

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Metode Perancangan CBR (*California Bearing Ratio*)

Metode CBR pertama kali dikembangkan oleh *California Division of Highways*, 1928. Metode CBR kemudian dipakai oleh *Corps of Engineers, US Army* untuk keperluan bandar udara militer, setelah pecah Perang Dunia II.

Prinsip metode CBR ini, nilai lapis keras dinyatakan dalam CBR, yaitu suatu nilai yang menunjukkan perbandingan kekuatan bahan yang diuji terhadap bahan tertentu yang dinyatakan dalam persentase. Pengujian CBR pada masing-masing lapis keras, adalah untuk mengetahui indeks kuat geser lapisan tersebut. Contoh CBR 50, berarti beban yang dibutuhkan bagi torak untuk menembusi setiap sampel lapis keras pada kedalaman tertentu, sebesar separuh dari yang dibutuhkan piston untuk menembusi batu pecah standar pada kedalaman yang sama.

Pada tahun 1958, suatu analisis dari seluruh data pelayanan yang tersedia untuk prototip bandar udara, menunjukkan bahwa kriteria perancangan metode CBR dengan beban roda tunggal, dapat dinyatakan dalam parameter: tebal per akar pangkat dua dari bidang kontak ( $t/\sqrt{A}$ ), dan CBR per tekanan roda, serta memisahkan beban kegagalan tetapi bukan beban kegagalan untuk operasi yang mendekati kapasitas (kurang lebih 5000 lintasan).

Pernyataan matematis untuk hubungan parameter tersebut, dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$t = \sqrt{\frac{P}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi}} \quad (3-1)$$

dengan:  $t$  = tebal rencana (in),  
 $P$  = beban roda tunggal (lbs),  
 $A$  = bidang kontak roda (in<sup>2</sup>), dan  
 $CBR$  = CBR (%).

Untuk perhitungan pengulangan beban dengan konfigurasi roda ganda atau lebih, maka beban roda ganda dianggap ekuivalen dengan roda tunggal (ESWL), sehingga persamaan (3-1) menjadi:

$$t = f \sqrt{\frac{ESWL}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi}} \quad (3-2)$$

dengan:  $f$  = persentase tebal rencana ( $0.23 \log C + 0.15$ ),  
 $ESWL$  = beban roda tunggal ekuivalen, dan  
 $C$  = *coverage* (lintasan roda untuk melewati setiap titik dilajur lalulintas satu kali).

Penelaahan yang dilakukan oleh *Corps of Enginners*, terhadap lapis keras yang menerima beban poros roda pendaratan pesawat berat, dengan susunan banyak roda (misalnya B-747), menunjukkan bahwa tebal lapis keras yang didapat pada pengulangan beban yang lebih besar, akan kurang memadai apabila digunakan persamaan (3-2).

Oleh karena itu, perancangan metode CBR kemudian menggunakan persamaan berikut ini.

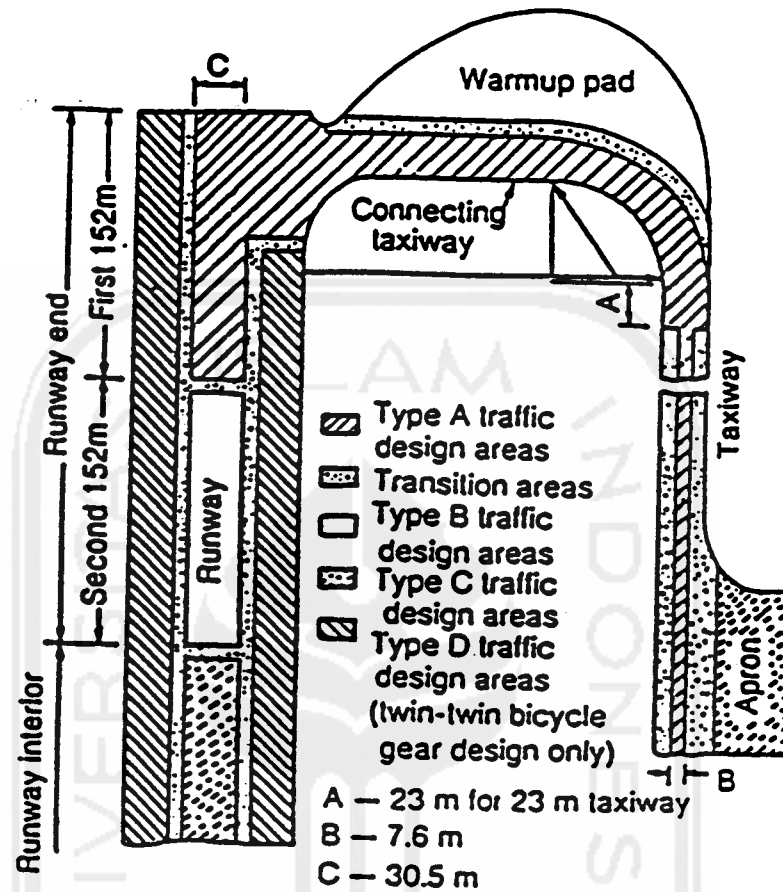
$$t = \alpha_j \sqrt{\frac{ESWL}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi}} \quad (3-3)$$

