

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Drainase Perkotaan

Drainase merupakan sebuah sistem yang dibuat untuk menanggulangi persoalan kelebihan air yang berada di atas permukaan tanah. Kelebihan air dapat disebabkan intensitas hujan yang tinggi atau akibat durasi hujan yang tinggi. Drainase adalah lengkungan atau saluran air di permukaan atau di bawah tanah, baik yang terbentuk secara alami maupun dibuat oleh manusia (wikipedia,2014).

Bangunan sistem drainase terdiri dari saluran penerima (*interceptor drain*), saluran pengumpul (*collector drain*), saluran pembawa (*conveyor drain*), saluran induk (*main drain*) dan badan air penerima (*receiving water*). Di sepanjang sistem sering dijumpai bangunan lainnya, seperti gorong-gorong, siphon, pelimpah, bangunan terjun dan stasiun pompa (Suripin, 2004).

Persyaratan dalam perencanaan drainase adalah sebagai berikut :

1. Perencanaan drainase harus sedemikian rupa sehingga fungsi fasilitas drainase sebagai penampung, pembagi dan pembuang air sepenuhnya berdaya guna dan hasil guna.
2. Pemilihan dimensi dari fasilitas drainase harus mempertimbangkan faktor ekonomi dan faktor keamanan.

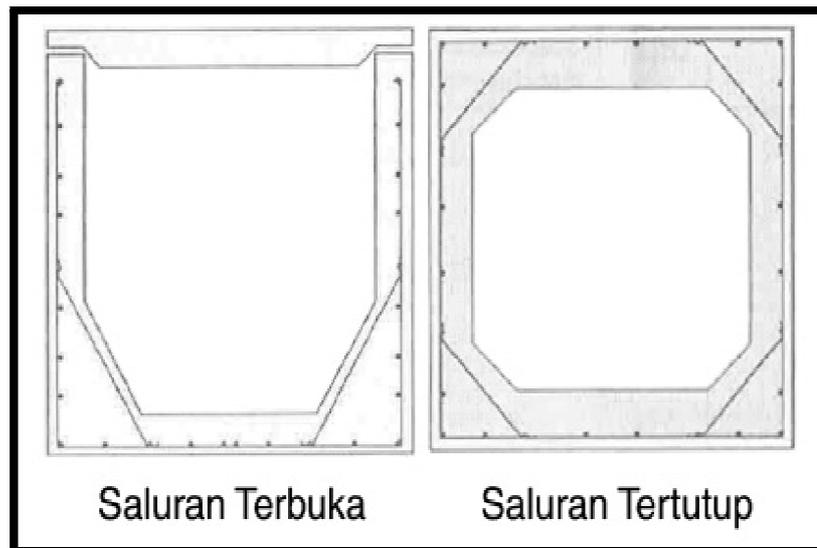
3. Perencanaan drainase harus mempertimbangkan segi kemudahan dan nilai ekonomis terhadap pemeliharaan sistem drainase tersebut.

Dalam merencanakan drainase permukaan jalan dilakukan perhitungan debit aliran (Q) perhitungan dimensi serta kemiringan selokan dan gorong-gorong, rumus-rumus, tabel, grafik serta contoh perhitungannya.

(SNI 03-3424 : *Tata Cara Perencanaan Drainase Permukaan Jalan*, 1994)

B. Saluran Drainase *Box Culvert*

Saluran *Box Culvert* adalah saluran gorong-gorong dari beton bertulang yang berbentuk kotak yang memiliki sambungan pada setiap segmennya sehingga bersifat kedap air. *Box Culvert* ini umumnya digunakan untuk saluran drainase. Ukuran yang besar bisa digunakan sebagai jembatan (wikipedia,2013).



Gambar 1. Saluran Box Culvert

Box Culvert sudah menjadi tren dalam berbagai pembangunan drainase di perkotaan karena mempunyai banyak keunggulan, diantaranya :

1. Lebih ringan dalam pemasangan (instal), karena ada 2 komponen yang terpisah, sehingga biaya alat install dapat ditekan.
2. Pemasangan lebih mudah dan lebih cepat.
3. Terdapat *Quick Lay Joint System* (plat besi join) yang membuat struktur akan lebih kokoh dan kuat terhadap kemungkinan adanya penurunan setempat dari pondasi.
4. Mudah dipindahkan dari satu titik ke titik lain.

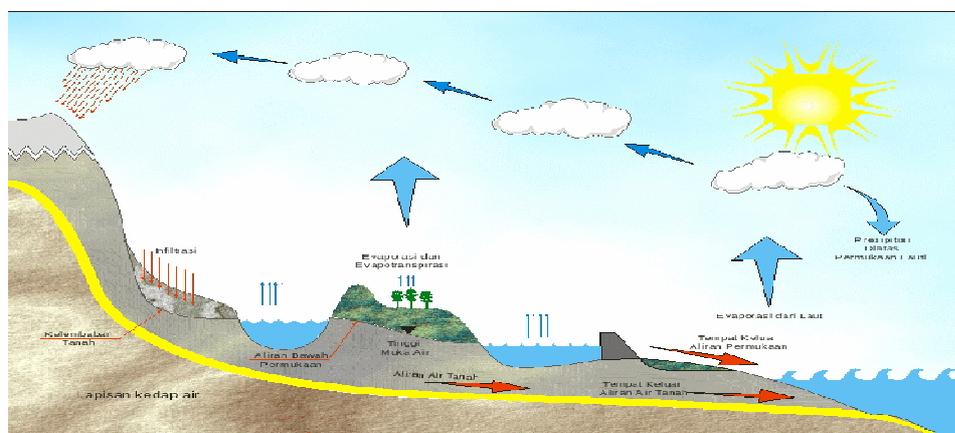
C. Hidrologi

Hidrologi (berasal dari Bahasa Yunani: hydros = air dan logos = ilmu, *Hydrologia*, "ilmu air") adalah cabang ilmu teknik sipil yang mempelajari pergerakan, distribusi, dan kualitas air di seluruh Bumi, termasuk siklus hidrologi dan sumber daya air.

