



BAB III

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Umum

Metoda dan analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metoda *Corps of Engineers-CBR (California Bearing Ratio)*, metoda LCN (*Load Classification Number*), metoda FAA (*Federal Aviation Administration*), Ketiga metoda ini sudah diakui oleh ICAO (*International Civil Aviation Organization*) walaupun belum ditentukan metoda standar dalam penentuan tebal lapis perkerasan landasan pacu.

ICAO (*International Civil Aviation Organization*) atau organisasi penerbangan sipil internasional merupakan suatu badan khusus PBB yang menangani masalah penerbangan. ICAO mengeluarkan dokumen yang paling penting yang dipakai oleh perencana dan perancang bandar udara, yaitu *Aerodromes* dan Lampiran 14 dari Perjanjian Penerbangan Sipil Internasional (12). Lampiran 14 berisi standar-standar rancangan internasional dan pelaksanaan-pelaksanaan yang dianjurkan yang cocok hampir untuk seluruh bandar udara yang melayani perdangan udara internasional. Sebagai tambahan terhadap adanya Lampiran 14, ICAO juga mengeluarkan keterangan teknis yang lengkap yang berhubungan dengan transportasi udara internasional.

3.2. Metoda *Corps of Engineers – CBR (California Bearing Ratio)*

Metoda ini dipakai pertama kali oleh *California Division of Highway*, Bina Marga negara bagian California di Amerika pada tahun 1928. Metoda ini ditemukan oleh O.J. Porter. Keunggulan dari metoda ini adalah cepat dan

sederhana. Imam Santoso, Bambang (2000) mengatakan bahwa CBR adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan uji terhadap beban standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. pengujian CBR pada masing-masing lapisan perkerasan adalah untuk mengetahui kepampatan lapisan tersebut yang dinyatakan dalam persentase.

Basuki, Heru (1984) mengatakan bahwa tes CBR menyatakan indeks kuat geser tanah. Pada dasarnya tes dilakukan dengan memampatkan tanah seberat 4,5 kg dalam cetakan silinder 152 mm dan menempatkan beban di atas contoh tanah yang dipampatkan tadi. Harga CBR contoh tanah adalah daya tahan tanah terhadap penetrasi dibandingkan dengan daya tahan batu pecah standar terhadap pembebanan yang sama. maka CBR 50 berarti tekanan yang dibutuhkan torak untuk berpenetrasi terhadap contoh tanah dengan kedalaman tertentu adalah setengahnya apabila torak berpenetrasi pada batu pecah standar dengan jarak yang sama.

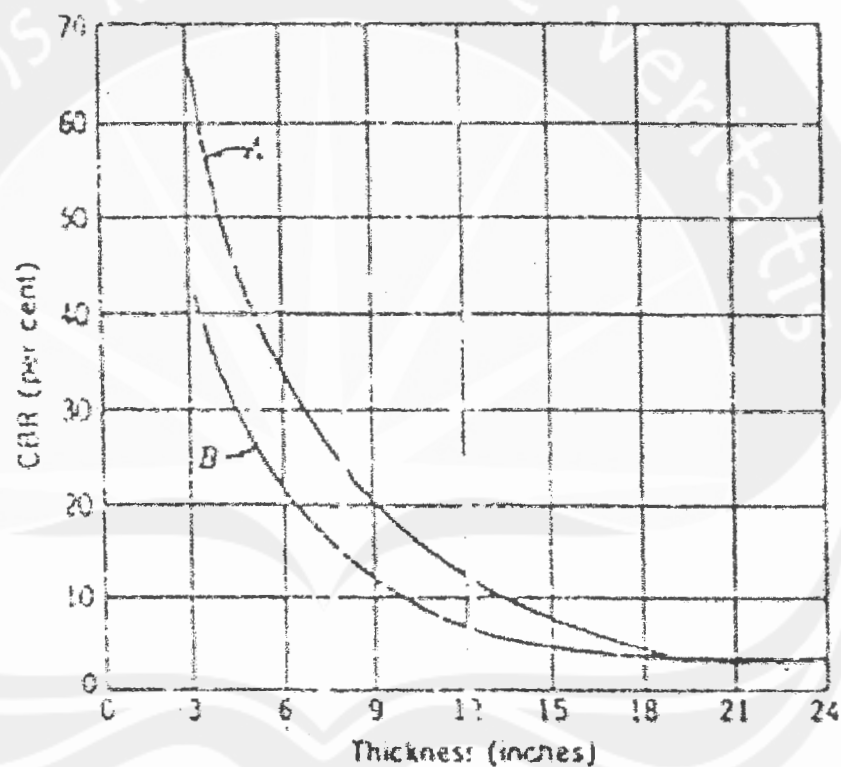
Pada metoda ini, pengaruh cuaca, terutama pengaruh salju amat diperhatikan. The *Corps of Engineers* mempunyai dua konsep yang berbeda dalam pendisainan perkerasan yang berhubungan dengan kondisi salju, yaitu:

1. Kontrolisasi perubahan lapis permukaan dengan perlengkapan perkerasan yang cukup untuk mengurangi atau menghilangkan tekanan salju,
2. Mengurangi kekuatan *subgrade* selama salju mengalami pencairan.

Penggunaan metoda CBR memungkinkan perencanaan untuk menentukan ketebalan lapisan-lapisan *subbase*, *base*, dan *surface* yang diperlukan dengan memakai kurvai disain dengan tes lapisan tanah yang sederhana.

Kriteria yang dipakai sebagai dasar penelitian adalah:

1. Prosedur tes untuk *subgrade* dan komponen-komponen perkerasan-perkerasan lainnya cukup sederhana.
2. Metodanya telah mengatasi persoalan-persoalan perkerasan lapangan terbang dalam waktu yang relatif singkat.



Gambar 3.1. Kurva Asli CBR

Sumber : E.J. Yoder (1975), Principle of Pavement Design

Gambar 3.1. menggambarkan hasil penelitian yang dilakukan terhadap tanah jelek dan tanah yang bagus. Kurva A dibuat berdasarkan penelitian tahun 1942 dan kurva B dibuat berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh *California*

Division of Highway. Ketebalan yang digambarkan pada Gambar 3.1. ditunjukkan untuk material dengan nilai CBR tertentu. Misalnya *subgrade* dengan CBR 10% dan menggunakan kurva B, maka didapat ketebalan material yang bermutu lebih baik untuk melindungi *subgrade* sebesar 10 inchi.

Pada penelitian yang dilakukan oleh *Corps of Engineers* tahun 1956, hubungan antara ketebalan suatu perkerasan lentur dengan beban roda dan tekanan ban dinyatakan dengan rumus:

$$t = \sqrt{P \left[\frac{1}{8,1 \text{ CBR}} - \frac{1}{p \pi} \right]} \quad (3.1)$$

Kemudian persamaan 3-1 berkembang menjadi:

$$t = \frac{(2,3 \log C + 14,4)}{1000} \sqrt{P \left[\frac{1}{8,1 \text{ CBR}} - \frac{1}{p \pi} \right]} \quad (3.2)$$

dengan nilai $\frac{(23,1 \log C + 14,4)}{1000}$ menggambarkan persentase dari angka tekanan.

Pada akhirnya, persamaan 3-2 disempurnakan kembali menjadi:

$$t = \alpha \left\{ \sqrt{A \left[0,0481 - 1,1562 \left(\log \frac{\text{CBR}}{P_e} \right) - 0,6414 \left(\log \frac{\text{CBR}}{P_e} \right)^2 - 0,4730 \left(\log \frac{\text{CBR}}{P_e} \right)^3 \right]} \right\} \quad (3.3)$$

keterangan: t = tebal perkerasan lentur dalam inchi

α_1 = faktor perulangan beban

A = daerah kontak satu roda dalam inchi²

CBR = kekuatan lapisan

P_e = tekanan ban pada ketebalan t yang digunakan

P = beban roda tunggal, pon

Perlu diperhatikan bahwa persamaan tekanan roda P_e pada rumus (3.3) merupakan persamaan dari $ESWL/A$.