dengan:  $\alpha_j$  = faktor pengulangan beban.

Dari hasil penelaahan yang dilakukan oleh *Corps of Enginners*, terhadap perancangan ketebalan lapis keras tersebut diatas, maka setiap pesawat yang akan beroperasi di bandar udara dikategorikan kedalam daerah pembebanan pesawat dan *traffic area* yang bekerja pada lapis keras [E.J. Yoder dan M.W. Witzak, 1975], yaitu:

1. Pembebanan untuk pesawat berat dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual tandem*, dan *traffic area* tipe A, B, C, D, *access aprons*, *overrun*.
2. Pembebanan untuk pesawat *medium* dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual wheel*, dan *traffic area* tipe A, B, C, *access aprons*, *overrun*.
3. Pembebanan lapis keras untuk pesawat ringan dengan konfigurasi roda pendaratan utama *single wheel*, dan *traffic area* tipe B, C, *overrun*.

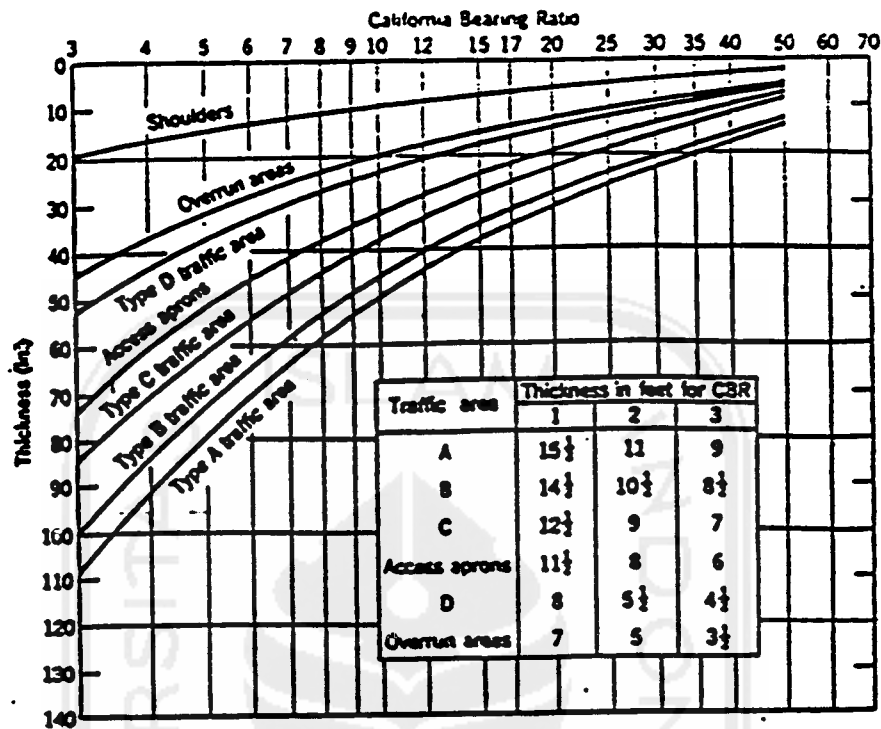
*Layout traffic area* untuk perancangan lapis keras lentur dengan metode CBR, dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Layout *traffic areas* untuk perencanaan lapis keras lentur dengan metode CBR