Hidrologi adalah ilmu yang mempelajari tentang seluk beluk dan perjalanan air di permukaan bumi. Hidrologi dipelajari orang untuk memecahkan masalah-masalah yang berhubungan dengan keairan, seperti manajemen air, pengendalian banjir, dan perencanaan bangunan air. Hidrologi biasanya lebih diperuntukkan untuk masalah-masalah air di daratan. Artinya hidrologi biasanya tidak diperuntukkan untuk perhitungan yang ada hubungannya dengan air laut.

Siklus hidrologi adalah suatu rangkaian proses yang terjadi dengan air yang terdiri dari penguapan, presipitasi, infiltrasi dan pengaliran keluar (*out flow*). Penguapan terdiri dari evaporasi dan transpirasi. Uap yang dihasilkan mengalami kondensasi dan dipadatkan membentuk awan yang nantinya kembali menjadi air dan turun sebagai presipitasi. Sebelum tiba di permukaan bumi presipitasi tersebut sebagian langsung menguap ke udara, sebagian tertahan oleh tumbuh-tumbuhan (*intersepsi*) dan sebagian mencapai permukaan tanah.

Air yang sampai ke permukaan tanah sebagian akan berinfiltrasi dan sebagian lagi mengisi lekuk-lekuk permukaan tanah kemudian mengalir ke tempat yang lebih rendah (*runoff*), masuk ke sungai-sungai dan akhirnya ke laut. Dalam perjalanannya sebagian akan mengalami penguapan. Air yang masuk ke dalam tanah sebagian akan keluar lagi menuju sungai yang disebut dengan aliran intra (*interflow*). Sebagian akan turun dan masuk ke dalam air tanah yang sedikit demi sedikit dan masuk ke dalam sungai sebagai aliran bawah tanah (*groundwater flow*).



Gambar 2. Siklus Hidrologi

1. Daerah Aliran Sungai (DAS)

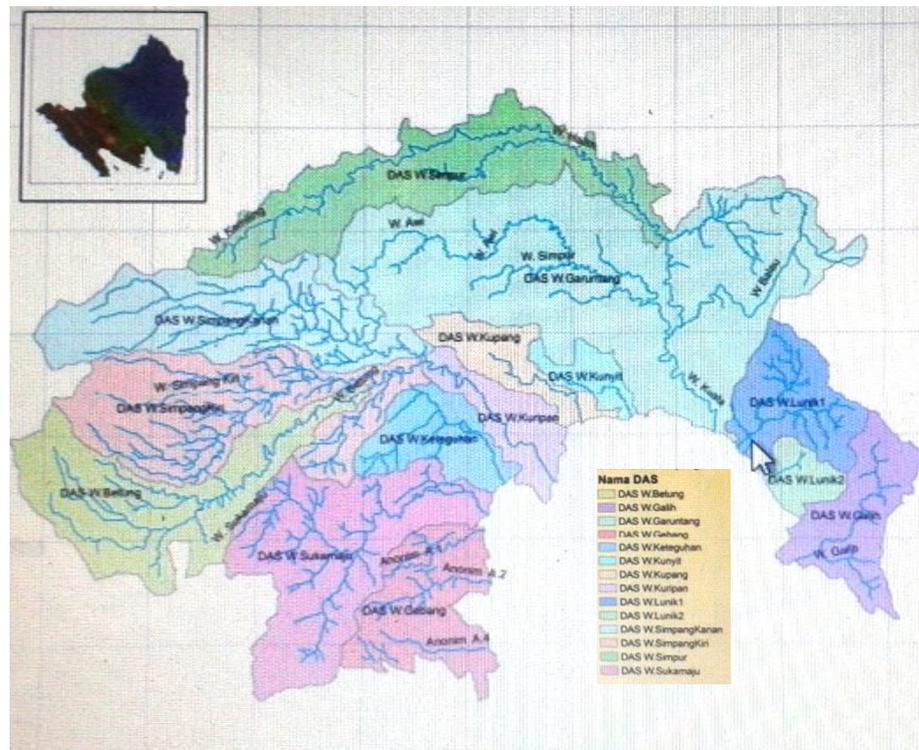
Menurut Triatmodjo (2008), DAS adalah daerah yang dibatasi oleh punggung-punggung gunung atau pegunungan dimana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. DAS ditentukan dengan menggunakan peta topografi yang dilengkapi dengan garis kontur. Limpasan akan bergerak dari titik kontur tertinggi menuju titik kontur yang lebih rendah dalam arah tegak lurus dengan garis kontur tersebut.

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 11a/PRT/M/2006 Provinsi Lampung terbagi menjadi 3 wilayah sungai (WS), yaitu WS Seputih-Sekampung, WS Mesuji-Tulang Bawang dan WS Semangka. Luas WS Seputih-Sekampung sebesar 14.637 km², dengan panjang seluruh sungai 1.975 km, serta 31 buah cabang sungai yang terbagi menjadi 4 DAS, yaitu DAS Seputih, DAS Sekampung, DAS Jepara-Kambas dan DAS Bandar Lampung-Kalianda.

Secara hidrologis Kota Bandar Lampung termasuk ke dalam WS Seputih-Sekampung, dengan salah satu DAS nya adalah DAS Bandar Lampung-Kalianda yang dilalui 2 sungai besar yaitu sungai Way Kuripan dan Sungai Way Kuala. Daerah hulu sungai berada di bagian barat dan daerah hilir sungai berada di wilayah selatan yaitu pada dataran pantai, sebagian besar sungai-sungai tersebut bermuara di Teluk Lampung.

DAS Bandar Lampung terbagi menjadi 14, yaitu Way Simpur, Way Garuntang, Way Simpang Kanan, Way simpang Kiri, Way Kuripan, Way Kupang, Way kunyit, Way Lunik 1, Way Lunik 2, Way galih, Way Keteguhan, Way Sukamaju dan Way Gebang. DAS Way Kuripan dan DAS Way Garuntang merupakan DAS terbesar di DAS Bandar Lampung.