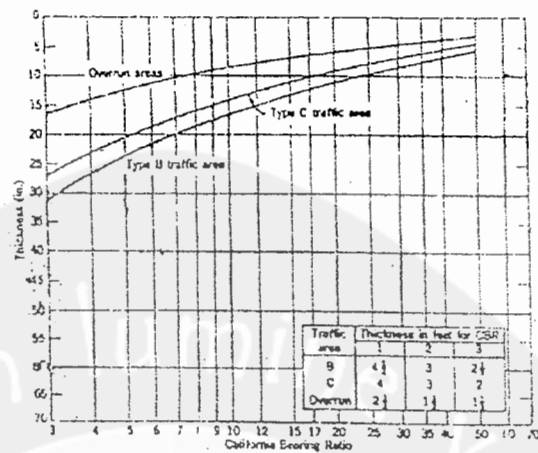
Pada tahun 1958 perencanaan secara manual yang dikembangkan oleh *The Corps of Engineers* telah mencakup perencanaan kurva yang menghubungkan beban roda, tekanan roda, konfigurasi roda pesawat, dan daerah lalu lintas yang digunakan. Perencanaan tersebut telah berkembang dalam bentuk rumus pada persamaan (3.1) atau (3.2). Sejak saat itu, perencanaan landasan pacu dikategorikan terhadap satu diantara ketiga kondisi pembebanan roda pesawat, yaitu:

1. Pembebanan ringan dengan beban roda 25 kips ($=25 \cdot 10^3 \text{ pon/in}^2$),
2. Pembebanan sedang dengan beban roda 100 kips ($=100 \cdot 10^3 \text{ pon/in}^2$),
3. Pembebanan berat dengan beban roda 265 kips ($=265 \cdot 10^3 \text{ pon/in}^2$).

$$\text{Kips} = \text{kip/in}^2. \text{ Pon/in}^2 = \text{psi}. 1 \text{ kip} = 10^3 \text{ pon}.$$

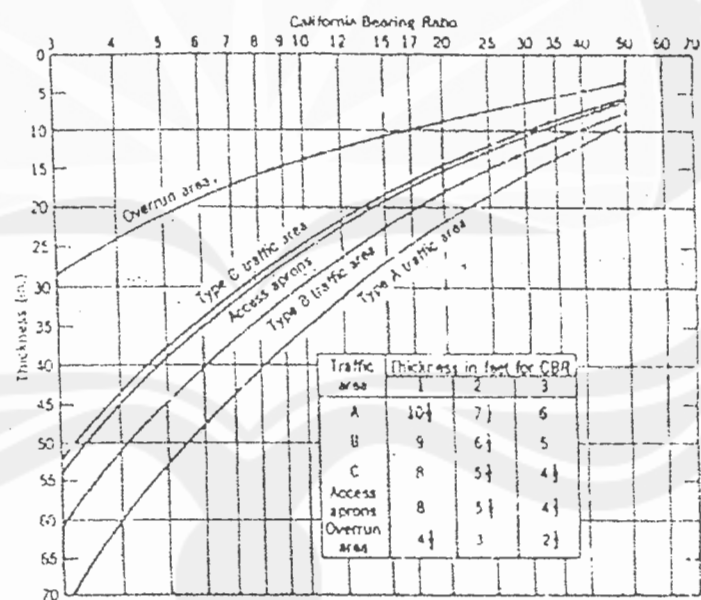
Setiap kategori telah sudah ditentukan pembebanan maksimal dan parameter konfigurasi dalam pendisainan tebal perkerasan landasan pacu. Gambar 3.2. sampai dengan Gambar 3.4. memberikan ketebalan yang dibutuhkan di atas perkerasan.

Ketebalan minimum lapis permukaan dan *base* pada Gambar 3.2. sampai dengan Gambar 3.4. dapat dilihat pada Tabel 3.1. sampai dengan Tabel 3.3.



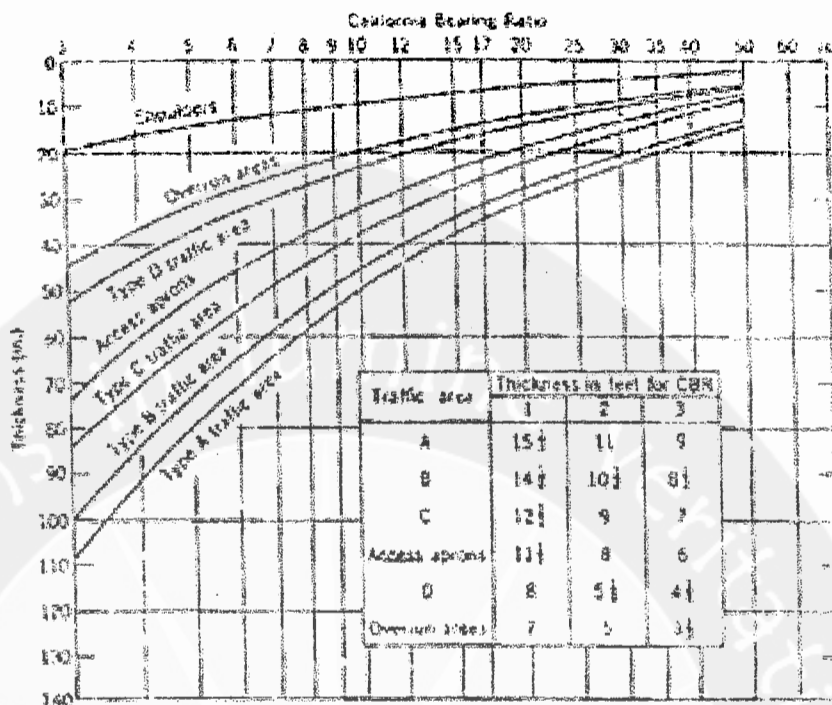
Gambar 3.2. Kurva Perencanaan Perkerasan Lentur Metoda CBR untuk Pesawat Ringan Dengan $A_e = 100 \text{ in}^2$

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of pavement*



Gambar 3.3. Kurva Perencanaan Perkerasan Lentur Metoda CBR untuk Pesawat Sedang Dengan $A_e = 267 \text{ in}^2$

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of pavement*



Gambar 3.4. Kurva Perencanaan Perkerasan Lentur Metoda CBR untuk Pesawat Berat Dengan $A_e = 267 \text{ in}^2$

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of pavement*

Tabel 3.1. Persyaratan Ketebalan Base dan Perkerasan untuk Beban Berat

Traffic Area	Ketebalan Minimum (in)					
	Base - 100 CBR			Base - 80 CBR		
	Perkerasan	Base	Total	Perkerasan	Base	Total
A	5	10	15	6	9	15
B	4	9	13	5	8	13
C	4	9	13	5	8	13
D	3	6	9	3	6	9
Accessroad aprons	3	6	9	3	6	9
Shoulder	2	6	8	2	6	8

Sumber : E.J. Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Tabel 3.2. Persyaratan Ketebalan *Base* dan Perkerasan untuk Beban Sedang

Traffic Area	Ketebalan Minimum (in)					
	Base – 100 CBR			Base – 80 CBR		
	Perkerasan	Base	Total	Perkerasan	Base	Total
A	4	6	10	5	6	11
B	3	6	9	4	6	10
C	3	6	9	4	6	10
Accesroad aprons	3	6	9	3	6	9

Sumber : E.J. Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Tabel 3.3. Persyaratan Ketebalan *Base* dan Perkerasan untuk Beban Ringan

Traffic Area	Ketebalan Minimum (in)					
	Base – 100 CBR			Base – 80 CBR		
	Perkerasan	Base	Total	Perkerasan	Base	Total
B	3	6	9	4	6	10
C	3	6	9	3	6	9
Accesroad aprons	3	6	9	4	6	10

Sumber ; E.J. Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Base Course dibawah lapis permukaan akan langsung melawan tegangan-tegangan yang terjadi langsung di bawah roda pesawat CBR *base course* berkisar 80-100 dan ketebalan minimum yang disyaratkan adalah 6 inchi. Pada Tabel 3.4. memperlihatkan bahan-bahan yang digunakan untuk *base course* dan nilai CBRnya. Sedang ketebalannya dapat dilihat pada Tabel 3.1. sampai Tabel 3.3.

Tabel 3.4. CBR Rencana untuk *Base Course*

Type	CBR rencana
<i>Graded Crushed Aggregate</i>	100
<i>Water-Bound Macadam</i>	100
<i>Dry-Bound Macadam</i>	100
Campuran aspal panas dari <i>central plant</i>	100
Batu kapur	80
Agregate yang distabilisir	80

Sumber : Basuki, H (1984), *Merancang, Merencanakan Lapangan Terbang*

Untuk faktor koreksi terhadap bahan susun dipakai *base course* dapat dilihat pada Tabel 2.1. Untuk *subbase course* kekuatannya dinyatakan dalam CBR berkisar antara 20-50 dan persyaratannya diperlihatkan pada Tabel 3.5. Faktor

koreksi terhadap bahan susun yang dipakai pada *subbase course* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

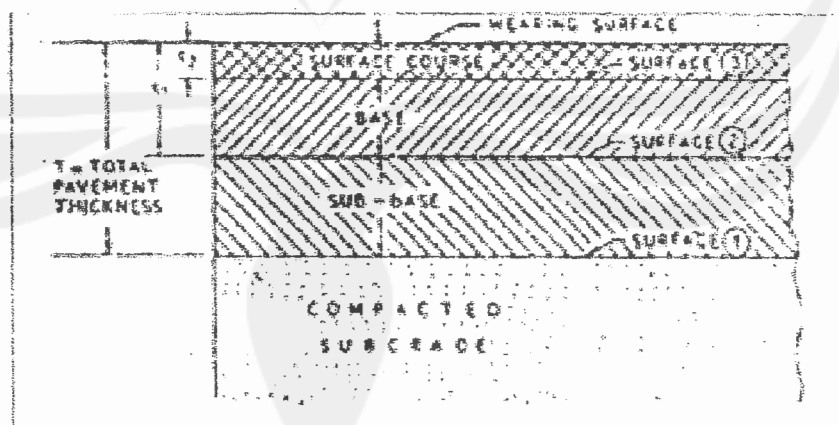
Tabel 3.5. Persyaratan *Subbase Course*

CBR Rencana Maximum	Ukuran (inchi)	Nilai Maksimum yang diijinkan				
		Gradation Requirements %Passing				
		No. 10	No. 200	LL	IP	
Subbase	50	3	50	15	25	5
Subbase	40	3	80	15	25	5
Subbase	30	3	100	15	25	5
Material terpilih	20	3	-	25	35	12