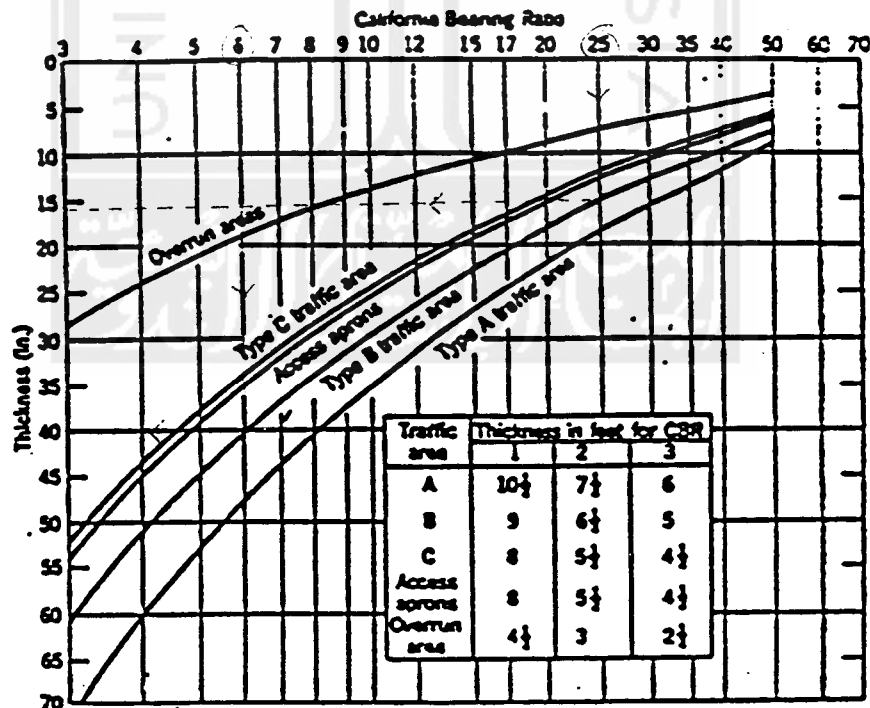
Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witczak [1975]

Untuk perancangan tebal lapis keras dengan kategori pembebanan pesawat dan konfigurasi roda pendaratan utama pesawat, didapat dengan menggunakan gambar 3.2 - 3.4 berikut ini.



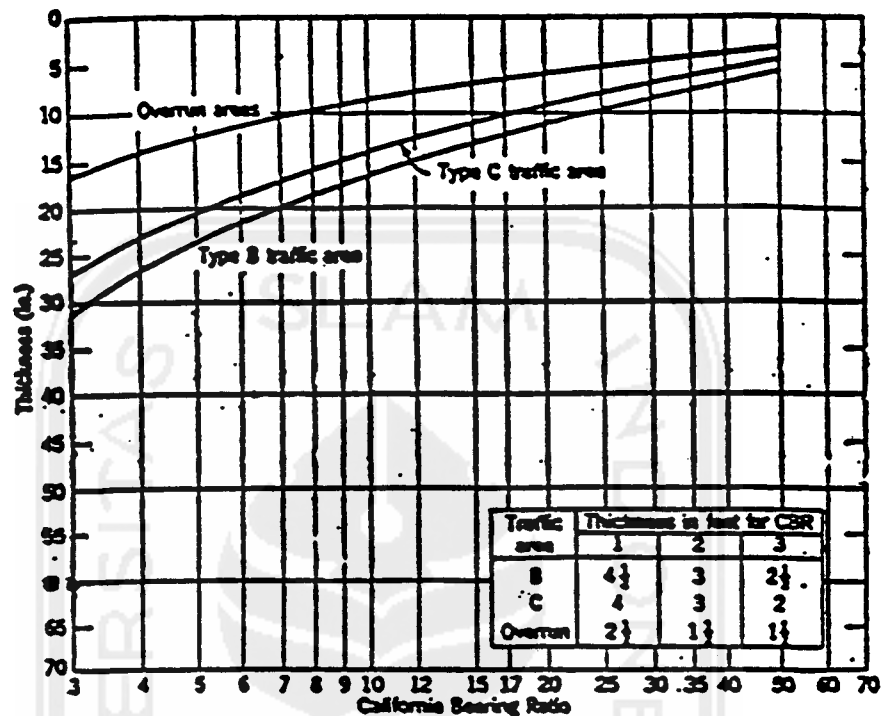
Gambar 3.2 Kurva desain lapis keras untuk pembebanan pesawat berat dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual tandem*

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzczak [1975]



Gambar 3.3 Kurva desain lapis keras untuk pembebanan pesawat *medium* dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual wheel*

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzczak [1975]



