dalam tabel 2.8 (PUPR, 1996).

Tabel 2.7 Kebutuhan Air Non Domestik Kota Kategori I, II, III, IV

Sektor	Nilai	Satuan
Sekolah	10	liter/murid/hari
Rumah Sakit	200	liter/bed/hari
Puskesmas	2000	liter/unit/hari
Masjid	3000	liter/unit/hari
Kantor	10	liter/pegawai/hari
Pasar	12000	liter/hektar/hari
Hotel	150	liter/bed/hari
Rumah Makan	100	liter/tempat duduk/hari
Komplek Militer	60	liter/orang/hari
Kawasan Industri	0,2 – 0,8	liter/detik/hektar
Kawasan Pariwisata	0,1 – 0,3	liter/detik/hektar

Sumber : PUPR, 1996

Tabel 2.8 Kebutuhan Air Non Domestik Kategori V (Desa)

Sektor	Nilai	Satuan
Sekolah	5	liter/murid/hari
Rumah Sakit	200	liter/bed/hari
Puskesmas	1200	liter/unit/hari
Masjid	3000	liter/unit/hari
Mushola	2000	liter/unit/hari
Pasar	12000	liter/hektar/hari
Komersial/Industri	10	liter/hari

Sumber : PUPR, 1996

2.3.3 Kebutuhan PLTA

Suatu pembangkit listrik tenaga hidro dapat difungsikan untuk mengubah potensi tenaga air (energi potensial dan energi kinetik) menjadi energi listrik (hidroelektrik). Besarnya energi yang dihasilkan bergantung pada debit yang tersedia dan ketinggian jatuh air (*head*) (Nuramini, 2017).

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu sumber energi listrik yang bekerja dengan cara merubah energi potensial (bisa berasal dari dam atau air terjun) menjadi energi mekanik (dengan bantuan turbin air) dan dari energi mekanik menjadi energi listrik (dengan bantuan generator). Daya listrik bisa didapat dengan menggunakan persamaan:

$$P = \rho \cdot G \cdot H_{eff} \cdot Q \cdot \eta \quad 2.22$$

Keterangan:

P = Daya listrik (KW)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (m/detik²)

H_{eff} = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit (m³/detik)

η = Efisiensi turbin

Energi listrik dapat dirumuskan:

$$E = P \times t \quad 2.23$$

Keterangan:

E = Energi listrik (KWH)

t = waktu (jam)

2.3.4 Evaporasi

Penguapan dapat dibagi menjadi dua macam yaitu evaporasi dan transpirasi. Evaporasi (E₀) adalah penguapan yang terjadi dari permukaan air (laut, danau, sungai), permukaan tanah (genangan di atas dan penguapan dari permukaan air

tanah yang dekat dengan permukaan tanah), dan permukaan tanaman (intersepsi) (Triatmodjo, 2008). Evaporasi dipengaruhi oleh kondisi klimatologi yaitu:

1. Temperatur Udara

Data temperatur udara yang digunakan pada perhitungan pada umumnya adalah temperatur udara rata-rata harian atau bulanan yang didapat dari pencatatan alat ukur (*thermometer*) yang dipasang pada stasiun meteorologi.

2. Kelembaban Udara

Perhitungan kelembaban relatif dapat diukur menggunakan alat *psychrometer*.

3. Penyinaran Matahari

Perhitungan evaporasi jumlah energi radiasi (penyinaran) yang sampai ke permukaan bumi per unit waktu dan luas perlu diketahui. Kualitas energi penyinaran ini disebut *Net Radiasi* (R_n).

4. Kecepatan Angin

Kecepatan angin memiliki pengaruh yang besar dalam dunia pertanian karena jika angin yang berkecepatan tinggi berhembus dapat mengakibatkan kerusakan. Selain itu, berpengaruh pada kecepatan evaporasi.