Sumber: Basuki, H (1984), *Merancang, Merencana Lapangan Terbang*

3.2.2. Langkah-langkah perencanaan

1. Menentukan kategori pembebanan landasan pacu
2. Menentukan tebal lapis keras
3. Didapat hasil akhir dengan metoda ini
4. Analisis terhadap tebal lapis lentur landasan pacu yang sudah ada



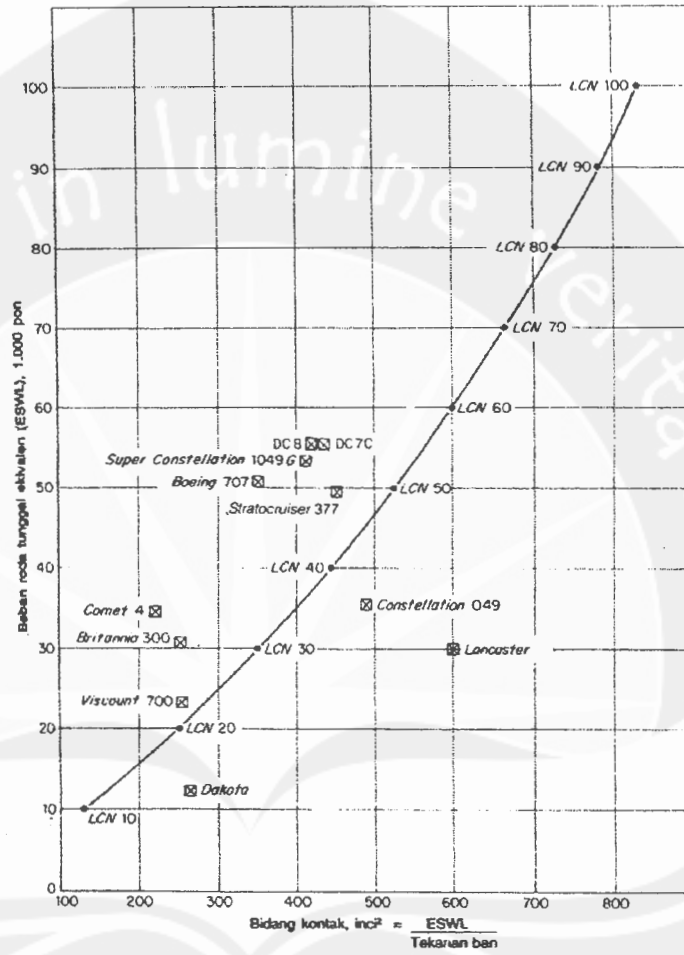
Gambar 3.5. Penamaan Ukuran Tiap Lapis Pada Metoda CBR

Sumber : Bhanot, KL (1983), *A Text Book On Highway Engineering And Airport*

3.3. Metoda LCN (Load Classification Number)

3.3.1 Umum

Metoda LCN (*Load Classification Number* = bilangan penggolongan beban) dirumuskan pertama kali oleh Direktor Kementrian Udara, Pekerjaan Umum, Inggris. Dalam metoda ini, kapasitas daya dukung perkerasan dinyatakan dalam bilangan yang dikenal sebagai LCN. Begitu pula dengan ESWL (*Equivalent Single Wheel Load*) dari setiap pesawat yang dinyatakan oleh LCN. Angka LCN pesawat ini tergantung kepada geometri roda pendaratan, tekanan roda pesawat, dan komposisi dari tebal perkerasan. Bila angka LCN perkerasan landasan pacu lebih besar daripada LCN pesawat, maka pesawat tersebut dapat mendarat dengan selamat. Pada gambar 3.6 dapat dilihat kurva penggolongan beban standar (Horonjeff, 1993).



Gambar 3.6. Kurva Penggolongan Beban Standar

Sumber : Horonjeff (1993), Merencanakan Dan Merancang Bandar Udara

Tabel 3.6. Penggolongan Beban Menurut LCN

Pembebanan Roda, pon	Tekanan Ban, pons/in ²	Bilangan Penggolongan Beban (LCN)
100.000	120	100
90.000	115	90
80.000	110	80
70.000	105	70
60.000	100	60
50.000	95	50
40.000	90	40
30.000	85	30
20.000	80	20
10.000	75	10

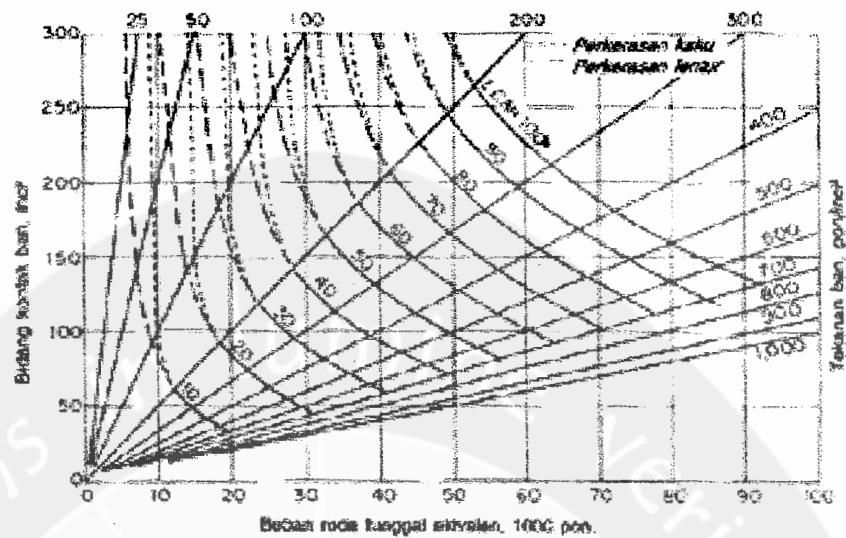
Sumber: Horonjeff (1993), *Merencanakan Dan Merancang Bandar Udara*

Basuki, Imam (1990) mengatakan bahwa ada hubungan antara kegunaan lapisan perkerasan lapangan terbang dengan gerakan pesawat yang dilayani menurut LCN, seperti dalam Tabel 3.7. berikut ini.

Tabel 3.7. Klasifikasi Menurut LCN

LCN Pesawat LCN Perkerasan	Klasifikasi	Keterangan
< 1,10	Unlimited Use	Dapat melayani pesawat dengan kapasitas penuh
1,10 – 1,25	Limited Use Up to about 3000 movement	Dapat melayani pesawat dengan kapasitas penuh dan terbatas 3000 gerakan
1,25 – 1,50	Limited use up to about 300 movement	Dapat melayani pesawat dengan kapasitas penuh setelah dilakukan penyelidikan
1,50 – 2,00	Very limited use	Dapat melayani pesawat dengan kapasitas penuh setelah dilakukan penyelidikan
> 2,00	Emergency	Dapat melayani pesawat dengan kapasitas penuh dalam keadaan darurat

Sumber : Basuki, I (1990), *Tugas Akhir*



Gambar 3.7. LCN Pada Batas Beban, Tekanan Roda dan Area Kontak

Sumber : Horonjeff (1993), Merencanakan Dan Merancang Bandar Udara

Horonjeff (1993) mengatakan bahwa grafik LCN pada Gambar 3.7. dibuat dengan langkah-langkah:

1. Garis bidang kontak ban, dilukiskan dari rumus:

$$\text{Kontak area} = \frac{\text{beban}}{\text{tekanan roda}} \quad (3.4)$$

2. Satu titik pada setiap garis LCN langsung berasal dari kurva penggolongan beban standar.
3. Titik lain pada setiap garis LCN telah dihitung menggunakan persamaan:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.27} \quad (3.5)$$

dengan: W_1 dan W_2 adalah beban-beban kegagalan (*failure*) yang berurutan, masing-masing dalam pon.

A_1 dan A_2 adalah area yang dibebani dalam inc^2

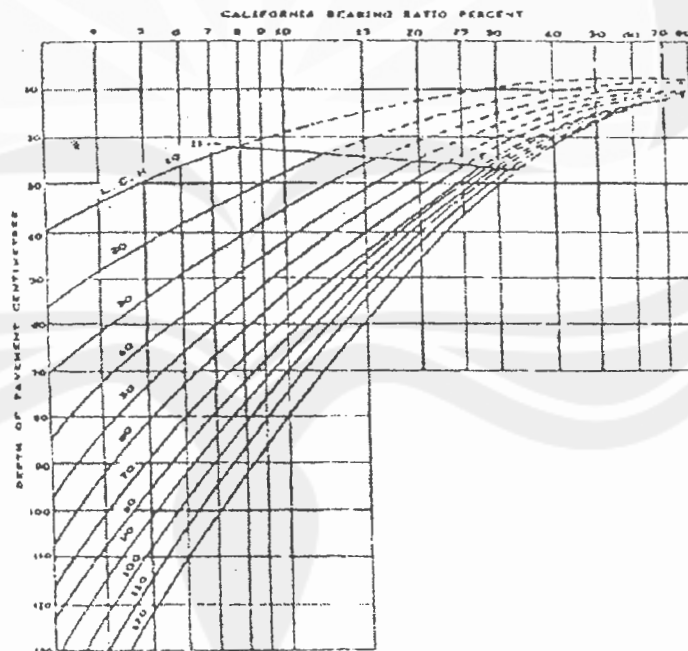
4. garis titik-titik merupakan penerusan sistem LCN secara coba-coba untuk menampung bidang kontak yang lebih kecil dari 200 inc² berdasarkan pengujian beban pada perkerasan dengan bidang kontak yang kecil.