Gambar 3.4 Kurva desain lapis keras untuk pembebanan pesawat ringam dengan konfigurasi roda pendaratan utama *single wheel*

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzcak [1975]

Perancangan lapis keras lentur metode CBR diatas, harus memenuhi persyaratan nilai CBR dan gradasi material yang digunakan untuk *subbase*, seperti dalam tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Persyaratan perancangan metode CBR

No	Lapisan	Max. CBR Rencana	% Max. Passing Gradation Requirements				
			Ukuran (in)	No.10	No.200	LL	PI
1	<i>Subbase</i>	50	3	50	15	25	5
2	<i>Subbase</i>	40	3	80	15	25	5
3	<i>Subbase</i>	30	3	100	15	25	5
4	Material Terpilih	20	3	-	25	35	12

Keterangan: LL = *Liquid limit*, dan PI = *Plasticity index*

Ambil sampel dengan nilai CBR lebih rendah

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzcak [1975]

Ketebalan *surface* dan *base course* minimum untuk setiap daerah pembebanan pesawat harus memenuhi persyaratan, seperti yang dirangkum dalam tabel 3.2 - 3.4 berikut ini.

Tabel 3.2 Ketebalan minimum untuk pembebanan pesawat berat

No	Traffic Area	CBR Base Course 100 % Ketebalan Minimum (in)			CBR Base Course 80 % Ketebalan Minimum (in)		
		Surface Course	Base Course	Total	Surface Course	Base Course	Total
1	A	5	10	15	6	9	15
2	B	4	9	13	5	8	13
3	C	4	9	13	5	8	13
4	D	3	6	9	3	6	9
5	Access Aprons	3	6	9	2	6	8
6	Overrun	2	6	8	2	6	8

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzak [1975]

Tabel 3.3 Ketebalan minimum untuk pembebanan pesawat *medium*

No	Traffic Area	CBR Base Course 100 % Ketebalan Minimum (in)			CBR Base Course 80 % Ketebalan Minimum (in)		
		Surface Course	Base Course	Total	Surface Course	Base Course	Total
1	A	4	6	10	5	6	11
2	B	4	6	9	4	6	10
3	C	3	6	9	4	6	10
4	Access Aprons	3	6	9	3	6	9

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzak [1975]

Tabel 3.4 Ketebalan minimum untuk pembebanan pesawat ringan

No	Traffic Area	CBR Base Course 100 % Ketebalan Minimum (in)			CBR Base Course 80 % Ketebalan Minimum (in)		
		Surface Course	Base Course	Total	Surface Course	Base Course	Total
1	B	3	6	9	4	6	10
2	C	3	6	9	3	6	9
3	Access Aprons	3	6	9	4	6	10

Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witzak [1975]

### 3.2 Metode Perancangan FAA (*Federal Aviation Administration*)

Metode perancangan lapis keras lentur bandar udara yang dikembangkan oleh FAA, tercantum dalam *Advisory Circular - Airport Pavement Design and Evaluation AC 150 / 5320 - 6C*. Perancangan lapis keras dengan metode FAA, diperhitungkan untuk masa pelayanan selama 20 tahun, tanpa adanya pemeliharaan yang cukup berarti, apabila tidak ada perubahan pesawat yang harus dilayani (beban pesawat sesuai dengan rancangan).

Langkah awal dalam menentukan tebal lapis keras, adalah menentukan pesawat rencana, yaitu pesawat terbesar yang direncanakan akan beroperasi di bandar udara yang menghasilkan total *equivalen annual departures* terbesar, sehingga didapat tebal lapis keras terbesar. Hal ini dikenal dengan konsep ekuivalen keberangkatan tahunan ( $EAD = \text{Equivalent Annual Departures}$ ).

EAD dari pesawat rencana, dihitung dari penjumlahan EAD dari setiap pesawat campuran, dengan menggunakan persamaan berikut ini. [R. Horonjeff dan F.X. McKelvey, 1994]

$$\text{Log } R_1 = \text{log } R_2 \left[ \frac{W_2}{W_1} \right]^{0.5} \quad (3-4)$$

dengan:  $R_1 =$  EAD pesawat rencana,

$R_2 =$  *Annual Departures* pesawat campuran,

$W_1 =$  beban satu roda pesawat rencana, dan

$W_2 =$  beban satu roda pesawat campuran.