DAS tersebut terbagi menjadi menjadi Sub DAS kecil, dengan 11 sungai berada di DAS Way Garuntang dan 4 di DAS sungai berada di DAS Way Kuripan, dengan luas total sebesar 168,877 km² dan panjang sungai keseluruhan 368,709 km. Daerah Antasari termasuk DAS Way Garuntang dengan Sub DAS nya adalah DAS Way Kuala.



Gambar 3. DAS Bandar Lampung

2. Presipitasi dan Hujan

Presipitasi didefinisikan sebagai air yang jatuh dari atmosfer ke permukaan bumi dengan intensitas dan jumlah tertentu serta dalam wujud air yang tertentu pula. Air yang jatuh dari atmosfer tersebut bisa saja berwujud hujan, salju, uap air, dan kabut. Karena semua wilayah Indonesia berada di sekitar garis lintang 0^0 , dapat dipastikan Indonesia akan mengalami iklim tropis, maka presipitasi yang paling sering muncul adalah dalam bentuk hujan, sehingga istilah presipitasi identik dengan hujan.

Hujan diukur di stasiun penakar curah hujan. Stasiun penakar curah hujan biasanya terdiri dari dua macam, yaitu pencatat hujan otomatis, dan stasiun pencatat hujan manual. Sedangkan stasiun pencatat curah hujan manual memerlukan tenaga manusia untuk mencatat curah hujan harian.

3. Hujan Rencana dan Debit Banjir Rencana

Dalam analisis hujan-aliran untuk memperkirakan debit banjir rencana diperlukan masukan hujan rencana ke dalam suatu sistem DAS. Hujan rencana tersebut dapat berupa hujan titik atau hidrograf hujan rencana yang merupakan distribusi hujan sebagai fungsi waktu selama hujan deras. Perencanaan bangunan air didasarkan pada debit banjir rencana yang diperoleh dari analisis hujan-aliran tersebut, yang berupa banjir rencana dengan periode ulang tertentu.

Menurut Triatmodjo (2008), debit rencana dapat dihitung dari kedalaman hujan titik dalam penggunaan metode rasional untuk menentukan debit puncak pada perencanaan drainase dan jembatan (gorong-gorong). Metode rasional ini digunakan apabila tangkapan air kecil.

4. Analisis Frekuensi

Menurut Sri Harto (1993), analisis frekuensi adalah suatu analisa data hidrologi dengan menggunakan statistika yang bertujuan untuk memprediksi suatu besaran hujan atau debit dengan masa ulang tertentu.

Menurut Triatmodjo (2008), dalam statistik dikenal beberapa parameter yang berkaitan dengan analisis data yang meliputi :

- a. Rata-rata

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i \dots\dots\dots(1)$$

- b. Simpangan baku

$$s = \sqrt{\left[\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2 \right]} \dots\dots\dots(2)$$

- c. Koefisien skewness

$$C_s = \frac{n \sum (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \dots\dots\dots(3)$$

- d. Koefisien kurtosis

$$C_k = \frac{n^2 \sum (X_i - \bar{X})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4} \dots\dots\dots(4)$$

e. Koefisien variasi

$$Cv = \frac{s}{\bar{x}} \dots\dots\dots(5)$$

Dalam ilmu statistik dikenal beberapa macam distribusi yang umum digunakan dalam bidang hidrologi. Distribusi tersebut adalah sebagai berikut:

a. Distribusi Normal

Distribusi Normal adalah simetris terhadap sumbu vertikal dan berbentuk lonceng yang disebut juga distribusi *gauss*. Sri Harto (1993), memberikan sifat-sifat distribusi normal, yaitu nilai koefisien kemencengan (*skewness*) $Cs \approx 0$ dan nilai koefisien kurtosis $Ck \approx 3$.

Rumus yang umum digunakan adalah sebagai berikut :

$$X_T = \bar{X} + K_T \cdot s \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

X_T = perkiraan nilai yang diharapkan periode T-tahun

\bar{X} = nilai rata-rata sampel

s = deviasi standar

K_T = Faktor frekuensi

b. Distribusi Log Normal

Menurut Singh (1992), jika variabel acak $y = \log x$ terdistribusi secara normal, maka x dikatakan mengikuti distribusi Log Normal, dalam model matematik dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Y_T = \bar{Y} + K_T S \quad \dots\dots\dots(7)$$

dimana :

Y_T = perkiraan nilai yang terjadi pada T-tahunan

\bar{Y} = nilai rata-rata sampel

K_T = faktor frekuensi

Ciri khas statistik distribusi Log Normal adalah nilai koefisien *skewness* sama dengan tiga kali nilai koefisien variasi (Cv) atau bertanda positif.

c. Distribusi Gumbel

Rumus umum yang digunakan dalam metode Gumbel adalah sebagai berikut :

$$X = \bar{X} + s K \quad \dots\dots\dots(8)$$

dimana :

\bar{X} = nilai rata-rata

s = standar deviasi

K = faktor frekuensi

Menurut Wilson (1972), ciri khas distribusi Gumbel adalah nilai *skewness* sama dengan 1,396 dan kurtosis (Ck) = 5,4002.

d. Distribusi Log Pearson III

Apabila tidak memenuhi ketiga distribusi di atas maka data tersebut dapat dihitung menggunakan distribusi Log Pearson III. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut :

- 1) Ubah data ke bentuk logaritmik, $X = \log X$

2) Hitung harga rata-rata :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum \log X_i \dots\dots\dots(9)$$

3) Hitung simpangan baku :

$$s = \sqrt{\left[\frac{1}{n-1} \sum (\log X_i - \log \bar{X})^2 \right]} \dots\dots\dots(10)$$

4) Hitung Koefisien kemencengan :

$$C_s = \frac{n \sum (\log X_i - \log \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \dots\dots\dots(11)$$

5) Mencari nilai K berdasarkan nilai C_s .