3.3.2. Langkah-langkah perencanaan

1. Menentukan harga ESWL dengan rumus:

$$\text{Nilai ESWL} = \frac{(100 - \text{load on main wheel})\%}{\text{dual wheel gear}} \times \text{MTOW} \quad (3.6)$$

2. Dari tekanan roda pesawat yang telah diketahui dan nilai ESWL yang telah dicari menggunakan persamaan (3.6), maka harga LCN dapat dilihat pada Gambar 3.7.
3. Dari harga LCN yang diperoleh, maka dapat dibaca ketebalan yang berkaitan dengan nilai CBR dari tiap-tiap lapisan yang berlainan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Kurva Perencanaan Perkerasan Lentur untuk Landasan Pacu

Sumber : Horonjeff (1993), Merencanakan Dan Merancang Bandar Udara

3.4. Metoda FAA (Federal Aviation Administration)

3.4.1. Umum

Metode ini dikembangkan oleh FAA. Dasarnya adalah analisis statistik perbandingan kondisi lokal dari tanah, sistem drainasi, dan cara pembebanan untuk berbagai tingkah laku beban. Pemilihan ketebalan perkerasan didasarkan pada berat pesawat kotor 300.000 pon.

FAA mengklasifikasikan tanah dasar berdasarkan:

1. Butiran yang ditahan pada saringan no. 10.
2. Butiran lewat saringan no. 10 tetapi ditahan saringan no. 40.
3. Butiran lewat saringan no. 40 tetapi ditahan saringan no. 200.
4. Butiran lewat saringan no. 200.
5. Batas cair (*liquid limit*).
6. Indeks plastisitas (*plasticity index*).

Klasifikasi tanah tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Dalam metoda ini, pengaruh keadaan salju juga berpengaruh seperti halnya yang ada pada metoda CBR. FAA telah meneliti bahwa pengaruh salju akan mengurangi kekuatan dan kemunduran pada kondisi perkerasan. Pengaruh salju ini mulai terjadi jika kedalaman penetrasi salju lebih besar dari rencana perkerasan yang tanpa memperhitungkan pengaruh salju.

Dalam menentukan tebal lapis perkerasan terlebih dahulu menentukan pesawat rencana, yaitu pesawat yang direncanakan akan beroperasi di bandar udara yang menghasilkan ketebalan perkerasan yang paling tebal. Gambar 3.9. menggambarkan ketebalan minimum *base course*, ketebalan perkerasan total, yang dihitung sebelumnya dan nilai CBR.

Tabel 3.8. Klasifikasi Tanah Dasar untuk Perencanaan Perkerasan FAA

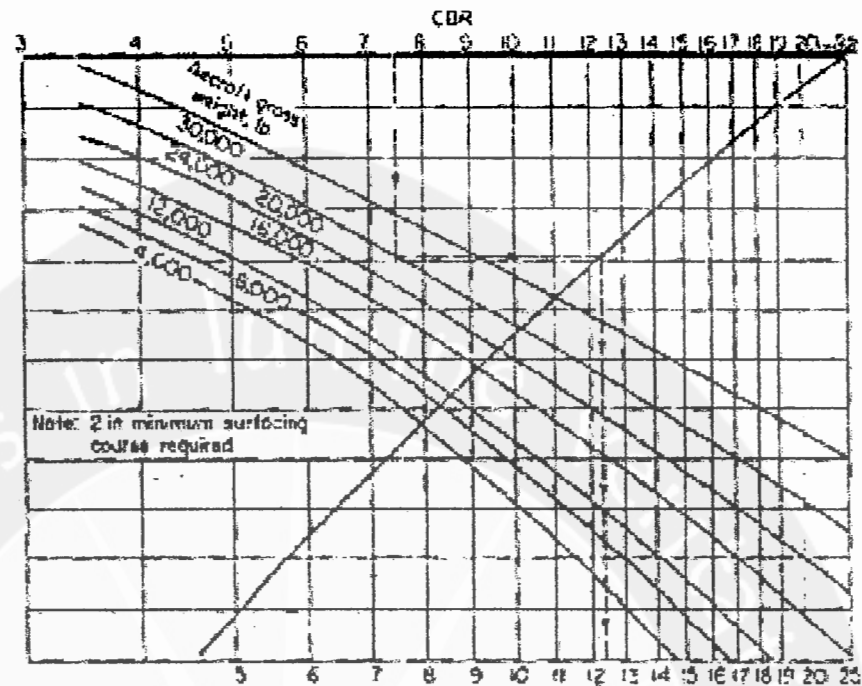
Grup Tanah	Analisis Saringan				Liquid limit	Plasticity index
	Persentase bahan tertahan saringan no. 10	Bahan lebih kecil dari saringan no. 10 (%)				
		Pasir kasar lolos saringan no. 10 tapi ditahan no. 40	Pasir halus lewat saringan no. 40 tapi ditahan no. 200	Campuran lumpur dan tanah liat lolos saringan no. 200		
Kerikil						
E-1	0-45	40+	60-	15-	25-	6-
E-2	0-45	50+	85-	25-	25-	6-
E-3	0-45			25-	25-	6-
E-4	0-45			35-	35-	10-
Butiran halus,						
E-5	0-55			45-	40-	15-
E-6	0-55			45+	40-	10-
E-7	0-55			45+	50-	10-30
E-8	0-55			45+	60-	15-40
E-9	0-55			45+	40+	30-
E-10	0-55			45+	70-	20-50
E-11	0-55			45+	80-	30+
E-12	0-55			45+	80+	
E-13	Tanah gambut, tidak bisa untuk Subgrade					

Sumber : Basuki, H (1984) *Merancang, Merencana Lapangan Terbang*.

3.4.2. Langkah-langkah perencanaan

Perkerasannya melayani pesawat-pesawat ringan, kegiatan *Non Schedule* aktifitas pertanian, industri, eksekutif, atau pesawat-pesawat latih. Perkerasannya hanya mampu melayani pesawat dengan MTOW 30.000 lbs, untuk menghitung tebal perkerasannya dilakukan dengan menggunakan gambar 3.10 yang dibuat oleh *Federal Aviation Administration*.

Tebal struktur perkerasan lentur total ditentukan dengan menggunakan CBR tanah dasar dan berat lepas landas kotor pesawat yang paling berat yang menggunakan fasilitas ini. Tebal lapisan penutup dan pondasi atas didapat dengan menggunakan grafik yang sama dengan CBR sebesar 20 untuk pondasi bawah. Tebal maksimum untuk lapisan penutup adalah 2 *inchi* dan untuk lapis pondasi atas adalah 3 *inchi*.



Gambar 3.10. Grafik Perencanaan Perkerasan Lentur Untuk Pesawat Ringan

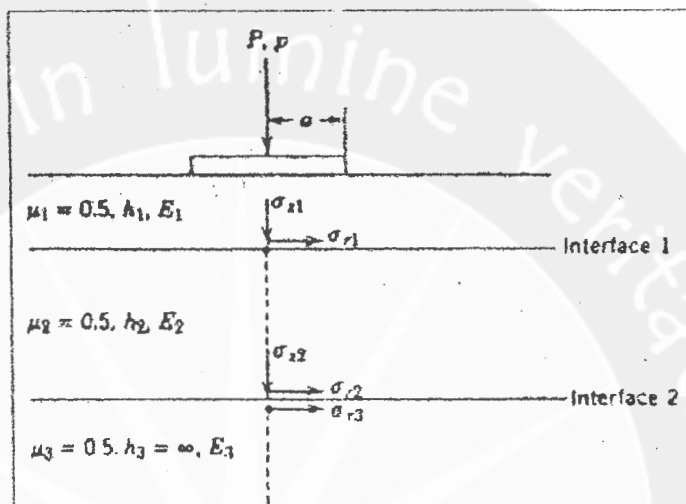
Sumber : Horonjeff (1993), Merencanakan Dan Merancang Bandar Udara

3.5. Konsep Sistem Lapis

Gambar 3.11: menggambarkan konsep umum tentang sistem multi lapisan elastik. Secara umum, penyelesaian masalah regangan dan tegangan mempunyai berbagai asumsi, misalnya saja:

1. Sifat material masing-masing lapisan adalah homogen, yaitu sifat material pada titik A sama dengan sifat material di titik B.
2. Masing-masing lapisan mempunyai ketebalan yang terbatas kecuali pada lapisan paling bawah (*subgrade*) dan lapisan lateral yang mempunyai ketebalan dan arah yang tidak terbatas.
3. Masing-masing lapisan bersifat *isotropic*, yaitu bahwa sifat material di titik tertentu (misal titik A) adalah sama setiap arah.

4. Ada gesekan yang kuat antar lapisan permukaan.
5. Gaya geser (*shearing force*) pada permukaan dianggap tidak ada.
6. Tegangan yang terjadi dipengaruhi oleh dua sifat material, yaitu *poisson's ratio* (μ) dan modulus elastisitas bahan (E).



Gambar 3.11. Sistem Elastis Multi Lapis

Sumber : E.J. Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Secara teoritis, terdapat 9 tegangan yang terjadi dan dapat digabi menjadi dua golongan, yaitu:

1. Tiga buah tegangan normal, yaitu : σ_r ; σ_z ; σ_t yang bekerja secara tegak lurus pada elemen muka.
2. Enam buah tegangan geser τ_{tr} , τ_{zt} , τ_{tz} , τ_{tz} , τ_{rt} , τ_{zt} yang bekerja secara sejajar pada elemen muka.