Evaporasi dinyatakan sebagai laju evaporasi yang diberikan dalam milimeter per hari (mm/hari). Pengukuran evaporasi dari permukaan air dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

1. Evaporasi dengan panci evaporasi

Pada metode ini evaporasi dihitung dari perbedaan elevasi muka air selama interval waktu pengukuran. Hasil pengukuran evaporasi dari panci harus dikalikan dengan suatu koefisien untuk mendapatkan evaporasi dari waduk atau danau.

$$E_L = K \cdot E_p \quad 2.24$$

Keterangan:

E_L = Evaporasi dari badan air (waduk atau danau).

E_p = Evaporasi dari panci.

K = Koefisien panci

Koefisien panci bervariasi menurut musim dan lokasi, yaitu berkisar antara 0,6 dan 0,8. Biasanya digunakan koefisien panci tahunan sebesar 0,7.

2. Evaporasi dengan metode transfer massa

Persamaan yang digunakan dikenal dengan hukum Dalton, dimana evaporasi sebanding dengan perbedaan antara tekanan uap jenuh dan tekanan uap karena kelembaban udara (Triatmodjo, 2008).

$$E = C f(u)(e_s - e_d) \quad 2.25$$

Keterangan:

E = Evaporasi (mm/hari).

C = Koefisien.

f(u) = Fungsi kecepatan angin.

u = kecepatan angin pada jarak 2m di atas permukaan air (m/d).

e_s = Tekanan uap jenuh (mm hg).

e_d = Tekanan uap udara (mm hg).

3. Evaporasi dengan metode Herbeck (1962)

Persamaan yang digunakan dalam metode ini sebagai berikut:

$$E = N x u x (e_a - e_d) \quad 2.26$$

$$N = \frac{0,0291}{A^{0,05}}$$

Dimana,

E = Evaporasi (cm/hari)

U = kecepatan angin pada jarak 2 m di atas permukaan air (m/detik)

e_a = tekanan uap jenuh (mbar)

e_d = tekanan uap udara (mbar)

A = luas permukaan danau (m²)

2.4 Pola Operasional Bendungan

Perhitungan simulasi keseimbangan air untuk menetapkan pola operasi waduk didasarkan pada debit dengan tingkat keandalan tertentu. Menurut Puslitbang dalam (Kementerian PUPR, 2017) tahun kering adalah tahun pada saat curah hujan atau aliran sungainya berkisar antara 0% sampai 33 % dari jumlah curah hujan hasil pengamatan. Tahun normal adalah tahun pada saat jumlah debit aliran atau curah hujan hasil pengamatan lebih besar dari 33,33% dan kurang dari 66,67 %. Dan tahun basah adalah tahun pada saat jumlah debit aliran atau curah hujan pengamatan lebih besar dari 66,67% dan kurang dari 100 % (PUPR, 1996).

2.4.1 Neraca Air

Persamaan dasar simulasi neraca air di bendungan merupakan fungsi dari masukan, keluaran, dan tampungan bendungan (Kementerian PUPR, 2017).

$$I - O = \frac{ds}{dt} \quad 2.27$$

Keterangan:

I = Debit masuk (m^3/detik).

O = Debit keluar (m^3/detik).

$\frac{ds}{dt} = \Delta S$ = adalah perubahan tampungan (m^3/detik).

Adapun persamaan yang lebih rinci yaitu:

$$S_{t+1} = S_t + R_t - E_t - L_t - O_t - O_s \quad 2.28$$

Keterangan:

S_{t+1} = Tampungan bendungan pada periode $t+1$.

S_t = Tampungan bendungan pada periode t .

R_t = Hujan yang jatuh di atas permukaan bendungan, pada periode t .

E_t = Kehilangan air akibat evaporasi pada periode t .

