

2 LANDASAN TEORI

2.1 Ketersediaan Air dan Kebutuhan Air

2.1.1 Ketersediaan Air

Ketersediaan air merujuk pada volume air (debit) yang diperkirakan akan tetap ada secara kontinu di suatu lokasi, seperti bendung atau struktur air lainnya di sungai. Volume ini memiliki atasan tertentu dan berlaku dalam periode waktu tertentu (Suhudi et al., 2023). Limantara (2013 dalam (Retnowati et al., 2018) menyatakan bahwa untuk menilai ketersediaan air irigasi perlu mempertimbangkan debit bangkitan yang dapat diandalkan. Debit bangkitan ini merupakan hasil perhitungan yang memperhitungkan risiko kegagalan. Selain itu, ketersediaan air irigasi tidak hanya sebatas pada keberadaan air, tetapi juga melibatkan perhitungan yang valid terhadap debit bangkitan yang dapat diandalkan, yang juga dikenal sebagai debit andalan (*dependable*). Oleh karena itu, untuk memastikan keberlanjutan sistem irigasi, pengukuran ketersediaan air tidak hanya mencakup aliran atau debit yang diharapkan tetapi juga mencakup perhitungan yang teliti terhadap debit bangkitan yang dapat diandalkan.

Pembangkitan data debit dimaksudkan untuk memperoleh perkiraan nilai di masa depan melalui proses peramalan (*forecasting*). Metode Thomas-Fiering digunakan untuk menghasilkan estimasi debit yang diinginkan dengan data historis, rata-rata, koreksi, dan standar deviasi. Mediana dalam (Suprayogi et al., 2013) menyatakan bahwa aliran *perennial*, merupakan aliran sungai yang terus mengalir sepanjang tahun dan tidak pernah mencapai debit nol, dapat diramalkan dengan menggunakan model Thomas-Fiering. Model ini menggunakan rumus berikut:

$$Q_{i+1} = \bar{Q}_j + 1 + b_j (Q_i - \bar{Q}_j) + t_i s_j + 1\sqrt{1-r_j^2} \quad (2.1)$$

$$b_j = r_j \frac{s_{j+1}}{s_j} \quad (2.2)$$

$$r_j = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.3)$$

$$c1 = \sum_i (Q_{ji} - \bar{Q}_j)(Q_{j+1,i} - \bar{Q}_{j+1}) \quad (2.4)$$

$$c2 = \sqrt{\sum_i (Q_{ji} - \bar{Q}_j)^2 \sum_i (Q_{j+1,i} - \bar{Q}_{j+1})^2} \quad (2.5)$$

dimana:

Q_{i+1} : debit bangkitan bulan ke-($i + 1$)

Q_i : debit bulan ke- i

\bar{Q}_{j+1} : debit rata-rata bulanan bulan ke-($j + 1$)

\bar{Q}_j : debit rata-rata bulanan bulan ke- j

b_j : koefisien regresi untuk menghitung volume aliran bulan ke-($j + 1$) dari bulan ke- j

s_{j+1} : simpangan baku data (aliran) bulan ke-($j + 1$)

s_j : simpangan baku data bulan ke- j

t_i : bilangan random normal

Kalibrasi debit dilakukan guna mengetahui apakah nilai debit pada debit simulasi telah mendekati kondisi sebenarnya. Data debit dianalisis validasinya menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), Koefisien Korelasi (R), Uji Konsistensi, Uji Ketiadaan *Trend*, dan Uji Stasioner.

Metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) ini digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara nilai prediksi-simulasi dan nilai observasi, dengan skala nilai dari minus tak terhingga hingga satu. Nilai NSE mengingkat seiring dekatnya dengan satu, menunjukkan bahwa data hasil pembangkitan lebih sesuai dengan data yang diamati. Rumus menghitung NSE sebagaimana berikut:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (2.6)$$

di mana:

X_i : data observasi (data aktual)

Y_i : hasil simulasi data

\bar{X}_i : rata-rata data observasi

N : jumlah data

Tabel 2.1 merupakan tabel kriteria nilai NSE untuk validasi hasil bangkitan data.

Tabel 2.1 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: Motovilov, *et. al.* 1999 dalam (Suhartanto et al., 2019)

Analisis koefisien korelasi adalah untuk meningkatkan pemahaman mengenai pola dan tingkat hubungan antara dua atau lebih variabel, untuk mengetahui seberapa erat hubungan antar variabel-variabel tersebut, koefisien korelasi (R) digunakan. Koefisien korelasi dihitung dengan rumus berikut:

$$R = \frac{N \sum_{t=1}^N X_t Y_t - \sum_{t=1}^N X_t - \sum_{t=1}^N Y_t}{\sqrt{N \sum_{t=1}^N X_t - (\sum_{t=1}^N X_t)^2} \sqrt{N \sum_{t=1}^N Y_t - (\sum_{t=1}^N Y_t)^2}} \quad (2.7)$$

di mana:

X_i : data observasi (data aktual)

Y_i : data simulasi atau data bangkitan

N : jumlah data

Kriteria nilai dari koefisien korelasi disajikan dalam Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 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: Sugiyono, 2017 dalam (Suhartanto et al., 2019)

Dalam analisis hidrologi, penting untuk menguji konsistensi data debit dalam urutan waktu. Kurva massa ganda dan *Rescales Adjusted Partial Sums* (RAPS) adalah dua metode yang paling umum digunakan (Irawan et al., 2020). Sumber data debit penelitian ini berasal dari Pos Bendung Cimulu. Akibatnya, metode RAPS akan digunakan untuk mengevaluasi konsistensi data. Proses pengujian data yang digunakan dalam metode RAPS adalah sebagai berikut:

1. Hitungan rerata digunakan untuk mengurutkan data debit berdasarkan urutan Tahun sebelumnya.
2. Menghitung nilai total penyimpangan dibandingkan dengan nilai rata-rata (Sk^*).

$$Sk^* = \sum_{i=1}^k (Q_i - \bar{Q}), \text{ dengan } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.8)$$

dengan:

Sk^* : nilai kumulatif penyimpangan terhadap rata-rata

3. Menghitung nilai D_y

$$D_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n}} \quad (2.9)$$

dengan:

D_y : simpangan baku dari data Y

4. Menghitung nilai RAPS (Sk^{**})

$$Sk^{**} = \frac{Sk^*}{D_y} \quad (2.10)$$

dengan:

Sk^{**} : *Rescaled Adjusted Partial Sums*

5. Menghitung nilai statistik Q dan R

$$Q = |Sk^{**}| \text{ maksimum} \quad (2.11)$$

$$R = |Sk^{**}| \text{ maksimum} - |Sk^{**}| \text{ minimum} \quad (2.12)$$

6. Nilai Q_{hitung} dan R_{hitung} dibandingkan dengan Q_{kritis} dan R_{kritis} seperti yang ditunjukkan dalam tabel berikut:

Tabel 2.3 Nilai Kritis Parameter Statistik Q dan R

Jumlah Data (n)	$\frac{Q}{\sqrt{n}}$			$\frac{R}{\sqrt{n}}$		
	90%	95%	99%	90%	95%	99%
10	1,05	1,14	1,29	1,21	1,28	1,38
20	1,10	1,22	1,42	1,34	1,43	1,60
30	1,12	1,24	1,46	1,40	1,50	1,70
40	1,13	1,26	1,50	1,42	1,53	1,74
50	1,14	1,27	1,52	1,44	1,55	1,78
100	1,17	1,29	1,55	1,50	1,62	1,86
>100	1,22	1,36	1,63	1,62	1,75	2,00

Sumber: Sri Harto Br, 1993 dalam (Nurdiansyah, 2022)

Keseragaman (*homogenitas*) data debit sangat penting dalam analisis hidrologi. Jika terdapat kecenderungan (*trend*) dalam data hujan, data debit tidak dianjurkan untuk digunakan dalam analisis yang lebih lanjut. Hal ini dikarenakan analisis hidrologi harus mengikuti pola trend yang ada. Uji korelasi peringkat dikenal sebagai koefisien peringkat korelasi Spearman, digunakan untuk mengevaluasi ketidakadaan trend. Berikut adalah situasi yang mungkin terjadi dan kondisi yang dapat digunakan untuk menggunakan rumus metode Spearman:

$$KP = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (2.13)$$

$$t = KP \left[\frac{n-2}{1-KP^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

di mana:

KP = n korelasi peringkat dari Spearman

n = jumlah data

dt = $R_t - T_t$

T_t = Peringkat dari waktu

R_t = Peringkat variabel hidrologi

T = Nilai distribusi t, pada derajat kebebasan (n-2) untuk derajat

kepercayaan tertentu umumnya 5%

Dalam penggunaan rumus Spearman, terdapat dua kondisi yang perlu diperhatikan. Rumus yang digunakan adalah (2.13) jika tidak ada peringkat yang sama atau kembar (*tied rank*). Sedangkan, rumus yang digunakan jika peringkatnya sama atau kembar adalah (2.14).

Memastikan bahwa data deret berkala (*time series*) stabil, rata-rata dan varian (ragam) harus diuji. Karena data yang stabil akan homogen dan dapat digunakan untuk analisis hidrologi yang lebih kompleks. Uji-F dan Uji-T adalah dua tahapan dari uji stasioner.

Kestabilan varian dapat dinilai dengan uji-F. Metode berikut digunakan untuk melakukan uji-F:

1. Membagi deret menjadi dua kelompok.
2. Cari nilai F_{hitung} menggunakan persamaan di bawah ini:

$$F = \frac{N_1 S_1^2 (N_2 - 1)}{N_2 S_2^2 (N_1 - 1)} \quad (2.15)$$

dengan:

N_1, N_2 : jumlah data kelompok 1 dan 2

S_1, S_2 : simpangan baku kelompok 1 dan 2

3. Bandingkan nilai F_{hitung} dengan F_{kritis}
4. Apabila nilai $-F_{kritis} < F_{hitung} < F_{kritis}$, maka data homogen dan hipotesis tidak ditolak.

Uji-T digunakan untuk menentukan kestabilan rata-rata data deret berkala. Proses uji-T adalah sebagai berikut:

1. Lakukan pembagian kelompok data seperti yang dilakukan dalam uji-F.
2. Cari nilai σ dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (2.16)$$

3. Cari nilai t_{hitung} dengan menggunakan persamaan:

$$t_{hitung} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (2.17)$$

4. Menentukan interval kepercayaan dan bandingkan nilai t_{hitung} dengan t_{kritis} dari tabel uji-T.
5. Apabila nilai $-t_{kritis} < t_{hitung} < t_{kritis}$, maka hipotesis tidak ditolak.

Setelah dilakukan validitas data debit, langkah selanjutnya adalah menghitung debit andalan (*Dependable Discharge*). Debit andalan ini merupakan debit yang dihitung untuk menentukan debit rencana yang selalu tersedia di sungai. Debit andalan dalam perencanaan air irigasi biasanya dihitung dengan mempertimbangkan kondisi musiman yang dapat memengaruhi debit andalan. Keandalan debit yang dihitung memiliki arti yang berbeda-beda tergantung pada langkah-langkah yang diperlukan untuk menghitung debit andalan.

Sesuai dengan SNI 6738:2015 (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2015) dan (KP-01, 2013), beberapa metode estimasi debit andalan telah diakui. Metode Weibull digunakan untuk menentukan probabilitas debit andalan. Selain itu, debit andalan dapat dihitung dengan data curah hujan menggunakan metode NRECA dan FJ Mock. Tujuan dari metode-metode ini adalah untuk menyediakan estimasi debit yang dapat diandalkan untuk keperluan irigasi. Cara menghitung debit andalan berdasarkan kebutuhannya ditunjukkan dalam Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Debit Andalan Bergantung pada Kebutuhan

Kebutuhan	Debit Andalan (%)
Air minum	99
Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	85 – 90
Air irigasi:	
1. Daerah beriklim setengah lembab	70 – 85
2. Daerah beriklim kering	80 – 95

Sumber: (Kharistanto et al., 2023)

(Mori, 2003) menyatakan bahwa kondisi debit andalan termasuk dalam empat kategori, yaitu:

1. Debit air pada musim kering melebihi debit tersebut selama 355 hari dalam setahun (97%).
2. Debit air pada musim rendah melebihi debit tersebut selama 275 hari dalam setahun (75%).