Pada kondisi keseimbangan statis, tegangan geser yang bekerja pada tiap-tiap permukaan adalah sama, yaitu: $\tau_{tr} = \tau_{rt}$; $\tau_{zt} = \tau_{tz} = \tau_{tz} = \tau_{zt}$. Jika diberikan tegangan

triaksial pada suatu elemen, maka regangan yang bekerja dihitung mengikuti rumus:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.9)$$

3.5.1. Sistem satu lapis

Dalam menganalisis regangan, tegangan, dan lendutan pada sistem satu lapis digunakan persamaan *Boussinesq* menurut *Boussinesq*, tegangan vertikal suatu titik pada kedalaman tertentu di bawah permukaan tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\sigma_z = K \frac{P}{Z^2} \quad (3.10)$$

$$K = \frac{3}{2\mu} - \frac{1}{[1 + (r/z)^2]^{3/2}} \quad (3.11)$$

dengan : r = jarak radial dari pusat beban

z = kedalaman titik yang dituju

P = beban terpusat

σ_z = tegangan vertikal

Dari persamaan (3.10) dan (3.11) diketahui bahwa tegangan vertikal tergantung pada kedalaman dan jarak radial. Dalam perkembangan ilmu tentang perkerasan lentur, banyak ilmuwan yang sudah mengeluarkan cara dan rumus untuk menghitung tegangan vertikal, tegangan horisontal dan juga lendutan berdasarkan

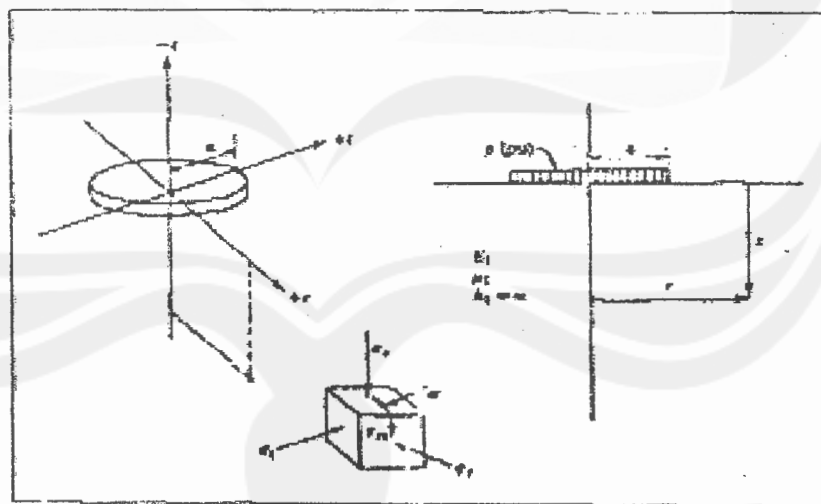
rumus *Boussinesq*. Salah satunya adalah Foster dan Ahlvin yang khusus menggunakan nilai rasio *poisson* $\mu = 0,5$. Pengembangan berikutnya dilakukan oleh Ahlvin dan Ulery yang menemukan penyelesaian masalah tegangan, regangan, dan lendutan di semua titik pada daerah yang homogen untuk semua nilai *rasio poisson* (μ). Rumus yang telah ditemukan dapat dilihat pada Tabel 3.9. Semua persamaan yang ada pada Tabel 3.9. menggambarkan fungsi-fungsi pasti (A...H) yang dapat dilihat pada lampiran 1 – 8. Tiap fungsi dinyatakan dalam batas kedalaman dan jarak radial dalam radian (z/a dan r/a), yang dimiliki tiap partikel titik dalam tanah, yang dapat dilihat pada gambar 3.12. Walaupun kebanyakan struktur perkerasan aspal tidak bisa dikatakan struktur yang homogen, penggunaan rumus pada Tabel 2.1. secara umum dapat digunakan untuk tegangan, regangan, dan lendutan pada *subgrade* jika modulus elastis antara *subgrade* dan perkerasan hampir atau bahkan sama.

Secara umum, jika lendutan pada struktur perkerasan dianggap tidak ada, maka diasumsikan bahwa perkerasan diatas *subgrade* tidak mengalami lendutan terhadap lendutan total permukaan. Lendutan yang sebenarnya dimulai dari titik z sampai tak terhingga pada lapisan *subgrade*. Defleksi yang terjadi pada perkerasan diatas *subgrade* dianggap nol. Hal ini dapat digambarkan lewat gambar 3.13.

Tabel 3.9. Rumus Elastis Satu Lapis

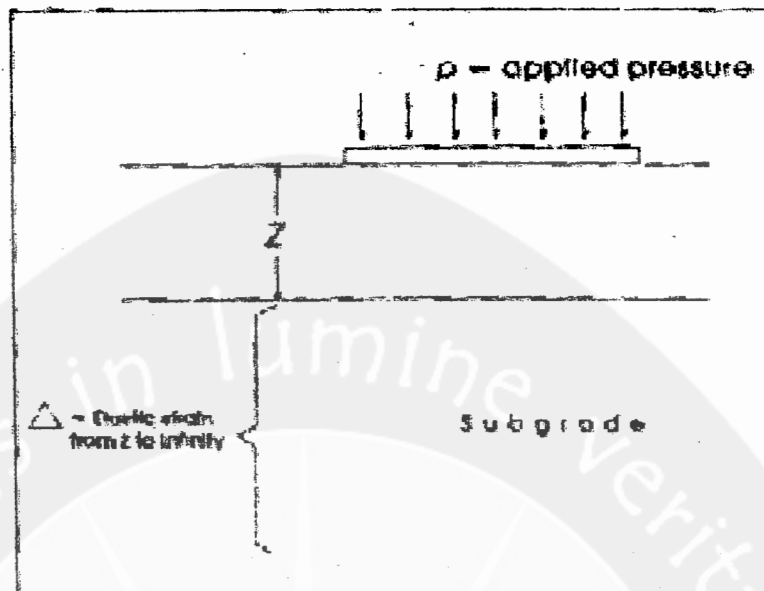
Parameter	General Case	Special Case ($\mu = 0.5$)
Vertical stress	$\sigma_z = p[A + Bz]$	(same)
Radial horizontal stress	$\sigma_r = p[2\mu A + C + (1 - 2\mu)Fz]$	$\sigma_r = p[A + C]$
Tangential horizontal stress	$\sigma_t = p[2\mu A - C + (1 - 2\mu)Fz]$	$\sigma_t = p[A - C]$
Vertical radial shear stress	$\tau_{rz} = \mu p C$	(same)
Vertical strain	$\epsilon_z = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)A + Bz]$	$\epsilon_z = \frac{1.5p}{E_1} Bz$
Radial horizontal strain	$\epsilon_r = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)F + C]$	$\epsilon_r = \frac{1.5p}{E_1} C$
Tangential horizontal strain	$\epsilon_t = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)F - C]$	$\epsilon_t = -\frac{1.5p}{E_1} C$
Vertical deflection	$\Delta_z = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} \left[\frac{z}{\mu} A + (1 - \mu)Fz \right]$	$\Delta_z = \frac{1.5p}{E_1} \left(\frac{z}{\mu} A + \frac{Fz}{2} \right)$
Bulk stress	$\delta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t$	
Bulk strain	$\epsilon_v = \epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_t$	
Vertical tangential shear stress	$\tau_{rt} = \tau_{tz} = 0$ (σ_r, σ_t is principal stress (stress))	
Principal stresses	$\sigma_{1,2} = \frac{(\sigma_r + \sigma_t) \pm \sqrt{(\sigma_r - \sigma_t)^2 + 4\tau_{rt}^2}}{2}$	
Maximum shear stress	$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$	

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*



Gambar 3.12. Diagram Tegangan Satu Lapis

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*



Gambar 3.13. Diagram Asumsi Lendutan Pada Suatu Lapis

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Karenanya, pada teori satu lapis berlaku rumus:

$$\Delta_T = \Delta_P + \Delta_S = \Delta_S \quad (3.12)$$

dengan : Δ_T = total lendutan pada permukaan

Δ_P = lendutan yang terjadi pada lapis perkerasan = 0

Δ_S = lendutan yang terjadi pada *subgrade*.

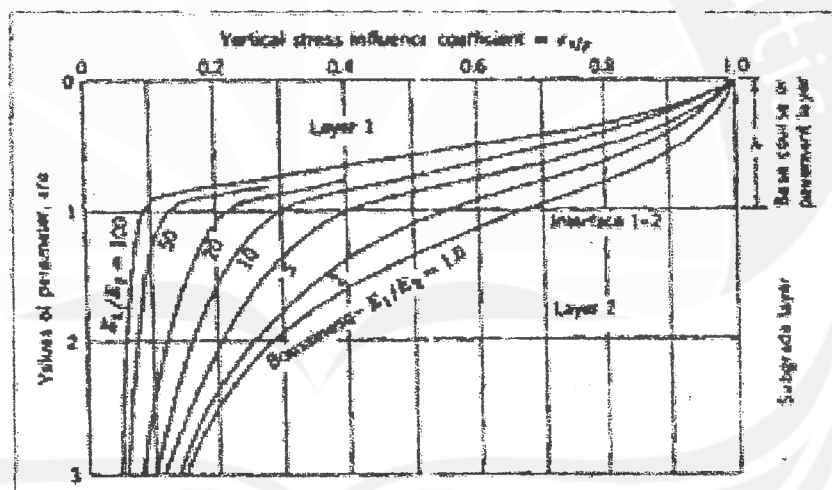
3.5.2. Sistem dua lapis

Tipe perkerasan lentur ini terdiri dari komposisi lapisan-lapisannya. Oleh karenanya, elastisitasnya meningkat sejalan dengan ketebalan lapisan. Fungsinya untuk mengurangi tegangan dan lendutan pada *subgrade*.