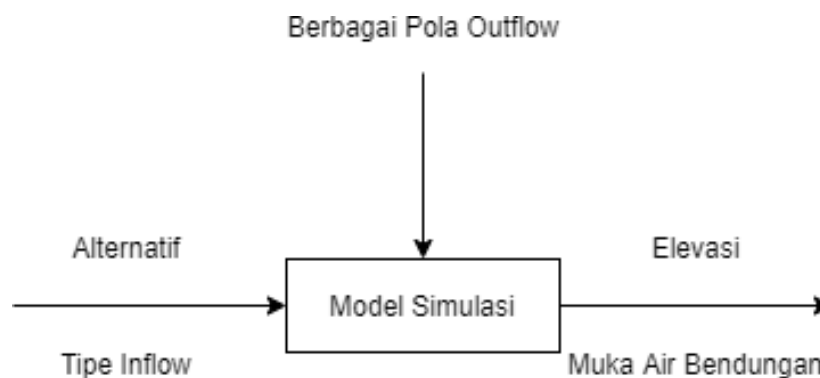
L_t = Kehilangan air akibat rembesan dan bocoran.

O_t = Total kebutuhan air

O_s = Keluaran dari pelimpah

2.4.2 Pola Perhitungan

Pola perhitungan yang akan dipakai yaitu dengan menggunakan metode simulasi. Dalam metode ini muka air bendungan disimulasikan dengan berbagai kondisi tipe masukan (*inflow*) dan karakteristik bendungan, seperti pada kondisi bulan basah, bulan normal dan bulan kering sehingga akan didapatkan kurva atau ambang pola pengoperasian, adapun skema model simulasi disajikan dalam gambar berikut, (Kementerian PUPR, 2017).



Gambar 2.5 Skema Model Simulasi

(Sumber: Kementerian PUPR, 2017)

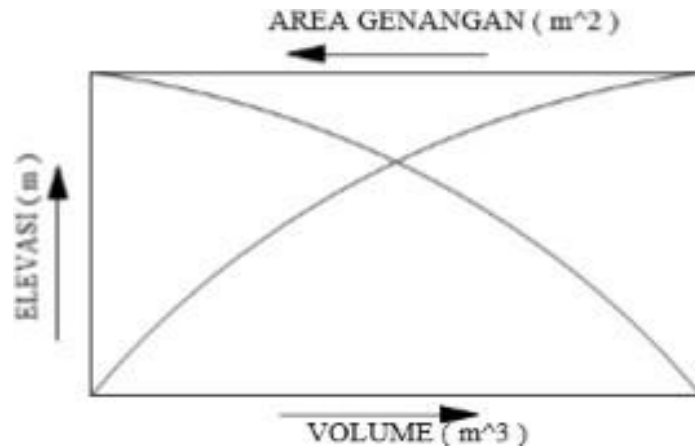
Melihat dari skema model simulasi, maka akan didapatkan tiga ambang batas yaitu, hasil simulasi pada kondisi basah, normal, dan kering. Setelah didapatkan ketiga ambang batas tersebut, maka pengeluaran air dari bendungan dapat dikendalikan agar bendungan tidak dalam kondisi yang sangat kritis pada akhir operasi dan penuh kembali pada saat masuk pada tahun pengoperasian selanjutnya.

2.4.3 Rule Curve

Rule curve adalah ilmu yang menunjukkan keadaan bendungan pada akhir periode pengoperasian yang harus dicapai pada suatu nilai *outflow* tertentu (Mc. Mahon, 1978) dalam (Nuramini, 2017). *Rule curve* pengoperasian bendungan adalah kurva atau grafik yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air bendungan, debit *outflow* dan waktu dalam satu tahun (Indrakanrya, 1993) dalam (Nuramini, 2017). *Rule Curve* digunakan sebagai pedoman pengoperasian bendungan dalam menentukan pelepasan yang diijinkan dan sebagai harapan memenuhi kebutuhan.