6) Hitung logaritma hujan dengan periode ulang T :

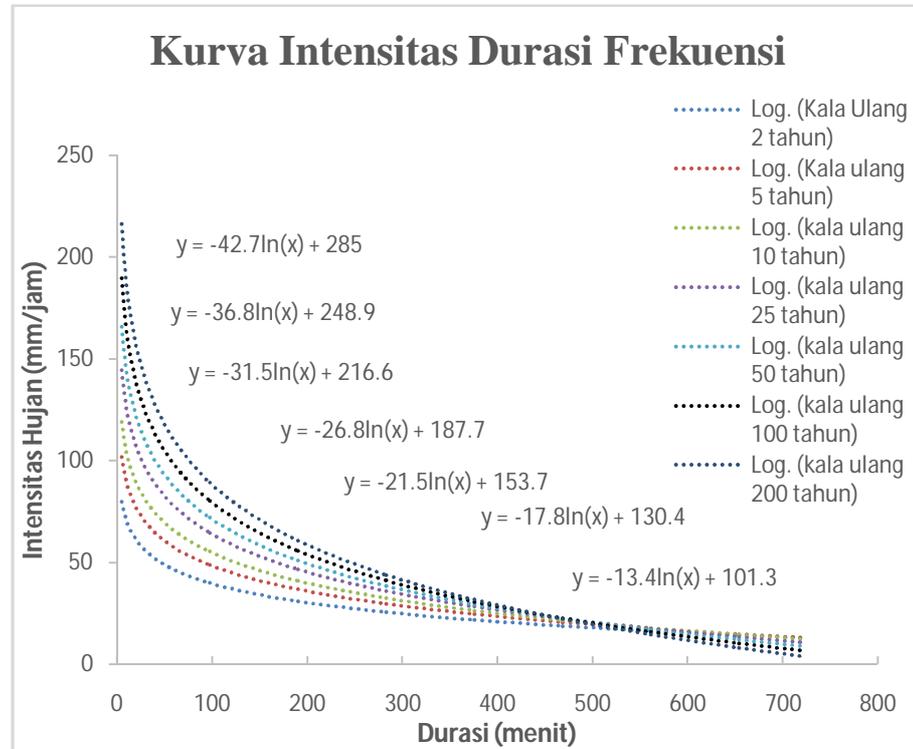
$$\text{Log } X_T = \log \bar{X} + K s \dots\dots\dots(12)$$

5. Intensitas Durasi Frekuensi (IDF)

Analisa Intensitas Durasi Frekuensi (IDF) adalah salah satu metode untuk memperkirakan debit aliran puncak berdasarkan hujan titik. Data yang digunakan adalah data hujan dengan intensitas tinggi yang terjadi dalam waktu singkat, seperti hujan 5 menitan, 10 menitan, 15 menitan sampai 120 menitan atau lebih. Untuk itu diperlukan data hujan dari stasiun pencatat hujan otomatis.

Menurut Triatmodjo (2008), Analisa IDF dapat dilakukan untuk memperkirakan debit puncak di daerah tangkapan yang kecil, hujan deras dengan durasi singkat (intensitas hujan dengan durasi singkat adalah sangat tinggi) yang jatuh di berbagai titik pada seluruh daerah

tangkapan hujan dapat terkonsentrasi di titik kontrol yang ditinjau dalam waktu yang bersamaan yang dapat menghasilkan debit puncak.



Gambar 4. Kurva IDF

Mononob mengusulkan persamaan berikut untuk menurunkan kurva IDF sebagai berikut :

$$I_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(13)$$

dengan :

I_t = Intensitas curah hujan untuk lama hujan t (mm/jam)

t = Lamanya curah hujan (jam)

R_{24} = Curah hujan maksimum selama 24 jam (mm)

6. Waktu Konsentrasi

Menurut Suripin (2004), waktu konsentrasi adalah waktu yang diperlukan oleh air hujan yang jatuh untuk mengalir dari titik terjauh sampai ke tempat keluaran DAS (titik kontrol) setelah tanah menjadi jenuh. Berikut rumus yang sering digunakan untuk memperkirakan waktu konsentrasi yang dikembangkan oleh Kirpich (1940) :

$$t_c = \left[\frac{0,87 \times L^2}{1000 \times s} \right]^{0,385} \dots\dots\dots(14)$$

dimana :

- tc = waktu konsentrasi (jam)
- L = panjang saluran (Km)
- s = kemiringan saluran

7. Metode Rasional

Menurut Soewarno (2000) metode rasional dapat dipandang sebagai salah satu cara praktis dan mudah. Selain itu, penerapannya di Indonesia masih memberikan peluang untuk dikembangkan.

Beberapa asumsi dasar untuk menggunakan metode rasional adalah:

- a. Curah hujan terjadi dengan intensitas yang tetap dalam jangka waktu tertentu, setidaknya dengan waktu konsentrasi
- b. Limpasan langsung mencapai maksimum ketika durasi hujan dengan intensitas tetap sama dengan waktu konsentrasi

- c. Koefisien *run off* dianggap tetap selama durasi hujan
- d. Luas DAS tidak berubah selama durasi hujan.

Menurut Triatmodjo (2008) beberapa parameter hidrologi yang diperhitungkan adalah intensitas hujan, durasi hujan, frekuensi hujan, luas DAS, abtraksi (kehilangan air akibat evaporasi, intersepsi, infiltrasi dan tampungan permukaan) dan konsentrasi aliran. Metode aliran didasarkan pada persamaan berikut :

$$Q = 0.2778 C I A \dots\dots\dots(15)$$

dimana :

- Q = Debit banjir maksimum (m^3/dtk)
- C = koefisien pengaliran
- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- A = Luas daerah pengaliran (km^2)

Koefisien limpasan merupakan suatu nilai yang menunjukkan kemampuan air melimpas berdasarkan bahan penutup tanah yang terdapat pada suatu wilayah. Perbedaannya berdasarkan bahan penutup tanah yang terdapat pada suatu wilayah. Penutup tanah yang sulit menyerap air akan menyebabkan limpasan yang besar begitupun sebaliknya.

Untuk daerah yang memiliki koefisien yang bermacam-macam maka akan diambil rata-rata dari koefisien dikalikan luas wilayahnya sehingga dalam pemodelan hanya dipakai satu angka yang mewakili.