3. Debit air pada musim normal melebihi debit tersebut selama 185 hari dalam setahun (51%).
4. Debit air yang cukup melebihi debit tersebut selama 95 hari dalam setahun (26%).

Menurut (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2015) tentang Perhitungan Debit Andalan Sungai dengan Kurva Durasi Debit, debit andalan penelitian ini dihitung dengan metode ranking/probabilitas Weibull. Pada penelitian ini, metode Weibull akan digunakan untuk membangkitkan debit andalan dengan mempertimbangkan kesetimbangan air yang bergerak maju. Rumus untuk metode ranking Weibull sebagai berikut:

$$P = \frac{m}{(n+1)} \times 100\% \quad (2.18)$$

di mana:

P : probabilitas (%)

m : nomor urut data debit

n : jumlah data pengamatan debit

2.1.2 Kebutuhan Air

Kebutuhan air irigasi merujuk pada total volume air yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan evaporasi, kehilangan air, dan kebutuhan air bagi tanaman. Besarnya kebutuhan air irigasi dipengaruhi oleh metode pengolahan lahan, curah hujan, dan kontribusi air tanah. Analisis kebutuhan air irigasi melibatkan faktor-faktor seperti jenis tanaman dan kondisi lahan (Fitriansyah et al., 2020). Selain itu, untuk menghitung kebutuhan air tersebut diperlukan analisis curah hujan, evapotranspirasi, penyiapan lahan, penggunaan air konsumtif tanaman, perkolasi, dan penggantian lapisan air.

1. Analisis Curah Hujan

Analisis curah hujan merupakan proses pemeriksaan dan evaluasi data curah hujan yang dikumpulkan di suatu wilayah untuk memenuhi karakteristik hidrologis wilayah tersebut, seperti pola curah hujan, debit aliran air, dan potensi banjir. Pola

curah hujan di Indonesia secara umum dipengaruhi oleh posisi geografisnya, dengan garis khatulistiwa yang melintasi negara ini menyebabkan sepanjang tahun disinari matahari. Pada umumnya curah hujan di Indonesia bervariasi, namun secara umum jumlah curah hujan yang tinggi berkisar antara 2000 hingga 3000 tahun. Jawa Barat memiliki rata-rata curah hujan tahunan mencapai 2000 hingga 4000 mm, menjadikan wilayah dengan curah hujan tahunan tertinggi di Indonesia (Hidayat et al., 2016).

Dalam analisis curah hujan, penting untuk mempertimbangkan kedua jenis curah hujan yaitu curah hujan kawasan dan curah hujan efektif karena keduanya dapat memengaruhi karakteristik hidrologis suatu wilayah dan potensi banjir. Kedua curah hujan tersebut biasanya digunakan dalam model hidrologi untuk memprediksi aliran air dan potensi banjir di suatu wilayah.

Curah hujan kawasan adalah jumlah hujan yang jatuh di seluruh wilayah yang dianalisis. Data ini penting untuk memahami pola curah hujan secara keseluruhan di suatu wilayah dan dapat digunakan dalam model hidrologi untuk memprediksi aliran air dan potensi banjir. Dalam siklus hidrologi, hujan dapat diserap oleh tanaman, sebagian mengalir, dan sebagian lagi menguap melalui proses evaporasi. Data curah hujan kawasan diperoleh dari beberapa stasiun hujan dan diolah menggunakan metode seperti rata-rata aritmatika, Poligon Thiessen, dan Isohyet.

Pemilihan metode perhitungan curah hujan kawasan, (Mori, 2003) memberikan pertimbangan yang didasarkan pada luas daerahnya sebagaimana berikut ini:

- a. Daerah dengan luas ≤ 250 ha dan variasi topografi yang minimal, alat ukur hujan dianggap cukup untuk mewakili curah hujan kawasan.
- b. Daerah dengan luas antara 250 hingga 50.000 ha dan memiliki dua hingga tiga stasiun hujan (titik pengamat), metode rata-rata aritmatika dapat digunakan.
- c. Daerah dengan luas antara 120.000 hingga 500.000 ha yang memiliki titik pengamatan yang terdistribusi merata dan tidak dipengaruhi oleh topografi, metode rata-rata aritmatika dapat digunakan. Apabila titik pengamatan tidak terdistribusi merata, maka metode Polygon Thiessen dapat digunakan.

d. Daerah dengan luas lebih dari 500.000 ha, metode Isohyet dapat digunakan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data dari tiga stasiun hujan dengan luas daerah yang ditinjau yaitu 1546,2 ha. Metode rata-rata aritmatika/aljabar dapat digunakan untuk menghitung curah hujan kawasan dengan rumus berikut ini:

$$R = \frac{1}{n} (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad (2.19)$$

di mana:

R : curah hujan kawasan (mm)

n : jumlah titik pengamatan/stasiun hujan

R_1, R_2, R_n : curah hujan di setiap titik pengamatan (mm)

Curah hujan efektif merujuk pada jumlah curah hujan yang secara langsung dapat dimanfaatkan oleh tanaman selama periode musim tanamnya. Untuk menghitung curah hujan efektif, digunakan rumus *Hazra* yang mengacu pada urutan curah hujan yang terkecil (Hidayat et al., 2016). Secara statistik berdasarkan *Harza Engineering Company*, curah hujan efektif merujuk pada curah hujan yang melebihi 80% dari nilai curah hujan, yang secara singkat dapat diartikan bahwa dari 10 kejadian, curah hujan efektif terlampaui sebanyak delapan kali. Untuk menghitung curah hujan efektif, terdapat dua metode yang umum digunakan yaitu metode *Rangking Weibull* dan metode *Basic Year*. Penelitian ini akan digunakan metode *Rangking Weibull* untuk menghitung curah hujan efektif. Rumus untuk menghitung curah hujan efektif menggunakan metode *Rangking Weibull* adalah sebagai berikut:

$$R_{80wb} = H \times \frac{n}{(n+1)} \quad (2.20)$$

$$R_{50wb} = H \times \frac{n}{(n+1)} \quad (2.21)$$

dengan:

R_{80} : curah hujan yang terjadi dengan tingkat keandalan 80% (mm)

R_{50} : curah hujan yang terjadi dengan tingkat keandalan 50% (mm)

H : curah hujan rata-rata tahunan

n : jumlah tahun pengamatan

Tanaman padi membutuhkan 70% curah hujan R_{80} Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$R_e = 70\% R_{80} \quad (2.22)$$

dengan:

R_e : curah hujan efektif untuk padi (mm)

Tanaman palawija membutuhkan jumlah air yang lebih sedikit daripada tanaman padi, curah hujan efektif untuk tanaman palawija diambil sebesar 50% dari nilai R_{80} . Persamaan yang digunakan untuk menghitung curah hujan efektif untuk tanaman palawija adalah sebagai berikut:

$$R_e = 50\% R_{80} \quad (2.23)$$

dengan:

R_e : curah hujan efektif untuk palawija (mm)

Standar kriteria Perencanaan Irigasi 01 menjelaskan hubungan antara curah hujan efektif tanaman padi dan curah hujan efektif tanaman palawija rata-rata bulanan. Perhitungan curah hujan efektif bulanan untuk tanaman palawija dapat dihitung dengan menggabungkan nilai curah hujan andalan dan nilai evapotranspirasi. Oleh karena itu, perhitungan curah hujan berbeda untuk tanaman palawija karena keduanya berkaitan dengan evapotranspirasi yang terjadi pada bulan tersebut.

Tabel 2.5 Eto dan Curah Hujan Rata-rata Bulanan Berkorelasi dengan Curah Hujan Efektif Tanaman Palawija (USDA (SCS, 1969))

CH (mm)	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175	187,5	200
ET_o													
25													
50	32	39	46										
75	34	41	48	56	62	69							
100	35	43	52	59	66	73	80	87	94	100			
125	37	46	54	62	70	76	85	92	98	107	116	120	

CH (mm)	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175	187,5	200
<i>E_{to}</i>													
150	39	49	57	66	74	81	89	97	104	112	119	127	133
175	42	52	61	69	78	86	95	103	111	118	126	134	141
200	44	54	64	73	82	91	100	109	117	125	134	141	150
225	47	57	68	78	87	96	106	115	124	132	141	150	159
250	50	50	72	84	92	102	112	121	132	140	150	158	167

Sumber: (KP-01, 2013)

2. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah suatu fenomena yang terjadi sebagai hasil dari proses evaporasi yaitu penguapan air dari permukaan lahan, dan transpirasi yaitu pelepasan uap air oleh tanaman melalui stomata pada daunnya. Menurut (Triatmodjo, 2008) efek evapotranspirasi sebanding dengan jumlah air konsumtif yang diperlukan tanaman untuk tumbuh.

Beberapa rumus yang biasa digunakan dalam analisis hidrologi dapat digunakan untuk menghitung evapotranspirasi. Beberapa rumus yang sering digunakan antara lain:

- a. Metode Pan Evaporasi: Metode ini mengukur tingkat penguapan air dari permukaan air terbuka menggunakan alat yang disebut *Evaporation Pan*. Data pengukuran ini digunakan sebagai indikator penguapan potensial.
- b. Rumus Penman Modifikasi: Rumus ini merupakan modifikasi dari rumus Penman yang menggabungkan faktor-faktor meteorologi seperti suhu udara, kecepatan angin, kelembaban relatif, radiasi matahari, dan tekanan udara. Rumus ini memberikan estimasi evapotranspirasi aktual yang lebih akurat.
- c. Persamaan empiris Thornthwaite: persamaan ini menggunakan data suhu rata-rata bulanan untuk menghitung evapotranspirasi potensial. Persamaan ini cocok digunakan di daerah dengan data suhu yang lengkap.
- d. Metode Blaney-Criddle: metode ini menggunakan data suhu maksimum dan minimum harian untuk menghitung evapotranspirasi potensial. Metode ini lebih sederhana dan cocok digunakan di daerah dengan data suhu yang terbatas.

Penelitian ini menggunakan metode Penman Modifikasi karena melibatkan lebih banyak parameter meteorologi, sehingga dianggap lebih mendekati kondisi di lapangan. Rumus ini dapat memberikan perkiraan yang lebih akurat tentang tingkat evapotranspirasi aktual. Tabel 2.6 berikut menunjukkan perbandingan parameter yang digunakan untuk rumus evapotranspirasi.

Tabel 2.6 Perbandingan Parameter Rumus ETo

No	Metode	<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>n</i>	<i>H</i>	<i>Ra</i>	<i>E</i>
1	Pan Evaporasi						Ada
2	Penman	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	
3	Thornthwaite	Ada					
4	Blaney-Criddle	Ada					

Keterangan:

T : *temperature* (suhu)

RH : *relative humidity* (kelembaban relatif)

n : lama penyinaran matahari

H : kecepatan angin

Ra : radiasi ekstraterrestrial atau nilai angot

E : evaporasi

Metode Penman modifikasi digunakan untuk menghitung evapotranspirasi dengan menggunakan rumus-rumus berikut:

$$ETo = c[W.Rn + (1 - W).f(u).(ea - ed)] \quad (2.24)$$

$$ed = ea .RH \quad (2.25)$$

$$f(ed) = 0,34 - 0,44\sqrt{ed} \quad (2.26)$$

$$f(n/N) = 0,1 + 0,9\left(\frac{n}{N}\right) \quad (2.27)$$

$$f(u) = 0,27 + \left(1 + \frac{u_2}{100}\right) \quad (2.28)$$

$$Rn1 = f(T) \times f(ed) \times f(n/N) \quad (2.29)$$

$$Rs = (0,25 + 0,54(n/N)) \times Ra \quad (2.30)$$

di mana:

- ET_o : evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- c : angka koreksi Penman untuk mengimbangi dampak cuaca siang dan malam
- W : faktor berat untuk pengaruh penyinaran matahari pada potensi evapotranspirasi.
- $1 - W$: faktor pemberat yang berdampak pada kecepatan angin dan kelembaban
- $f(u)$: Fungsi pengaruh angin pada $ET_o = 0,27 \times (1 + U^2/100)$, di mana U adalah kecepatan angin dalam km/hari di ketinggian 2 m selama 24 jam
- ea : tekanan uap air jenuh dibandingkan dengan suhu udara rata-rata (mbar)
- ed : tekanan uap air sebenarnya di udara (mbar)
- u : kecepatan angin (km/hari atau m/detik)
- $f(ed)$: fungsi tekanan uap
- $f(T)$: fungsi temperatur
- $f(n/N)$: fungsi kecerahan matahari
- RH : kelembaban udara relatif (%)
- $Rn1$: radiasi bersih gelombang panjang
- Rs : radiasi gelombang pendek
- Ra : radiasi ekstraterrestrial/nilai angot

Berikut ini adalah beberapa parameter yang digunakan untuk menghitung evapotranpirasi:

a. Tekanan uap jenuh, faktor penimbang, dan fungsi suhu

Tabel 2.7 dan Tabel 2.8 menunjukkan nilai tekanan uap jenuh (e_a), fungsi suhu $f(T)$, dan faktor penimbang (W).

Tabel 2.7 Nilai Faktor Penimbang Berdasarkan Korelasi Suhu dan Ketinggian

Z (m)	Temperatur (°C)								
	22	24	26	28	30	32	34	36	38
0	0,71	0,73	0,75	0,77	0,78	0,80	0,82	0,83	0,84
500	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85
1000	0,73	0,75	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86
2000	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87
3000	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86	0,88	0,88
4000	0,79	0,81	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90

Sumber: Oktawirawan dalam (Nurdiansyah, 2022)

Tabel 2.8 Hubungan Antara Tekanan Uap Jenuh, Faktor Penimbang, dan Fungsi Temperatur

Temperatur (°C)	W	$f(T)$	e_a (mbar)
22,00	0,71	15,20	26,40
24,00	0,74	15,40	28,10
25,00	0,75	15,65	29,80
26,00	0,76	15,90	31,70
27,00	0,77	16,10	33,60
28,00	0,78	16,30	35,70
28,60	0,78	16,42	37,80
29,00	0,79	16,50	40,10

Sumber: Oktawirawan dalam (Salsabila, 2023)

b. Radiasi ekstraterrestrial (R_a)

Tabel berikut dapat diinterpolasi untuk mendapatkan nilai R_a :

Tabel 2.9 Nilai Radiasi Ekstraterrestrial Per Bulan Berdasarkan Koordinat Lintang Selatan

Bulan	Koordinat Lintang Selatan (°)			
	4	6	8	10
Januari	15,3	15,5	15,8	16,1
Februari	15,7	15,8	16,0	16,1
Maret	15,7	15,6	15,6	15,5
April	15,1	14,9	14,7	14,4
Mei	14,1	13,8	13,4	13,1

Bulan	Koordinat Lintang Selatan (°)			
	4	6	8	10
Juni	13,5	13,2	12,8	12,4
Juli	13,7	13,4	13,1	12,7
Agustus	14,5	14,3	14,0	13,7
September	15,2	15,1	15,0	14,9
Oktober	15,5	15,6	15,7	15,8
November	15,3	15,5	15,8	16,0
Desember	15,1	15,4	15,7	16,0

Sumber: (Nurdiansyah, 2022)

c. Angka koreksi Penman

Tabel 2.10 berikut menunjukkan angka faktor penyesuaian atau koreksi:

Tabel 2.10 Faktor Koreksi Penman

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des
C	1,10	1,10	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10

Sumber: Suroso dalam (Nurdiansyah, 2022)

d. Koefisien pemantulan/Albedo

Koefisien Albedo adalah perbandingan radiasi yang dipantulkan dan berasal dari suatu permukaan. Nilai koefisien Albedo disajikan dalam Tabel 2.11:

Tabel 2.11 Koefisien Albedo

Sifat Permukaan	R
Air Terbuka	0,06
Batu	0,12 – 0,15
Rumput	0,08 – 0,09
Tanaman Hijau	0,20

Sumber: Soemarto, 1987 dalam (Yusuf, 2023)

3. Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi mencakup jumlah air yang diperlukan untuk mengatasi penguapan, kehilangan air, dan kebutuhan air tanaman, dengan mempertimbangkan jumlah air yang disediakan oleh hujan dan sumber air bawah tanah (Mori, 2003). Dalam merencanakan dan mengelola sistem irigasi, sangat penting untuk mengetahui jumlah air yang diperlukan untuk sistem tersebut. Beberapa faktor

memengaruhi kebutuhan air untuk pertanian padi di sawah, ini termasuk persiapan lahan, penggunaan air oleh tanaman, rembesan dan perkolasi air, penggantian lapisan air, dan curah hujan yang efektif. Kebutuhan air irigasi adalah bagian penting dari menjaga neraca air irigasi seimbang. Data ini kemudian dapat digunakan untuk menentukan seberapa banyak air yang digunakan sistem tersebut.