2.4.4 Lengkung Kapasitas Bendungan

Lengkung kapasitas bendungan merupakan grafik yang menghubungkan luas daerah genangan dengan volume tampungan terhadap elevasinya. Lengkung kapasitas diperlukan untuk menentukan volume total waduk berdasarkan pada data topografi yang ada.



Gambar 2.6 Grafik Lengkung Kapasitas Bendungan
(Sumber: Kementerian PUPR, 2017)

Evaluasi kapasitas waduk diperlukan untuk mengetahui seberapa besar perubahan volume efektif Waduk dari awal pengukuran hingga tahun pengoperasian. Waduk akan mengalami penurunan fungsi dan kinerjanya yang meliputi penurunan kapasitas serta efektifitas kinerja. Hal tersebut diakibatkan oleh penurunan debit *inflow* dari Sub-DAS dan pendangkalan dasar waduk akibat tingginya sedimentasi yang masuk ke waduk. Sedimentasi yang besar menyebabkan pendangkalan pada waduk sehingga mengurangi kapasitas dan fungsi waduk, hal ini mengakibatkan operasi dan pemeliharaan waduk menjadi lebih sulit dan mahal. Perhitungan lengkung kapasitas waduk dilakukan dengan menggunakan rumus berikut, (Ulfa et al., 2017)

$$V = \sum_{n+1}^n V_n - (n + 1) \quad 2.29$$

$$= \frac{D_x (A_n + A (n + 1) + \sqrt{A_n \times A (n + 1)})}{3}$$

Keterangan:

V = Volume

D = Jarak antara dua potongan melintang (m)

A_n = Luas potongan melintang A_n (m^2)

A_{n+1} = Luas potongan melintang A_{n+1} (m^2)

2.5 Uji Validitas Data

Kalibrasi debit dilakukan guna mengetahui apakah nilai debit pada debit simulasi telah mendekati kondisi sebenarnya. Berdasarkan (Lufi et al., 2020) data debit dianalisis validasinya dengan data debit AWLR menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), Koefisien Korelasi (R), *Root Mean Squared Error* (RMSE), dan Kesalahan Relatif (RE).

2.5.1 *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Metode ini menunjukkan seberapa baik plot nilai observasi dibandingkan dengan nilai prediksi-simulasi, dengan rentang nilai hingga satu. Dengan kata lain, semakin hasil mendekati angka satu, maka semakin baik nilai NSE. Adapun rumus yang digunakan yaitu:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{(X_i - \bar{X}_i)^2} \quad 2.30$$

Dimana:

X_i = data observasi (data aktual).

Y_i = hasil simulasi data.

\bar{X}_i = rata-rata data observasi.

N = jumlah data.

Tabel kriteria nilai dari NSE disajikan dalam Tabel 2.9

Tabel 2.9 Kriteria Nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

NSE Value	Interpretation
NSE > 0,75	<i>Good</i>
0,36 < NSE < 0,75	<i>Qualified</i>
NSE < 0,36	<i>Not Qualified</i>

Sumber: Lufi et al., 2020

2.5.2 *Correlation Coefficient* (R)

Tujuan dari analisis ini adalah untuk mendapatkan pola dan kedekatan hubungan antara dua atau lebih variabel. Adapun rumus yang digunakan dalam perhitungan koefisien korelasi (R) yaitu:

$$R = \frac{N \sum_{t=1}^N X_i Y_i - \sum_{t=1}^N X_i - \sum_{t=1}^N Y_i}{\sqrt{N \sum_{t=1}^N X_i - (\sum_{t=1}^N X_i)^2} \sqrt{N \sum_{t=1}^N Y_i - (\sum_{t=1}^N Y_i)^2}} \quad 2.31$$

Dimana:

X_i = data observasi (data aktual).

Y_i = data simulasi atau data bangkitan.

N = jumlah data.

Tabel kriteria nilai dari koefisien korelasi disajikan dalam Tabel 2.10 (Lufi et al., 2020).