Berikut tabel beberapa nilai-nilai koefisien limpasan :

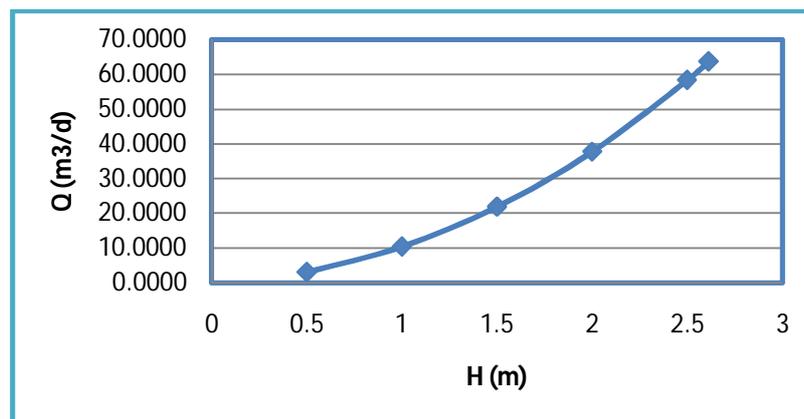
Tabel 1. Nilai koefisien Limpasan (C)

No	Tipe Aliran	C
1	Rerumputan	
	Tanah pasir, datar, 2%	0,50 - 0,10
	Tanah pasir, sedang, 2-7%	0,10 - 0,15
	Tanah pasir, curam, 7%	0,15 - 0,2
	Tanah gemuk, datar, 2%	0,13 - 0,17
	Tanah gemuk, sedang, 2 - 7%	0,18 - 0,22
	Tanah gemuk, curam, 7%	0,25 - 0,35
2	Perdagangan	
	Daerah kota lama	0,75 - 0,95
	Daerah pinggiran	0,50 - 0,70
3	Perumahan	
	Daerah single family	0,30 - 0,50
	Multi unit terpisah	0,40 - 0,60
	Multi unit tertutup	0,60 - 0,75
	Sub-urban	0,25 - 0,40
	Daerah apartemen	0,50 - 0,70
4	Industri	
	Daerah ringan	0,50 - 0,80
	Daerah berat	0,60 - 0,90
5	Taman, kuburan	0,10 - 0,25
6	Tempat bermain	0,20 - 0,35
7	Halaman kereta api	0,20 - 0,40
8	Daerah tidak dikerjakan	0,10 - 0,30
9	Jalan	
	Beraspal	0,70 - 0,95
	Beton	0,80 - 0,95
	Batu bata/ paving	0,70 - 0,85
10	Atap	0,75 - 0,95

Sumber : Hidrologi Terapan (Triatmodjo,2008)

8. Lengkung Aliran (*Discharge Rating Curve*)

Lengkung debit (*Discharge Rating Curve*) adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara tinggi muka air dan debit pada lokasi penampang sungai tertentu. Debit sungai adalah volume air yang melalui penampang basah sungai dalam satuan waktu tertentu.



Gambar 5. Kurva Lengkung Aliran

Kurva lengkung aliran biasanya dibuat dengan cara mengukur langsung debit aliran dan tinggi muka air yang terjadi di sungai yang ditinjau. Hal ini juga dilakukan dalam proses kalibrasi model terhadap kondisi saluran yang sebenarnya.

Lengkung aliran digunakan untuk mencari debit aliran maksimum yang dapat ditampung oleh saluran. Kurva lengkung aliran akan dibuat berdasarkan tren yang terjadi untuk debit-debit yang dimasukkan ke dalam model, kemudian dari kurva tersebut ditentukan nilai tinggi alirannya sehingga akan diperoleh debit aliran maksimum yang dapat ditampung pada saluran tersebut.

D. Hidrolika

Hidrolika adalah bagian dari hidromekanika (*hydro mechanics*) yang berhubungan dengan gerak air atau mekanika aliran. Analisis hidrolika mencakup hukum ketetapan massa, hukum ketetapan energi dan hukum ketetapan momentum yang selanjutnya akan dinyatakan dalam persamaan

kontinuitas, persamaan energi dan persamaan momentum. Pada aliran saluran terbuka, terdapat permukaan air bebas yang berhubungan dengan atmosfer sedangkan pada aliran saluran tertutup tidak ada karena air mengisi semua penampang saluran.

1. Penghantar Aliran (*Flow Conveyance*)

Air mengalir dari hulu ke hilir (kecuali ada gaya yang menyebabkan aliran ke arah sebaliknya) hingga mencapai suatu elevasi permukaan air tertentu, misalnya permukaan air di danau atau permukaan air di laut. Kecenderungan ini ditunjukkan oleh aliran di saluran alam yaitu sungai.

Perjalanan air dapat juga melalui bangunan-bangunan air yang dibuat oleh manusia, seperti saluran irigasi, pipa, gorong - gorong (*culvert*), dan saluran buatan yang lain atau kanal (*canal*). Walaupun pada umumnya perencanaan saluran ditujukan untuk karakteristik saluran buatan, namun konsep hidroliknya dapat juga diterapkan seperti pada saluran alam. Apabila saluran terbuka terhadap atmosfer, seperti sungai, kanal, gorong-gorong, maka alirannya disebut aliran saluran terbuka (*open channel flow*) atau aliran permukaan bebas (*free surface flow*).

2. Elemen Geometri

Dalam analisis hidrolika saluran terbuka, data-data geometri sangat dibutuhkan karena merupakan bagian pokok dalam analisis tersebut. Elemen geometri mencakup luas penampang (*area*), lebar permukaan (*top width*), keliling basah (*wetted perimeter*) dan jari-jari hidrolik

(*hydraulic radius*). Yang dimaksud dengan penampang saluran (*channel cross section*) adalah penampang yang diambil tegak lurus arah aliran, sedang penampang yang diambil vertikal disebut penampang vertikal (*vertical section*).