Kebutuhan air irigasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti evapotranspirasi tanaman, perkolasi, persyaratan genangan, dan curah hujan yang efektif. Evapotranspirasi yang sering disebut sebagai penggunaan air oleh tanaman, bervariasi bergantung pada koefisien dan tanaman referensi yang pada akhirnya dipengaruhi oleh jadwal penanaman (Hidayat et al., 2023). Berikut ini adalah beberapa rumus yang dapat digunakan untuk menghitung jumlah air yang diperlukan untuk irigasi:

- a. Kebutuhan air selama penyiapan lahan

$$IR = \frac{M e^k}{e^k - 1} \quad (2.31)$$

dengan:

IR : kebutuhan air selama penyiapan lahan (mm/hari)

- b. Kebutuhan air bersih di sawah untuk padi

$$NFR = ET_c + P + WLR - Re \quad (2.32)$$

dengan:

NFR : *Net Field Water Requirement* (mm/hari)

ET_c : evapotranspirasi tanaman (mm/hari)

P : perkolasi (mm/hari)

WLR : *Water Layer Requirement* (mm/hari)

- c. Kebutuhan air bersih di sawah untuk palawija

$$NFR = ET_c + P - Re \quad (2.33)$$

d. Kebutuhan bersih air di pintu pengambilan (*intake*)

$$DR = \frac{NFA}{8,64EI} \quad (2.34)$$

dengan:

DR : kebutuhan air di *intake* (lt/detik/ha)

A : luas lahan (ha)

EI : efisiensi irigasi

4. Efisiensi Irigasi

Menurut Kriteria Perencanaan (KP-01) dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), efisiensi irigasi adalah perbandingan antara volume air yang digunakan dan volume air yang disadap dan ditunjukkan dalam persen (%). Efisiensi irigasi total dapat dihitung dengan mengalikan efisiensi petak tersier efisiensi saluran sekunder, dan efisiensi saluran primer. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung efisiensi irigasi:

$$EI = \frac{\text{Jumlah air yang digunakan}}{\text{Jumlah air yang diberikan}} \times 100\% \quad (2.35)$$

Tabel 2.12 Efisiensi Irigasi Ladang

	Awal	Peningkatan yang Dapat Dicapai
Sistem irigasi utama	0,75	0,80
Petak tersier	0,65	0,75
Keseluruhan	0,50	0,60

Sumber: (KP-01, 2013)

5. Penyiapan Lahan

Dalam Kriteria Perencanaan (KP-01) tahun 2013, disebutkan bahwa kebutuhan air irigasi maksimum untuk suatu proyek umumnya ditentukan oleh kebutuhan air untuk penyiapan lahan. Jumlah air yang diperlukan untuk proses penyiapan lahan adalah dua faktor utama yang menentukan jumlah air yang diperlukan untuk proses penyiapan lahan.

Faktor sosial, budaya, dan teknis memengaruhi waktu persiapan lahan. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan persiapan lahan dapat dipengaruhi oleh keadaan tersebut. Praktik lokal dapat membantu menentukan waktu yang diperlukan untuk menyiapkan lahan. Sebagai contoh, waktu satu setengah bulan biasanya digunakan sebagai referensi untuk menyelesaikan persiapan lahan di seluruh petak tersier.

(Van de Goor, G. A. W., & Zijlstra, 1968) dalam bukunya “*Irrigation Requirments for Double Cropping of Lowland Rice*” menghasilkan algoritma untuk menghitung jumlah air yang diperlukan selama masa persiapan lahan, juga dikenal sebagai periode penyejukan. Rumus untuk menghitung jumlah air yang diperlukan untuk persiapan lahan adalah sebagai berikut:

$$IR = \frac{M e^k}{e^k - 1} \quad (2.36)$$

$$k = \frac{MT}{S} \quad (2.37)$$

$$M = Eo + P \quad (2.38)$$

dengan

- IR : kebutuhan air irigasi untuk persawahan (mm/hari)
- M : kebutuhan air untuk mengimbangi kehilangan air yang disebabkan oleh perkolasi dan evaporasi sawah yang sudah jenuh.
- Eo : evaporasi air terbuka ($1,1ETo$) selama persiapan lahan (mm/hari)
- P : perkolasi (mm/hari)
- T : waktu yang diperlukan untuk menyiapkan lahan (hari)
- S : kebutuhan air untuk penjemuran (mm)
- e : bilangan Euler/natural/Napier (= 2,718...)

Tabel 2.13 menunjukkan pedoman yang diberikan oleh Kriteria Perencanaan Irigasi 01 mengenai jumlah air yang diperlukan untuk irigasi selama masa persiapan lahan:

Tabel 2.13 Kebutuhan Air Irigasi Selama Penyiapan Lahan

$M = E_0 + P$ mm/hari	T = 30 hari		T = 45 hari	
	S = 250 mm	S = 300 mm	S = 250 mm	S = 300 mm
5,0	11,1	12,7	8,4	9,5
5,5	11,4	13,0	8,8	9,8
6,0	11,7	13,3	9,1	10,1
6,5	12,0	13,6	9,4	10,4
7,0	12,3	13,9	9,8	10,8
7,5	12,6	14,2	10,1	11,1
8,0	13,0	14,5	10,5	11,5
8,5	13,3	14,8	10,8	11,8
9,0	13,6	15,2	11,2	12,1
9,5	14,0			
10,0	14,3			
10,5	14,7			
11,0	15,0			

Sumber: (KP-01, 2013)

6. Penggunaan Air Konsumtif Tanaman

Sebagian besar air yang hilang akibat evapotranspirasi dikonsumsi oleh tanaman. Untuk menghitung jumlah air konsumtif tanaman, rumus berikut digunakan:

$$ET_c = kc \times ET_o \quad (2.39)$$

dengan:

ET_c : kebutuhan air tanaman (mm/hari)

kc : koefisien tanaman

ET_o : evapotranspirasi (mm/hari)

Jenis varietas yang digunakan tanaman selama masa pertumbuhan sangat memengaruhi penentuan kebutuhan air tanaman. Pengaturan pola tanam mencakup pemilihan varietas dan fase pertumbuhan tanaman. Dalam pengaturan pola tanam, penting untuk memperhatikan koefisien tanaman yang akan digunakan untuk menghitung jumlah air yang diperlukan untuk tanaman. Jumlah air konsumtif tanaman dapat dihitung dengan menggunakan standar koefisien tanaman berikut ini.