Penyelesaian masalah pada sistem dua lapis ini telah dilakukan Burmister, dengan menganggap bahwa bahan penyusun dalam lapisan ini homogen, isotropik, dan elastik. Lapisan permukaannya diasumsikan mempunyai ukuran

terbatas pada arah vertikal tetapi tidak terbatas pada arah horisontal. Lapisan dibawahnya mempunyai ukuran yang tidak terbatas pada arah vertikal dan horisontal. Harga tegangan dan lendutan tergantung pada perbandingan kekuatan lapisan dan dinyatakan dalam perbandingan modulus elastisitas E_1/E_2 dengan E_1 dan E_2 merupakan modulus kekuatan perkerasan dan lapisan *subgrade*.

Gambar 3.14 menggambarkan nilai tegangan vertikal dibawah lapisan pada sistem dua lapis. Pada gambar ini juga menunjukkan bahwa nilai tegangan vertikal pada lapisan antara *base* dan *subgrade* ($E_1/E_2=1$) dan mempunyai nilai 70% dari tekanan yang ada.



Gambar 3.14. Kurva Pengaruh Tegangan Dua Lapis Burmister

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

Lendutan total untuk sistem dua lapis dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta = 1,5 \frac{p \cdot a}{E_2} F_2 \quad (3.13)$$

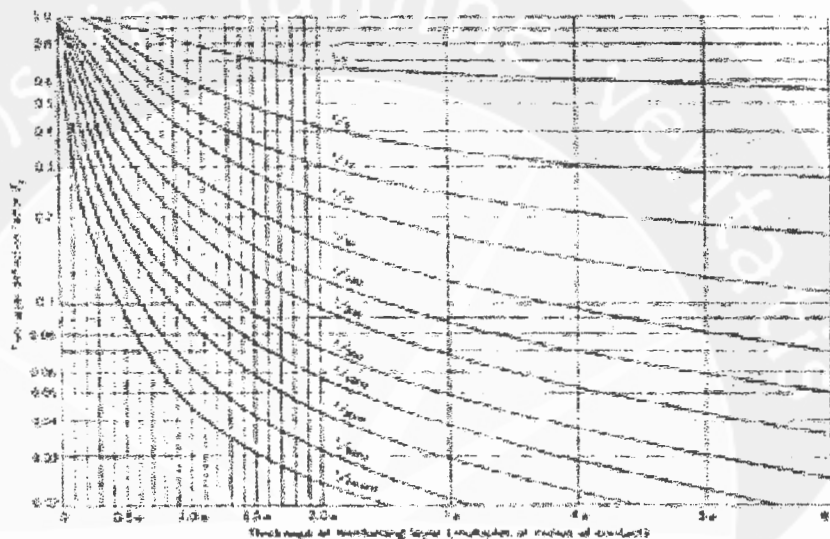
dengan : p = beban terbagi rata yang dianggap berbentuk lingkaran

a = jari-jari lingkaran

E_2 = modulus elastisitas tanah dasar (lapis bawah)

F_2 = faktor tak berdimensi, tergantung perbandingan modulus elastisitas

Harga F_2 dengan bermacam-macam perbandingan kedalaman dan modulus elastisitas dapat dilihat pada kurva Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Faktor Lentutan F_2 untuk Sistem Dua Lapis

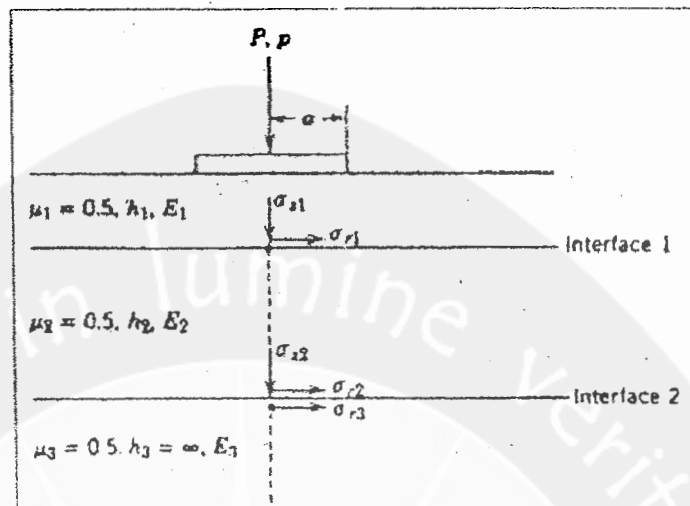
Sumber : EJ Yoder (1975), Principle of Pavement Design

3.5.3. Sistem tiga lapis

Pada struktur tiga lapis, perkerasan yang ada terdiri dari lapis permukaan, lapis fondasi, dan lapis tanah dasar. Tegangan-tegangan yang terjadi ada 5 jenis, yang dapat dilihat pada Gambar 3.16. yaitu:

1. Tegangan vertikal pada *interface 1*
2. Tegangan vertikal pada *interface 2*
3. Tegangan horisontal pada dasar lapis 1
4. Tegangan horisontal pada dasar lapis 2

5. Tegangan horisontal pada dasar lapis 3



Gambar 3.16. Tegangan Pada Sistem Tiga Lapis

Sumber : EJ Yoder (1975), Principle of Pavement Design

Penyelesaian tegangan vertikal dapat dilihat pada grafik lampiran 9-24 dan tegangan horisontal dapat dilihat pada tabel lampiran 25-31 dengan menggunakan parameter:

$$k_1 \text{ atau } K1 = \frac{E_1}{E_2} \quad k_2 \text{ atau } K2 = \frac{E_2}{E_3} \quad (3.14)$$

$$a_1 \text{ atau } A = \frac{a}{h_2} \quad H = \frac{h_1}{h_2} \quad (3.15)$$

Harga kombinasi untuk parameter tersebut adalah:

$$k_1(K1) = 0,2; 2,0; 20,0; 200,0$$

$$k_2(K2) = 0,2; 2,0; 20,0; 200,0$$

$$a_1(A) = 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2$$

$$H = 0,125; 0,24; 0,50; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0$$

Untuk tegangan vertikal dihitung dengan rumus:

$$\sigma_{z1} = p(ZZ1) \quad (3.16)$$

$$\sigma_{z2} = p(ZZ2) \quad (3.17)$$

dengan ZZ1 dan ZZ2 adalah faktor tegangan yang harganya diperoleh pada lampiran 16-31. Sedangkan faktor tegangan horisontal σ_{r1} , σ_{r2} , σ_{r3} dapat diperoleh pada lampiran 25-31, yaitu (ZZ1-RR1), (ZZ2-RR2), dan (ZZ2-RR3).

Besarnya tegangan horisontal diperoleh dengan rumus:

$$\sigma_{r1} - \sigma_{r2} = p(ZZ1 - RR1) \quad (3.18)$$

$$\sigma_{r2} - \sigma_{r3} = p(ZZ2 - RR2) \quad (3.19)$$

$$\sigma_{r2} - \sigma_{r3} = p(ZZ2 - ZZ3) \quad (3.20)$$

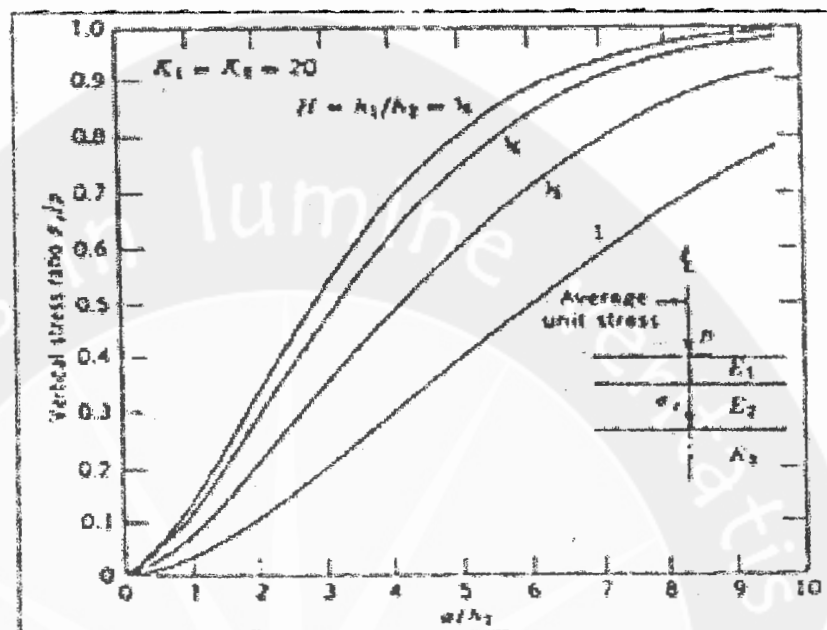
3.6. Konsep Dasar Perancangan

Yang termasuk di dalam konsep dasar perancangan adalah tegangan, regangan, dan lendutan yang terjadi pada struktur multi lapis (lapis banyak). Tujuan pengenalan konsep dasar perancangan ini adalah untuk memberikan keterangan tentang lapisan elastik secara umum terhadap pemahaman pembuatan lapis keras lentur.