Saluran buatan biasanya direncanakan dengan penampang beraturan menurut bentuk geometri yang biasa digunakan, yaitu berbentuk trapesium, persegi panjang, segi tiga, lingkaran dan parabola. Keliling basah suatu penampang aliran didefinisikan sebagai bagian/porsi dari parameter penampang aliran yang bersentuhan (kontak) dengan batas benda padat yaitu dasar dan/atau dinding saluran, dalam hal aliran di dalam saluran terbuka batas tersebut adalah dasar dan dinding/tebing saluran.

Definisi dari jari jari hidrolik (R) adalah luas penampang dibagi keliling basah, oleh karena itu mempunyai satuan panjang. Kedalaman hidrolik dari suatu penampang aliran adalah luas penampang dibagi lebar permukaan.

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots(16)$$

dimana :

R = Jari-jari hidrolik (m)

A = Luas penampang Basah (m²)

P = Keliling basah (m)

Faktor penampang untuk perhitungan aliran kritis adalah perkalian dari luas penampang aliran (A) dan akar dari kedalaman hidrolis (\sqrt{D}) disimbolkan sebagai Z . Faktor penampang untuk perhitungan aliran seragam adalah perkalian dari luas penampang aliran dan pangkat $2/3$ dari jari-jari hidrolis, $AR^{2/3}$. berikut persamaannya :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \dots\dots\dots (17)$$

dimana :

V = kecepatan aliran (mm/det)

R = jari-jari hidrolis (m)

n = koefisien manning

s = kemiringan saluran

3. Debit Aliran (*Discharge*)

Debit aliran adalah volume air yang mengalir melalui suatu penampang tiap satuan waktu dan simbol/notasi yang digunakan adalah Q .

$$Q = A \cdot V \dots\dots\dots(18)$$

dimana :

Q = debit aliran (m^3/s)

A = luas penampang (m^2)

V = kecepatan (m/s)

Hukum ketetapan massa pada suatu aliran diantara dua penampang berlaku:

$$m_1 = m_2$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

Untuk kerapatan tetap, $\rho_1 = \rho_2$, maka akan didapatkan persamaan:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = Q \quad \dots\dots\dots(20)$$

Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa dalam suatu aliran, diantara dua penampangnya berlaku $Q_1 = Q_2$, dan disebut sebagai persamaan kontinuitas.

4. Kecepatan Aliran (*Velocity*)

Kecepatan aliran (v) dari suatu penampang aliran tidak sama di seluruh penampang aliran, tetapi bervariasi menurut tempatnya. Apabila cairan bersentuhan dengan batasnya (di dasar dan dinding saluran) kecepatan alirannya adalah nol. Dalam perhitungan biasanya digunakan harga rata-rata dari kecepatan di suatu penampang aliran.

$$V = \frac{Q}{A} \quad \dots\dots\dots(21)$$

Dimana :

V = Kecepatan rata-rata aliran (m/s)

Q = Debit aliran (m³/s)

A = Luas penampang aliran (m²)

5. Kriteria Aliran

Beberapa kriteria aliran yang tercakup dalam kinematika aliran diantaranya adalah aliran mantap (*steady flow*), aliran tak mantap (*unsteady flow*), aliran seragam (*uniform flow*) dan aliran tidak seragam.

Aliran dikatakan sebagai aliran mantap (*steady flow*) apabila variabel dari aliran (seperti kecepatan V , tekanan p , rapat massa ρ , tampang aliran A , debit Q dan sebagainya) di sembarang titik pada zat cair tidak berubah dengan waktu. Keadaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk matematis berikut :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0; \frac{\partial P}{\partial t} = 0; \frac{\partial h}{\partial t} = 0; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0; \frac{\partial A}{\partial t} = 0.$$

Sebaliknya apabila variabel-variabel dari aliran air berubah menurut waktu disebut sebagai aliran tak mantap (*unsteady flow*), sehingga :

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial h}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial A}{\partial t} \neq 0.$$

Aliran seragam (*uniform flow*) merupakan jenis aliran yang lain. Kata “seragam” menunjukkan bahwa kecepatan aliran di sepanjang saluran adalah tetap, dalam hal ini kecepatan aliran tidak tergantung pada tempat atau tidak berubah menurut tempatnya, $\frac{\partial v}{\partial s} = 0$. Sedangkan apabila kecepatan aliran berubah terhadap tempat atau posisinya maka disebut sebagai aliran tidak seragam, $\frac{\partial v}{\partial s} \neq 0$. Kombinasi dari aliran seragam dan aliran tetap disebut sebagai aliran beraturan.

Aliran tidak seragam dapat dibagi menjadi aliran berubah lambat laun (*gradually varied flow*) dan aliran berubah dengan cepat (*rapidly varied flow*). Aliran disebut berubah lambat laun apabila perubahan variabel-variabel aliran seperti kecepatan, rapat massa, kedalaman, lebar penampang, debit dan sebagainya terjadi secara lambat laun dalam jarak yang panjang, sedangkan aliran disebut berubah dengan cepat apabila perubahan perubahan variabel aliran tersebut terjadi pada jarak yang pendek.

6. Sifat Aliran

Aliran laminar adalah suatu tipe aliran yang ditunjukkan oleh gerak partikel-partikel cairan yang beraturan menurut garis-garis arusnya yang halus dan sejajar. Apabila zat warna diinjeksikan pada suatu titik dalam aliran, maka zat warna tersebut akan mengalir secara teratur seperti benang tanpa terjadi difusi dan penyebaran.

Sebaliknya pada aliran turbulen, partikel-partikel zat cair bergerak tidak teratur dan garis lintasannya saling berpotongan. Zat warna yang dimasukkan pada suatu titik dalam aliran akan terdifusi cepat ke seluruh aliran. Karakteristik aliran turbulen ditunjukkan oleh terbentuknya pusaran-pusaran dalam aliran yang menghasilkan pencampuran terus menerus antara partikel-partikel cairan di seluruh penampang aliran. Untuk membedakan aliran apakah turbulen atau laminar, digunakan Angka Reynold (*Reynolds Number*).