Tabel 2.10 Kriteria Nilai Koefisien Korelasi (R)

R Value	Interpretation
0 - 0,19	<i>Very Low</i>
0,20 - 0,39	<i>Low</i>
0,40 - 0,59	<i>Moderate</i>
0,60 - 0,79	<i>Strong</i>
0,80 - 1,00	<i>Very Strong</i>

Sumber: Lufi et al., 2020

2.5.3 Root Mean Squared Error (RMSE)

Metode ini merupakan sebuah metode pengukuran dengan mengukur perbedaan nilai dari prediksi sebuah model sebagai estimasi atas nilai yang diobservasi. *Root Mean Square Error* adalah hasil dari akar kuadrat *Mean Square Error*. Keakuratan metode estimasi kesalahan pengukuran ditandai dengan adanya nilai RMSE yang kecil. Metode estimasi yang mempunyai RMSE lebih kecil dikatakan lebih akurat dari pada metode estimasi yang mempunyai RMSE lebih besar. Adapun rumus yang digunakan dalam perhitungan nilai RMSE yaitu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad 2.32$$

Dimana:

X_i = data observasi (data aktual).

Y_i = data simulasi atau data bangkitan.

N = jumlah data.

2.5.4 Relative Error (Re)

Metode ini digunakan untuk mengetahui perbandingan antara besaran satu variabel terhadap variabel lainnya yang digunakan sebagai tolak ukur untuk variabel yang sebenarnya. Kesalahan relatif (RE) adalah kesalahan standar yang dinyatakan sebagai pecahan dari perkiraan dan biasanya ditampilkan sebagai persentase. Nilai Re sama dengan kesalahan standar perkiraan survei dibagi dengan perkiraan survei kemudian dikalikan 100. Adapun rumus yang digunakan dalam perhitungan yaitu:

$$KR = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} 100\% \quad 2.33$$

Dimana:

X_i = data observasi (data aktual).

Y_i = data simulasi atau data bangkitan.

N = jumlah data.

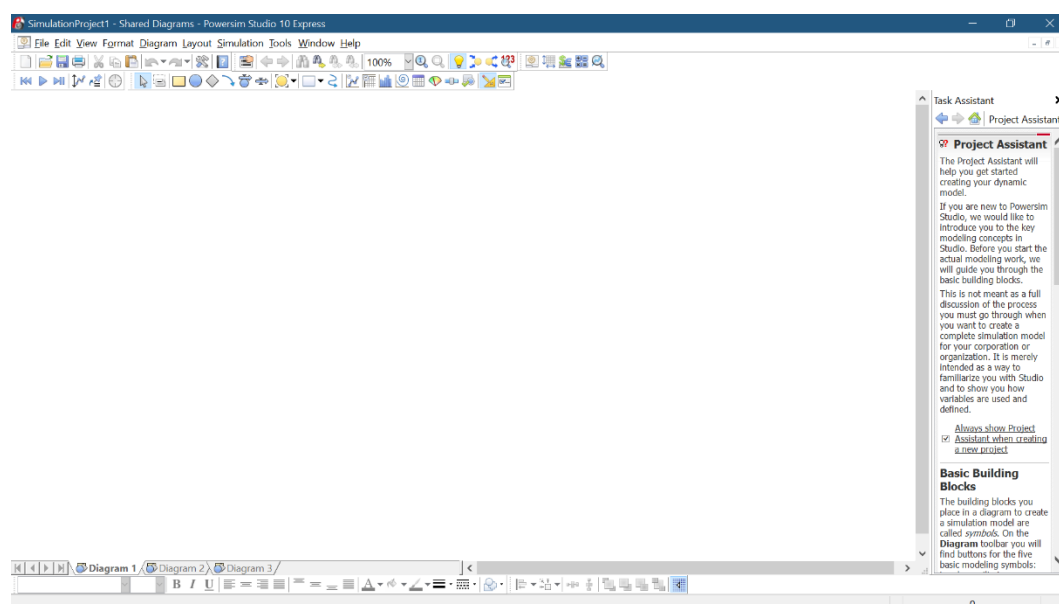
2.6 Sistem Dinamik dan Simulasi

Forrester, 1994 dalam Faradibah & Suryani, 2019, sistem dinamik merupakan kerangka yang memfokuskan pada sistem berpikir dengan menggunakan feedback loop dan mengambil beberapa langkah tambahan struktur serta mengujinya melalui model simulasi komputer.