3.6.1. Tegangan tanah dasar

Gambar 3.17. memperlihatkan pengaruh perubahan tebal lapis perkerasan terhadap faktor tekanan tegangan vertikal untuk sistem perkerasan tiga lapis. Terlihat juga bahwa tegangan tanah dasar semakin berkurang dengan mengecilnya parameter $A(a/h_2)$. Ini berarti bahwa dengan suatu beban yang diberikan (jari-jari kontak a), pengurangan tegangan tanah dasar dapat dilakukan dengan menambah ketebalan fondasi (h_2). Tegangan tanah dasar juga dapat dikurangi dengan memperbesar $H(h_1/h_2)$. Untuk ketebalan fondasi tetap, maka h_1 (tebal permukaan)

perlu ditambah. Namun, cara yang efisien untuk mengurangi tegangan dasar tanah umumnya dengan menambah kekuatan lapisan perkerasan atas (K_1 dan K_2).



Gambar 3.17. Faktor Tegangan Vertikal Tanah Dasar Sistem Tiga Lapis

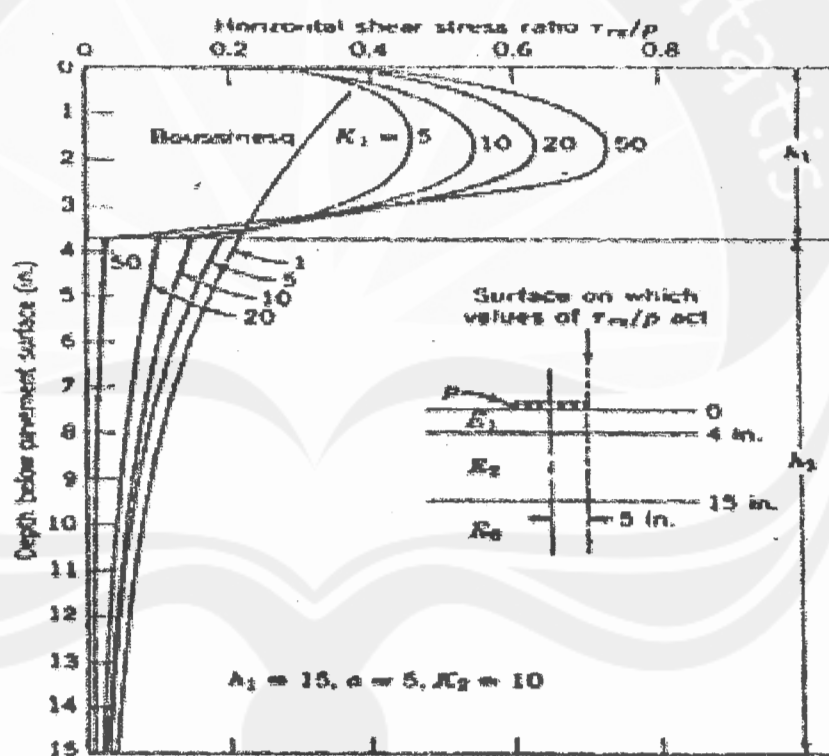
Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

3.6.2. Lendutan

Persentase besarnya lendutan permukaan berasal dari *subgrade* yang besarnya berkisar antara 70-95%. Dapat diasumsikan bahwa defleksi terbesar terjadi karena tekanan elastisitas *subgrade*. Gambar 3.15. memperlihatkan bahwa kenaikan ketebalan perkerasan h atau kenaikan kekakuan lapisan permukaan (E_1) menyebabkan berkurangnya lendutan. Pada kenyataannya juga dapat diperlihatkan bahwa akan terjadi pengurangan lendutan dengan menambah modulus elastisitas/kekakuan lapisan perkerasan dan dengan menambah ketebalan lapisan.

3.6.3. Tegangan geser

Pada gambar 3.18. terlihat faktor tegangan horisontal yang merupakan fungsi kedalaman di bawah lapis perkerasan untuk berbagai macam nilai K_1 . Nampak bahwa faktor bertambah besar dengan membesarnya nilai K_1 . Ini berarti bahwa tegangan geser (σ_{xz}) pada lapis permukaan bertambah besar dengan semakin kakunya bahan. Dari gambar ini pula dapat dilihat bahwa tegangan geser pada bidang antara lapis permukaan dengan lapis fondasi dapat diperkecil dengan memperbesar K_1 .

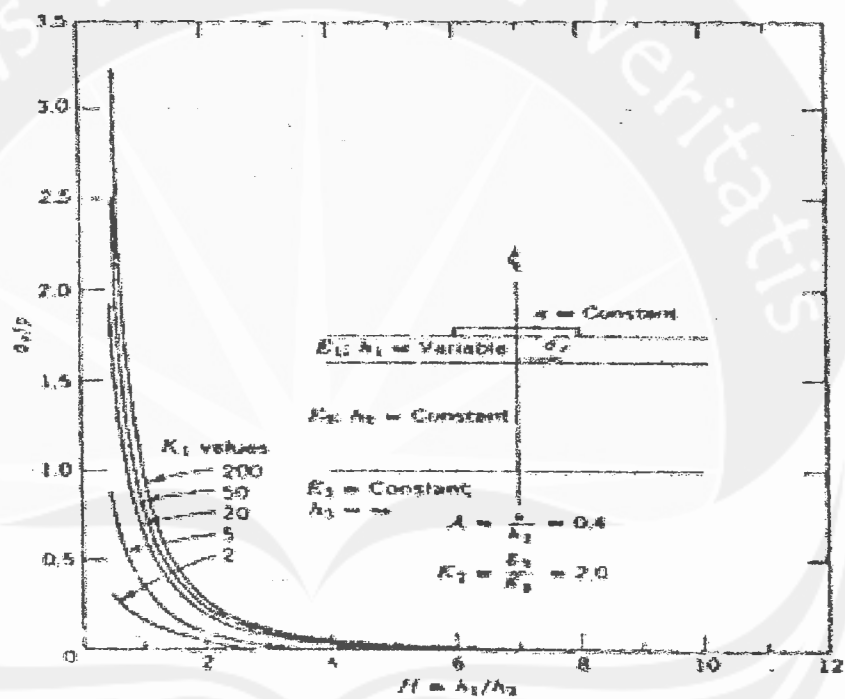


Gambar 3.18. Pembagian Tegangan Geser Dalam Sistem Tiga Lapis

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

3.6.4. Tegangan listrik

Hal terpenting lainnya yang menjadi pertimbangan dalam struktur lapisan adalah berkembangnya tegangan tarik pada dasar lapisan kaku. Pada Gambar 3.19. terlihat bahwa khusus untuk perkerasan yang mempunyai nilai $H(h_1/h_2) < 2$, tegangan tarik akan bertambah secara mencolok untuk nilai K_1 yang semakin besar.



Gambar 3.19. Tegangan Tarik Horizontal Pada Dasar Lapis Pertama Dalam Sistem Tiga Lapis

Sumber : EJ Yoder (1975), *Principle of Pavement Design*

3.7. Analisis Angin

Analisa angin adalah dasar dari perencanaan. Sebagai pedoman pokok landasan pada sebuah bandar udara, diatur sedemikian hingga searah dengan *prevailing wind*. Analisa angin adalah hal yang mendasar bagi perencanaan landas pacu. Landas pacu utama sebisa mungkin searah dengan *prevailing wind*. ICAO menentukan bahwa landasan pacu harus diorientasi sehingga pesawat dapat mendarat paling sedikit 95 % dari waktu dengan kecepatan komponen angin sisi sebagai berikut :

1. 23 mil per jam (20 knot) untuk landas pacu sepanjang ≥ 1500 meter.
2. 15 mil per jam (13 knot) untuk landas pacu $1200 \text{ meter} \leq X \leq 1500 \text{ meter}$
3. 11,5 mil per jam (10 knot) untuk landas pacu ≤ 1200 meter.

Untuk perhitungan dilakukan dengan metode Mawar Angin. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data angin untuk seluruh kondisi jarak penglihatan.
2. Dari data tersebut, mawar angin dapat diplotkan dan ditandai dalam sektor yang sesuai dengan menggunakan skala koordinat kutub.
3. Membaca arah landasan pacu pada skala sebelah luar mawar angin.
4. Mempelajari data angin selama kondisi jarak penglihatan terbatas yang telah disebutkan sebelumnya. (Horonjeff, 1993)

3.8. Pemilihan Lokasi

Dalam pemilihan lokasi perlu diperhitungkan lingkungan di bandar udara yang ditentukan oleh hal-hal berikut ini :

1. Temperatur

Sebagai temperatur – dipilih temperatur di atas muka laut sebesar 59° F.

Menurut ICAO, panjang landasan harus dikoreksi terhadap temperatur sebesar

1% untuk setiap kenaikan 1° C atau 0,56 % setiap 1° F. Untuk setiap kenaikan

1000 meter dari muka air laut, temperatur turun kurang lebih 6,5° C.