Percobaan yang dilakukan pada tahun 1884 oleh Osborn Reynolds dapat menunjukkan sifat-sifat aliran laminar dan turbulen. Peralatan yang digunakan dalam percobaan tersebut terdiri dari pipa kaca yang diatur oleh sebuah katup sehingga dapat melewatkan air dengan berbagai kecepatan. Melalui pipa kecil yang dihubungkan dengan pipa kaca tersebut dialirkan zat warna.

Oleh Reynolds ditunjukkan bahwa untuk kecepatan aliran yang kecil di dalam pipa kaca, zat warna akan mengalir dalam satu garis lurus yang sejajar dengan sumbu pipa. Apabila katup dibuka sedikit demi sedikit sehingga kecepatan akan bertambah besar, garis zat warna mulai bergelombang yang akhirnya pecah dan menyebar pada seluruh aliran di dalam pipa. Kecepatan pada saat pecah ini adalah kecepatan kritik.

Angka Reynold pada percobaan ini dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_e = \frac{V}{\frac{\mu}{\rho D}} = \frac{\rho D V}{\mu} \dots\dots\dots(22)$$

atau

$$R_e = \frac{D V}{\nu} \dots\dots\dots(23)$$

Untuk penampang yang tak bundar, perbandingan luas penampang terhadap keliling basah, disebut jari-jari hidraulik R (dalam m), sehingga :

$$Re = \frac{(4R)V}{\nu} \dots\dots\dots(24)$$

Dimana : Re = Angka Reynolds

V = Kecepatan rata-rata (m/s)

R = Jari-jari hidrolik (m)

ν = Viskositas kinematis, tersedia dalam tabel sifat-sifat cairan (m^2/s)

ρ = Rapat massa fluida (kg/m^3)

D = Garis tengah pipa (m)

μ = Kekentalan mutlak (Pa dtk)

Menurut hasil percobaan yang dilakukan oleh Reynold, apabila angka Reynold kurang dari 2000, aliran biasanya merupakan aliran laminar. Apabila angka Reynold lebih besar dari 4000, aliran biasanya adalah turbulen. Sedangkan apabila berkisar antara 2000 dan 4000 aliran dapat laminar atau turbulen tergantung pada faktor-faktor lain yang mempengaruhi.

Dengan demikian angka Reynold untuk aliran laminar dan turbulen yang terdapat pada saluran di alam tentu akan menunjukkan nilai yang lebih kecil karena faktor yang mempengaruhi aliran lebih kompleks sehingga partikel zat cair lebih mudah terdifusi.

7. Tipe Aliran

Efek dari gaya gravitasi pada suatu aliran ditunjukkan dalam perbandingan atau rasio antara gaya inersia dan gaya gravitasi. Rasio antara gaya-gaya tersebut dinyatakan dalam angka Froude, yaitu:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \dots\dots\dots(26)$$

Dimana :

Fr = Angka Froude

V = Kecepatan rata-rata aliran (m/s)

g = Gaya gravitasi (m/s²)

L = Panjang karakteristik (m)

Dalam aliran saluran terbuka panjang karakteristik disamakan dengan kedalaman hidrolis (D). Dengan demikian untuk aliran saluran terbuka angka Froude adalah:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \dots\dots\dots(27)$$

Apabila angka Fr adalah sama dengan 1, maka :

$$v = \sqrt{g \cdot D} \dots\dots\dots(28)$$

Dimana $v = \sqrt{g \cdot D}$ adalah kecepatan rambat gelombang (*celerity*), dari gelombang gravitasi yang terjadi dalam aliran dangkal, dalam hal ini aliran disebut dalam kondisi aliran kritis (*critical flow*).

Apabila harga Fr kurang dari 1, tipe aliran tersebut adalah aliran sub-kritis (*subcritical flow*), dalam kondisi ini gaya gravitasi memegang peran lebih besar, dan kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan rambat gelombang dan hal ini ditunjukkan dengan alirannya yang tenang.

Sebaliknya apabila harga Fr lebih dari 1, tipe alirannya adalah aliran super kritis (*supercritical flow*), dalam hal ini gaya-gaya inersia menjadi dominan, jadi aliran mempunyai kecepatan besar, kecepatan aliran lebih besar daripada kecepatan rambat gelombang yang ditandai dengan alirannya yang deras.

8. Kemiringan Kritik Aliran

Menurut Triatmodjo (2006), kemiringan dasar saluran yang diperlukan untuk menghasilkan aliran seragam di dalam saluran pada kedalaman kritik disebut dengan kemiringan kritik I_c . Apabila kecepatan aliran pada kedalaman kritik seperti pada persamaan (28), sehingga kemiringan kritik menjadi :

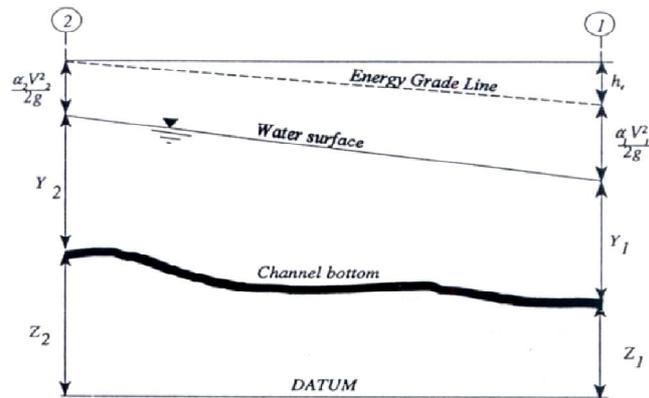
$$I_c = \frac{g D n^2}{R^{4/3}} \dots\dots\dots(29)$$

dimana :

- I_c = kemiringan kritik
- g = grafitasi (m^2/s)
- D = kedalaman hidrolik (m)
- R = jari-jari hidrolik (m)

Apabila aliran seragam terjadi pada saluran dengan kemiringn dasar lebih kecil dari kemiringn kritis ($I_o < I_c$), maka aliran adalah sub kritis. Apabila kemiringan dasar lebih besar dari kemiringan kritis ($I_o > I_c$), maka aliran adalah super kritis.