Simulasi diartikan sebagai proses aplikasi dalam membangun model dari suatu sistem, menjalankan eksperimen dari model tersebut untuk memperoleh penjelasan dari perilaku sistem, mempelajari kinerja sistem, dan untuk membangun suatu sistem baru sesuai dengan kinerja yang dibutuhkan. Penggunaan simulasi dapat menjadi suatu alat yang memberikan manfaat berupa wawasan yang luas bagi pembuat keputusan dalam penyelesaian suatu masalah, baik dalam tahap perancangan sistem (sistem masih berupa usulan) maupun tahap operasional (sistem yang sedang berjalan).

2.7 Powersim Software

Perangkat lunak Powersim (Power Simulation) merupakan suatu alat bantu untuk membangun model simulasi bergerak. Dalam ruang lingkup sistem dinamik serta simulasi, perangkat lunak ini dapat menciptakan gambaran atau model dari sebuah sistem yang nyata maupun tidak. Model yang disusun digunakan sebagai asumsi dari suatu sistem. Model dapat terdiri dari komponen atau variabel yang saling berhubungan. Konstruksi model disusun dengan menentukan variabel dan hubungan antar variabel (Hasim, 2008)



Gambar 2.7 Tampilan awal Powersim Software

(Sumber: Data pribadi, 2023)

2.7.1 Causal Loop Diagram

Diagram sebab akibat digunakan untuk memahami sistem dengan membuat gambaran umum dari hubungan sebab dan akibat dalam sistem tersebut (konseptualisasi sistem). *Causal Loop Diagram* mampu menggambarkan bagaimana suatu sistem bekerja dan berperilaku (Wirabhuana, 2009).

Hubungan diagram sebab akibat terdapat dua macam, yaitu:

1. Hubungan Positif, dinyatakan dengan tanda positif. Hubungan pada kedua variabel adalah berbanding lurus, yaitu perubahan yang terjadi pada variabel sebab akan mengubah variabel akibat dengan arah yang sama.

2. Hubungan Negatif, dinyatakan dengan tanda negatif. Hubungan pada kedua variabel adalah berbanding terbalik, yaitu perubahan yang terjadi pada variabel sebab akan mengubah variabel akibat dengan arah yang berlawanan.

Loop dihasilkan dari hubungan antara variabel sebab dengan variabel akibat.

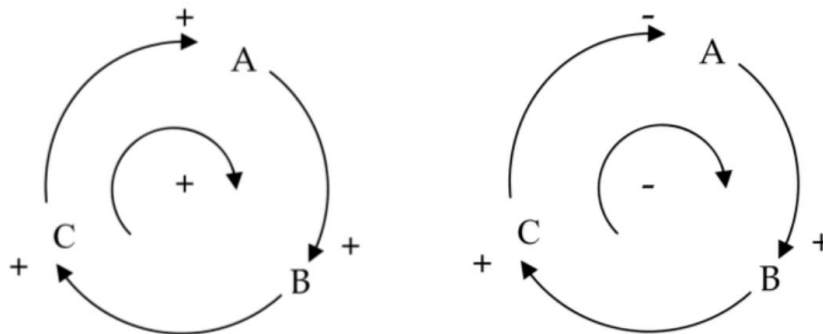
Loop dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu:

1. *Loop* Positif

Loop ini terjadi apabila hasil perkalian hubungan antar variabel adalah positif, misalnya perubahan variabel A (meningkat) mengakibatkan perubahan pada variabel lain hingga perubahan tersebut mempengaruhi variabel awal (A) dengan arah yang sama pada perubahan awal (meningkat).