ICAO merekomendasikan hitungan koreksi temperatur sebagai berikut :

$$F_t = 1 + 0,01(T - (15 - 0,0065 h)) \text{ meter} \dots \dots \dots (3.21)$$

F_t = faktor koreksi temperatur

2. Ketinggian *altitude*

$$F_e = 1 + 0,07 \frac{h}{300} \text{ meter} \dots \dots \dots (3.22)$$

F_e = faktor koreksi elevasi

h = *aerodrome* elevasi

3. Kemiringan landasan

a. Untuk temperatur standar, penambahan panjang landasan pacu dibandingkan panjang landasan pacu pada ketinggian muka air laut sebesar 7% per 1000 ft.

b. Untuk temperatur yang sangat panas pertambahannya kurang lebih 10%.

(Horonjeff, 1993)

4. Angin permukaan

Kekuatan angin (knots)	Persentasi penambahan/ pengurangan landasan
+ 5	-3
+ 10	-5
- 5	+7

Sumber : Horonjeff (1993)

3.9. Airside

Konfigurasi dalam perancangan bandar udara dilengkapi oleh adanya landas pacuyang dipengaruhi oleh :

1. Keadaan lepas landas normal

$$FL = FS + CL$$

$$FL = \text{Field Length}$$

$$FS = \text{Full Strength Pavement}$$

$$CL = \text{Clear way}$$

$$\text{dengan } CL = 0,50 [TOD - 1,15 (LOD)]$$

$$TOD = \text{Take Off Distance}$$

$$LOD = \text{Lift Off Distance}$$

$$TOD = 1,15 (D_{35})$$

D_{35} = Jarak sebenarnya yang ditempuh pesawat untuk mencapai ketinggian 35 kaki

$$FS = TOR$$

$$TOR = \text{Take Off Run}$$

$$TOR = TOD - CL \text{ maks}$$

2. Keadaan lepas landas dengan kegagalan mesin:

$$FL = FS + CL$$

$$\text{dengan } CL = 0,50 (TOD - LOD)$$

$$TOD = D_{35}$$

$$FS = TOR_2$$

$$TOR_2 = TOD - CL$$

3. Keadaan lepas landas yang gagal (ditunda):

$$FL = FS + SW$$

dengan $FL = ASD$

$$ASD = \textit{Accelerating Stop Distance}$$

4. Keadaan pendaratan:

$$FS = LD$$

$$LD = \textit{Landing Distance}$$

dengan $LD = SD : 0,60$

Untuk menentukan panjang lapangan yang dibutuhkan, setiap persamaan di atas harus diselesaikan untuk rancangan kritis pesawat. Hal ini akan mendapatkan nilai-nilai sebagai berikut:

$$FL = (TOD, DAS, LD) \text{ maks}$$

$$FS = (TOR, LD) \text{ maks}$$

$$SW = DAS - (TOR, LD) \text{ maks}$$

$$CL = [(FL - DAS), CL] \text{ min}$$

Dengan CL minimum yang diijinkan adalah 0. (Horonjeff, 1993)

Sebuah analisis angin adalah dasar bagi perencanaan bandar udara, karena angin adalah pedoman pokok dalam penentuan arah landas pacu. Arah landas pacu tersebut harus sedemikian rupa sehingga dapat searah dengan arah angin dominan (*prevailing wind*).

Ketika pesawat mengadakan pendaratan dan lepas landas, pesawat dapat mengadakan manuver selama kecepatan angin samping (*cross wind*) tidak berlebihan. *Maximum cross wind* yang diijinkan tergantung bukan saja pada

ukuran pesawat, tetapi juga pada konfigurasi sayap dan kondisi perkerasan landas pacu. FAA menentukan bahwa landas pacu harus diorientasikan sehingga pesawat harus dapat mendarat paling sedikit 95% dari waktu dengan angin sisi tidak melebihi 15 mil per jam (13 knot), sedangkan untuk bandar udara utility, komponen *cross wind* diperkecil menjadi 11,5 mil per jam (10 knot).

Walaupun FAA dan ICAO menentukan 95% dari persyaratan untuk mengatasi kondisi cuaca, namun tetap perlu diadakan penelitian data cuaca. Data cuaca, angin bisa didapat dari Badan Meteorologi dan Geofisika. Badan ini mencatat cuaca dalam hubungannya dengan dunia penerbangan.

Bagi daerah yang tidak ada pelabuhan udaranya, sedangkan diperlukan data untuk bandar udara baru, maka data tersebut dapat diperoleh dari stasiun-stasiun terdekat yang mencatat cuaca dalam hubungannya dengan dunia pertanian. Namun seringkali data angin pada suatu lokasi yang direncanakan untuk bandar udara tidak bisa didapatkan. Apabila demikian, maka dapat diambil data dari stasiun cuaca yang berdekatan. Arah landas pacu bisa ditentukan berdasarkan pada data arah angin. Untuk perhitungan arah angin tersebut bisa digunakan *Wind Rose*.

Tabel 3.10. Arah dan Kecepatan Angin

ARAH ANGIN	Persentase Angin			TOTAL
	4 – 15 mil/jam	15 – 31 mil/jam	31 – 47 mil/jam	
U	4,8	1,3	0,1	6,2
TLU	3,7	0,8	-	4,5
TLT	2,3	0,1	-	1,6
T	2,4	0,4	-	2,6
TT	5,0	1,1	-	2,8
TG	6,4	3,2	0,1	9,7
TGS	7,3	7,7	0,3	15,3
S	4,4	2,2	0,1	6,7
BDS	2,6	0,9	-	3,5
BD	1,6	0,1	-	1,7
BDB	3,1	0,4	-	3,5
B	1,9	0,3	-	3,5
BLB	5,8	2,6	0,2	8,6
BL	4,8	2,4	0,2	7,4
ULB	7,8	4,9	0,3	13,0
Tenang		0,4 mil/jam		4,6
				TOTAL 100,0%

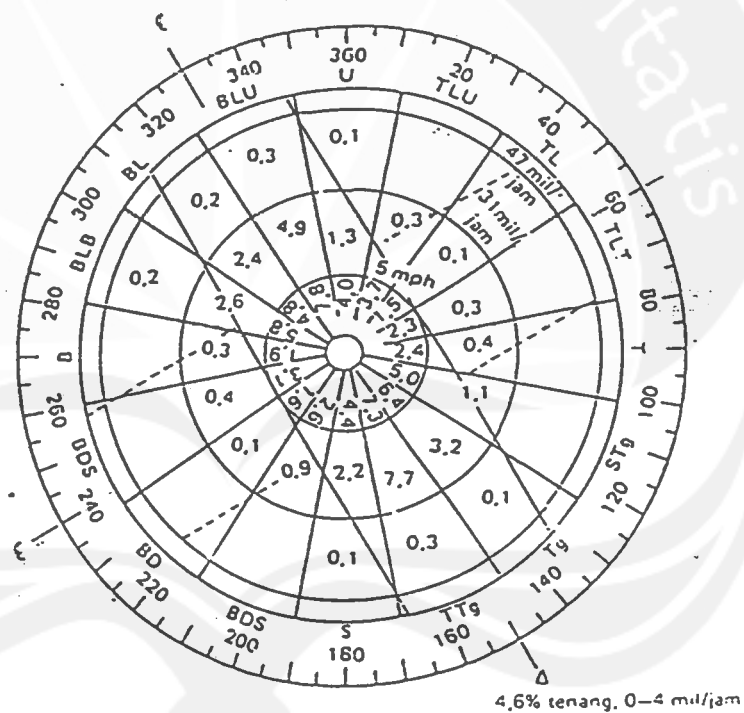
Sumber: Horonjeff, Robert dan Mc Kelvey, Francis X., 1993, *Perencanaan Bandar Udara Jilid I*, Erlangga, Jakarta.

Data dari contoh di atas kemudian dimasukkan ke dalam *wind rose* yang selanjutnya dilakukan perputaran pada sumbu garis yang melalui pusat lingkaran dan dihitung sampai didapat harga maksimum ($\geq 95\%$). Arah mata angin lingkaran tertular dari *wind rose* (yang diarsir) inilah yang dijadikan patokan arah landas pacu.

Dalam hal ilmu aerodinamika, sebuah pesawat memerlukan adanya perbedaan tekanan angin di atas maupun di bawah sayap untuk menimbulkan gaya angkat. Sebagai contoh pesawat bergerak dan terbang akibat dari adanya gaya angkat oleh angin. Hal ini dikaitkan oleh kondisi aerodinamika pesawat yang dalam pembuatannya selalu mengukur besarnya hambatan angin yang menerpa pesawat, yang dinyatakan dalam *cd* (*coefficient of drag*). Semakin besar tingkat *cd*-nya maka semakin besar pula hambatan anginnya, maka semakin berpengaruh

juga pada kestabilan pesawat tersebut. Contoh di atas ini menunjukkan bahwa angin mempunyai pengaruh yang besar pada pesawat, maka hal ini berpengaruh pada arah bandar udara.

Untuk penentuan arah angin ini diambil dari data yang diperoleh dari Badan Meteorologi dan Geofisika wilayah Jawa Tengah sehingga diharapkan dapat mewakili keadaan cuaca yang sesungguhnya pada lokasi yang telah ditentukan.



Gambar 3.20. Arah Landas Pacu Pada *Wind Rose*

Sumber : Horonjeff, Robert, Mc kelvey, Francis X., 1993
Perencanaan Bandar Udara Jilid I, Erlangga, Jakarta