Tabel 2.14 Koefisien Tanaman Padi

Bulan	Nedeco/Prosida		FAO	
	Varietas Biasa	Varietas Unggul	Varietas Biasa	Varietas Unggul
0.5	1.2	1.2	1.1	1.1
1.0	1.2	1.3	1.1	1.1
1.5	1.3	1.3	1.1	1.05
2.0	1.4	1.3	1.1	1.05
2.5	1.4	1.3	1.1	0.95
3.0	1.2	0.0	1.05	0.0
3.5	1.1		0.95	-
4.0	0.0		0.0	-

Sumber: (KP-01, 2013)

Tabel 2.15 Koefisien Tanaman Palawija

Tanaman	Jangka Tumbuh (hari)	Setengah bulan ke-								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kedelai	85	0,5	0,75	1,0	1,0	0,82	0,45*			
Jagung	80	0,5	0,59	0,96	1,05	1,02	0,95*			
Kacang tanah	130	0,5	0,51	0,66	0,85	0,95	0,95	0,95	0,55	0,55*
Bawang	70	0,5	0,51	0,69	0,90	0,90*				
Buncis	75	0,5	0,64	0,89	0,95	0,88				

Sumber: (KP-01, 2013)

Keterangan:

*untuk sisanya kurang dari setengah bulan

7. Perkolasi

(Soemarto, 1987) mengatakan bahwa perkolasi terjadi ketika air berpindah dari zona tidak jenuh (*unsaturated zone*) ke zona jenuh (*saturated zone*). Zona jenuh berada di bawah permukaan air tanah, sementara zona tidak jenuh mencakup permukaan tanah hingga permukaan muka air tanah. Laju perkolasi (Pp) yang dipengaruhi oleh kondisi di zona tidak jenuh adalah laju maksimum perkolasi. Sifat tanah memengaruhi laju perkolasi dan data perkolasi biasanya diperoleh melalui penelitian tentang kemampuan tanah.

Saat padi sudah ditanam di sawah, laju perkolasi dapat diukur langsung di area proyek irigasi. Setelah penggenangan, laju perkolasi tanah lempung biasanya

1-3 mm perhari. Perembesan air di sawah dapat menyebabkan kerugian air besar di daerah dengan lereng curam. Kehilangan air akibat perkolasi dan rembesan minimal 5 mm per hari di daerah dengan kemiringan lebih dari 5% (KP-01, 2013). Tabel 2.16 dibawah merupakan tabel harga perkolasi berbagai jenis tanah.

Tabel 2.16 Harga Perkolasi Berbagai Jenis Tanah

No	Macam Tanah	Perkolasi (mm/hari)
1	<i>Sandy loam</i> (geluh berpasir)	3 – 6
2	<i>Loam</i> (geluh)	2 – 3
3	<i>Clay</i> (lempung)	1 – 2

Sumber: (Langoy, 2016)

8. Penggantian Lapisan Air

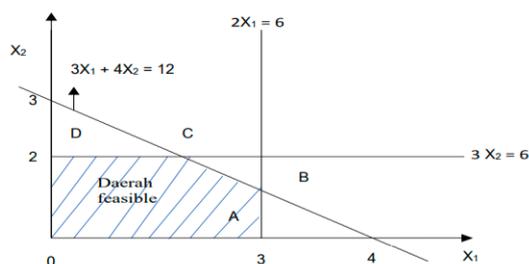
(Retnowati, 2018) menyatakan bahwa hubungan antara penggantian lapisan air dan kesuburan tanah telah ditunjukkan. Setelah penanaman, air yang digenangkan menjadi kotor dalam waktu tertentu dan mengandung zat residu yang dapat merusak tanaman jika dibiarkan. Lapisan air diganti untuk menggantikan air kotor dari genangan, aturan penggantian lapisan air berikut tercantum dalam KP-01:

- a. Disarankan untuk membuat jadwal penggantian lapisan air sesuai dengan persyaratan.
- b. Jika tidak ada jadwal, penggantian lapisan air sebaiknya dilakukan dua kali dengan volume masing-masing 50 mm. Dengan kata lain, air sebaiknya mengalir dengan tingkat aliran 3,3 mm per hari selama setengah penanaman dan dua bulan setelah trasplantasi.

2.2 Model Program Linier

Model pemrograman linier (*Linear Programming*) merupakan pendekatan untuk mengatasi alokasi sumber daya terbatas di antara berbagai aktivitas secara optimal. George B. Dantzig pertama kali mengenalkan metode simpleks pada tahun 1947 yang kemudian dikembangkan oleh para ahli lainnya. Simpleks menggunakan teknik perhitungan berulang atau iterasi, di mana titik-titik ekstrim dievaluasi melalui langkah-langkah iteratif untuk mencapai solusi optimal. Dasar dari solusi optimal metode simpleks adalah metode eliminasi Gauss Jordan. Penentuan solusi

optimal dilakukan secara bertahap melalui iterasi, dengan setiap langkah bergantung pada langkah sebelumnya (i-1) (Susdarwono, 2020).



Gambar 2.1 Daerah Penyelesaian Fungsi dengan Program Linier

Sumber: (Susdarwono, 2020)

Berikut adalah beberapa istilah yang umum digunakan dalam metode simpleks:

1. Tahap iterasi adalah proses perhitungan yang dilakukan berulang kali sampai nilai yang diinginkan dihasilkan. Nilai sebelumnya menentukan nilai berikutnya.
2. Variabel nonbasis adalah variabel yang nilainya selalu diatur menjadi nol.
3. Variabel yang tidak selalu memiliki nilai nol disebut variabel basis.
4. Nilai sumber daya pembatas yang tersedia dikenal sebagai solusi atau nilai kanan.
5. Dalam model matematik kendala, variabel pecahan dimasukkan untuk mengubah pertidaksamaan (\leq) menjadi persamaan ($=$) disebut variabel slack.
6. Variabel surplus adalah variabel yang diambil dari metode kendala untuk mengubah pertidaksamaan (\geq) menjadi persamaan ($=$).