2. *Loop* Negatif

Loop ini terjadi apabila hasil perkalian hubungan antar variabel adalah negatif, misalnya perubahan variabel A (meningkat) mengakibatkan perubahan pada variabel lain hingga perubahan tersebut mempengaruhi variabel awal (A) dengan arah yang berlawanan (menurun).



Gambar 2.8 *Loop* Positif dan *Loop* Negatif

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

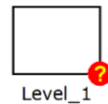
2.7.2 *Flow Diagram Modeling*

Flow Diagram merupakan bentuk rinci dari penggambaran sebuah sistem. Jenis variabel serta hubungan antar variabel ditunjukkan dalam *flow diagram*. Tujuan utama dari *flow diagram* adalah untuk menggambarkan aliran dan struktur sistem secara merinci agar dapat memfasilitasi pemodelan matematis (Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018).

Variabel dalam *flow diagram* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Level (Stocks)*

Tipe variabel yang mana merupakan perubahan akumulasinya. Level akan dipengaruhi oleh *rate (flow)*.

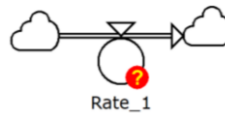


Gambar 2.9 Simbol *Level*

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

2. *Rate (Flow)*

Tipe variabel yang akan mempengaruhi variabel *level*.

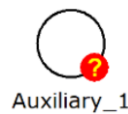


Gambar 2.10 Simbol *Rate (Flow)*

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

3. *Auxilliary*

Tipe variabel yang mana memuat perhitungan dasar pada variabel lain.



Gambar 2.11 Simbol *Auxiliary*

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

4. *Constant*

Tipe variabel yang mana memuat nilai tetap yang akan digunakan dalam perhitungan variabel *auxillary* atau *variabel flow*.

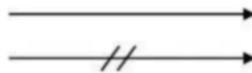


Gambar 2.12 Simbol *Constant*

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

5. *Link*

Sebuah alat yang menghubungkan antara satu variabel dengan variabel lainnya.



Gambar 2.13 Simbol *Link* dan *Delayed Link*

(Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018)

2.7.3 Validasi Model

Tingkat kesesuaian antara hasil simulasi model dengan gejala atau proses yang ditirukan diketahui melalui validasi. Apabila kesalahan atau simpangan hasil simulasi bernilai kecil, model dapat dinyatakan baik. Model selanjutnya digunakan untuk memahami perilaku gejala atau proses serta kecenderungannya di masa yang akan datang (Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018).

Validasi model dilakukan dengan membandingkan antara tingkah laku model dan sistem nyata, salah satunya dapat melalui cara uji *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*. *MAPE* atau nilai tengah kesalahan persentase absolut adalah salah satu ukuran relatif yang menyangkut kesalahan persentase. Uji ini dapat digunakan untuk menilai kesesuaian data hasil simulasi dengan data aktual.

$$KR = \frac{1}{n} \sum \frac{[X_s - X_a]}{X_a} \times 100\% \quad 2.34$$

Keterangan :

X_s = Data hasil simulasi

X_a = Data aktual

N = Periode atau banyak data

Kriteria nilai *MAPE* yang dijadikan acuan bahan pengukuran kemampuan dari suatu model dapat dilihat dari tabel berikut:

No	MAPE	Keterangan
1	< 10%	Kemampuan model peramalan sangat baik
2	10% - 20%	Kemampuan model peramalan baik
3	20% - 50%	Kemampuan model peramalan cukup
4	> 50%	Kemampuan model peramalan buruk

Sumber: Laboratorium Pemodelan dan Simulasi Industri, 2018