9. Energi Dalam Saluran Terbuka



Gambar 6. Diagram Garis Energi

Jumlah tinggi energi pada penampang di hulu akan sama dengan jumlah tinggi energi pada penampang hilir, hal ini dinyatakan dengan persamaan Bernoulli :

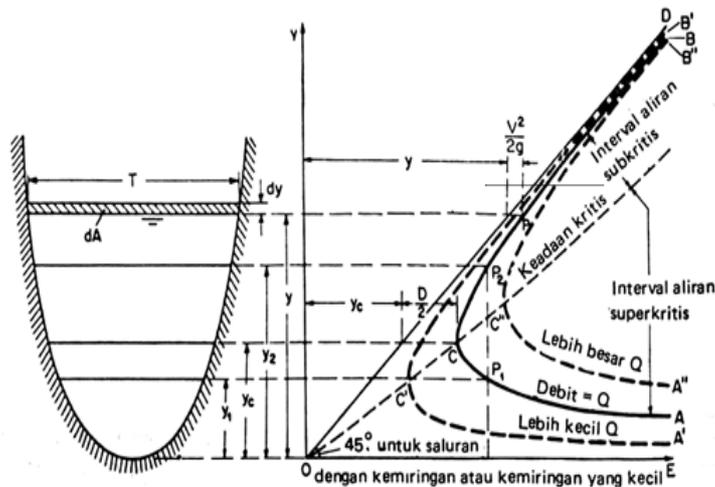
$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \dots \dots \dots (30)$$

Jika $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ dan $h_f = 0$ maka persamaan di atas menjadi :

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \text{konstan} \dots \dots \dots (31)$$

Untuk saluran dengan kemiringan kecil dan $\alpha = 1$, energi spesifik adalah jumlah kedalaman air ditambah tinggi kecepatan, atau:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{atau} \quad E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \dots \dots \dots (32)$$



Gambar 7. Kurva Energi Spesifik Dalam Saluran Terbuka

E. Program HEC-RAS

Menurut Sitepu (2010) HEC-RAS adalah suatu sistem *software* gabungan yang dirancang untuk penggunaan yang interaktif di lingkungan. Sistem ini terdiri atas *Graphical User Interface* (GUI), komponen-komponen analisis hidrolis, kemampuan penyimpanan data, manajemen dan grafik. pada dasarnya HEC-RAS berisi tiga komponen analisis hidrolis satu dimensi, yaitu :

1. Perhitungan profil permukaan air aliran tunak (*steady flow*).
2. Simulasi aliran tak tunak (*unsteady flow*).
3. Perhitungan *Sediment Transport*.

Hitungan hidrolika aliran pada dasarnya adalah mencari kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang alu. Hitungan hidraulika aliran di dalam HEC-RAS dilakukan dengan membagi aliran ke dalam dua kategori yaitu aliran permanen dan aliran tak permanen.

Untuk aliran permanen (*steady flow analysis*), HEC-RAS memakai persamaan energi kecuali di tempat yang kedalaman alirannya melewati kedalaman kritis. Di tempat terjadi loncat air, pertemuan alur dan air dangkal melalui jembatan, HEC-RAS memakai persamaan kekekalan momentum. Di tempat terjadi terjunan, aliran peluap dan aliran melalui bendung HEC-RAS memakai persamaan empiris.

Untuk aliran tak permanen (*Usteady flow analysis*), HEC-RAS memakai persamaan kekekalan massa dan persamaan momentum. Kedua persamaan dituliskan dalam bentuk persamaan differensial parsial, kemudian diselesaikan dengan metode pendekatan beda hingga (*finite difference approximation*).

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan model dengan keadaan sebenarnya sehingga hasilnya dapat dipertanggungjawabkan. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pengukuran langsung di lapangan untuk mencari nilai kecepatan aliran dan tinggi aliran di beberapa titik, sedikitnya tiga titik yaitu di hulu, hilir dan di tengah saluran atau yang mewakili.
2. Dari hasil pengukuran yang diperoleh maka dicari nilai debitnya.

3. Nilai debit tersebut dimasukkan ke dalam model saluran yang telah dibuat pada program HEC-RAS.
4. Memasukkan nilai koefisien *manning* dengan metode coba-coba sampai tinggi permukaan pada model sama dengan tinggi air pada pengukuran di lapangan.
5. Mengambil nilai rata-rata koefisien *manning* yang diperoleh dari beberapa titik yang dilakukan kalibrasi.
6. Koefisien *manning* rata-rata yang didapat akan dipakai pada saat pemodelan saluran.

Adapun langkah-langkah dalam menjalankan program ini secara umum dapat dibagi menjadi tiga, yaitu menggambar penampang saluran, input data hidrologi dan input data hidrolika. Input data hidrologi untuk program HEC-RAS adalah data debit, dalam hal ini adalah debit rancangan karena di data didapat dari perhitungan berdasarkan data hujan.

Sedangkan untuk data hidroliknya adalah jenis aliran (*steady* atau *unsteady*), Geometri saluran yang terdiri dari alur, tampang panjang dan lintang, kekasaran dasar (koefisien *manning*), serta kehilangan energi di tempat perubahan saluran (koefisien ekspansi dan kontraksi). HEC-RAS juga membutuhkan geometri struktur hidrolik yang ada di sepanjang saluran misalnya jembatan, pintu air, bendung, peluap dan sejenisnya.

HEC-RAS menampilkan hasil hitungan dalam bentuk tabel dan grafik. Presentasi dalam bentuk grafik dipakai untuk menampilkan tampang lintang dari suatu *River Reach* tampang panjang (profil muka air sepanjang alur),

kurva ukur debit, gambar perspektif alur atau hidrograf untuk perhitungan aliran tak permanen. Presentasi dalam bentuk tabel dipakai untuk menampilkan hasil rinci berupa angka variabel di lokasi atau titik tertentu atau laporan ringkas proses hitungan seperti kesalahan dan peringatan.