Secara umum, bentuk matematis dari program linier terdiri dari fungsi tujuan untuk mencapai maksimum atau minimum dan fungsi pembatas untuk membatasi penggunaan sumber daya untuk mencapai kondisi optimum (Hutahaean et al., 2024):

1. Fungsi Tujuan

Maksimumkan/Minimumkan

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$$

2. Fungsi Pembatas/Kendala

$$a_{11}X_{11} + a_{12}X_{12} + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{11}X_{11} + a_{12}X_{12} + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

.....

$$a_{m1}X_{m1} + a_{m2}X_{m2} + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m$$

2.3 Model Risiko Gagal Lahan

Tujuan proses optimasi adalah untuk mencapai hasil yang ideal atau nilai efektif yang dapat dicapai. Dalam konteks irigasi, optimalisasi air irigasi adalah bagian yang sangat penting dari manajemen air irigasi (Hidayat, 2001). Selanjutnya dikatakan bahwa optimalisasi dapat dicapai ketika ada keseimbangan air antara kebutuhan air untuk irigasi dan jumlah air yang tersedia (Kurnia Hidayat et al., 2019). Mencapai optimasi harus mempertimbangkan kemungkinan gagal lahan, untuk pengoptimalan dengan mempertimbangkan risiko gagal lahan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{max} = \sum P_{ijT}, \dots, X_{ijT} - LFR_{ijT} \quad (2.40)$$

$$DR = \text{Kebutuhan Air} \times \text{Faktor } k_{rata-rata} \quad (2.41)$$

$$R = \frac{\text{Jumlah sukses pemberian air}}{\text{Jumlah periode tanam pengamatan}} \quad (2.42)$$

$$WFR = 1 - Re \quad (2.43)$$

$$\% \Phi = \frac{DR - Q\%}{Q\%} \times 100\% \quad (2.44)$$

di mana:

DR = kebutuhan air di pintu pengambilan dengan pengaruh faktor k

R = reabilitas

WFR = risiko gagal pemberian air

$\% \Phi$ = persentase indeks risiko gagal pemberian air

P_{max} = keuntungan maksimum dari produksi pertanian (Rp)

X_{ijT} = variabel keputusan

LFR_{ijT} = biaya penilaian risiko kegagalan lahan irigasi (Rp)

P_{ijT} = keuntungan dari produksi pertanian (Rp/ha)

i = jenis tanaman

j = jadwal tanam

T = musim tanam

$$LFR_{ijT} = \Phi \cdot WFR \cdot \left(1 - (R)^{\frac{DR}{Q_{80\%}}} \right) \cdot A \cdot P \quad (2.41)$$

$$\Phi = \frac{DR - Q_{80\%}}{Q_{80\%}} \text{ dan } WFR + R = 1 \quad (2.42)$$

di mana:

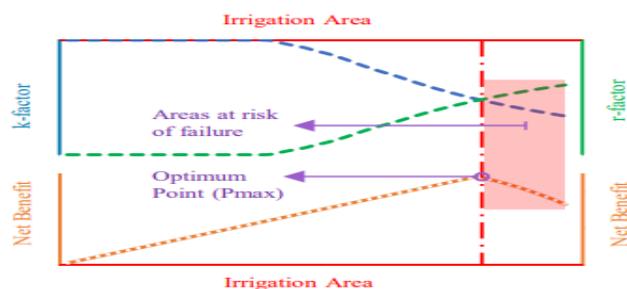
Φ (seniali 0-1) = indeks risiko kegagalan irigasi

WFR = risiko kegagalan air

R = reliabilitas

P = keuntungan per hektar (Rp/ha)

Penelitian ini menggunakan pendekatan dengan bantuan dua diagram grafik. Diagram pertama mengilustrasikan hubungan antara luas lahan, faktor k, dan risiko gagal lahan. Sementara itu, diagram kedua menunjukkan hubungan antara luas lahan dan *net benefit* (Hidayat et al., 2023). Secara skematis, model optimasi yang diinginkan dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.2 Skema Pemodelan Risiko Gagal Lahan

2.4 Evaluasi Hasil Optimasi

Optimasi adalah suatu proses untuk mencapai hasil yang ideal atau optimal (nilai efektif yang dapat dicapai). Optimasi dapat diartikan sebagai suatu bentuk mengoptimalkan ssesuatu hal yang sudah ada, ataupun merancang dan membuat sesuatu secara optimal. sebagaimana dikutip dari buras (1975) dan JP. Pantouw (1988) dalam (Salsabila, 2023) optimasi sebagai suatu sistem dapat dilakukan dengan empat cara, yaitu:

1. Aplikasi terhadap teknik analisis (*Linear Programming, Dynamic Programming*, dan lain-lain)
2. Teknik simulasi
3. Kombinasi teknik analisis dan teknik simulasi
4. Kombinasi *linear programming* dan *dynamic programming*

Metode optimasi yang akan diterapkan dalam penelitian ini melibatkan program linier dan risiko kegagalan lahan yang digabungkan dengan teknik simulasi. Pentingnya pola dan jadwal tanam dalam menentukan kebutuhan air irigasi terlihat dari fakta bahwa tanaman padi yang ditanam setelah palawija memerlukan lebih banyak air untuk pengolahan tanah dibandingkan dengan tanaman padi yang ditanam setelah tanaman padi sebelumnya. Faktor jadwal tanam juga berpengaruh pada evapotranspirasi tanaman padi. Optimalisasi pola dan jadwal tanam bertujuan untuk mencapai luas lahan optimal dalam daerah irigasi dengan minimalisasi risiko kegagalan lahan. Dengan mencapai luas optimal ini, petani dapat memperoleh keuntungan maksimal. Namun, mencapai pola dan jadwal tanam yang optimal memerlukan evaluasi dan pengoptimalan yang mempertimbangkan keseimbangan air antara ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi menggunakan model matematika program linear dan model risiko kegagalan lahan.