Untuk jenis pesawat campuran, yang mempunyai konfigurasi roda pendaratan berlainan dengan pesawat rencana, maka perhitungan *Annual Departures* harus dikonversikan kedalam konfigurasi roda pendaratan pesawat rencana. Faktor konversi antara konfigurasi roda pendaratan pesawat campuran dikonversikan kedalam pesawat rencana, dirangkum dalam tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3.5 Faktor konversi ke pesawat rencana

Konversi Dari	Ke	Faktor Konversi
<i>Single wheel</i>	<i>Dual wheel</i>	0.8
<i>Single wheel</i>	<i>Dual tandem</i>	0.5
<i>Dual wheel</i>	<i>Dual tandem</i>	0.6
<i>Double dual tandem</i>	<i>Dual tandem</i>	1.0
<i>Dual tandem</i>	<i>Single wheel</i>	2.0
<i>Dual tandem</i>	<i>Dual wheel</i>	1.7
<i>Dual wheel</i>	<i>Single wheel</i>	1.3
<i>Double dual tandem</i>	<i>Dual wheel</i>	1.7

Catatan: Konfigurasi roda pendaratan utama dapat dilihat pada tabel 2.5

Sumber: R. Horonjeff dan F.X. McKelvey [1994]

Dalam perhitungan beban pesawat [Agus T.M., 1994], mengasumsikan bahwa beban pesawat (baik pesawat rencana maupun pesawat campuran), adalah berat pesawat lepas landas maksimum (MTOW) didukung oleh konfigurasi roda pendaratan utama (prosentase distribusi pada masing-masing *main gear* dan *nose gear*).

Beban roda pesawat rencana ( $W_1$ ) dan pesawat campuran ( $W_2$ ), didapat dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$W_1 = \% \text{ distribusi main gear} \times \text{MTOW pesawat rencana} \times \frac{1}{N} \quad (3-5)$$

$$W_2 = \% \text{ distribusi main gear} \times \text{MTOW pesawat campuran} \times \frac{1}{N} \quad (3-6)$$

Dengan:  $W_1$  = beban pesawat rencana,  
 $W_2$  = beban pesawat campuran,  
 MTOW = berat lepas landas maksimum (lbs.), dan  
 N = jumlah roda pada masing-masing main gear.

Untuk ketebalan lapis keras dengan pesawat berbadan lebar yang mempunyai konfigurasi roda pendaratan utama berbeda, seperti B-747, DC-10, dan L-1011, perhitungan berat lepas landas kotor dianggap seberat 300,000 lbs dengan roda pendaratan utama *dual tandem* dalam perhitungan *Equivalent Annual Departures*.

Hasil penyelidikan yang dilakukan FAA, menunjukkan bahwa beban roda pesawat, pada umumnya disebarkan pada daerah lateral dari permukaan lapis keras selama operasional. Demikian juga untuk sistem landas pacu, sifat-sifat aerodinamik pesawat akan menyalurkan beban yang sebenarnya pada lapis keras.

FAA memberikan toleransi untuk perubahan ketebalan lapis keras pada daerah permukaan yang berbeda [R. Horonjeff dan F.X. McKelvey, 1994], sebagai berikut:

1. Tebal penuh T dirancang untuk daerah kritis yang sering dilalui oleh roda pesawat, seperti parkir pesawat (*apron*), daerah tunggu (*holding area*), bagian tengah landas penghubung (*taxiway*), dan bagian tengah landas pacu (*runway*).
2. Tebal lapis keras 0.9T dirancang untuk daerah persimpangan antara landas penghubung dengan landas pacu.
3. Tebal lapis keras 0.7T dirancang untuk daerah yang jarang dilalui oleh roda pesawat (daerah transisi landas pacu), seperti bagian tepi luar landas penghubung, dan bagian tepi luar landas pacu.

Untuk tingkat EAD total yang lebih besar dari 25,000 [R. Horonjeff dan F.X. McKelvey, 1994], FAA memberikan toleransi untuk penambahan ketebalan lapis keras seperti yang dirangkum dalam tabel 3.6. Jika didapat EAD total diantara nilai-nilai yang terdapat pada tabel 3.6, maka persentase penambahan tebal lapis keras didapat dengan cara menginterpolasi dari nilai-nilai tingkat EAD total yang ada.

Tabel 3.6 Koreksi tebal lapis keras untuk tingkat  
EAD total > 25,000

Tingkat Total EAD ( $\Sigma R_i$ )	Persentase Ketebalan
50,000	104
110,000	108
150,000	110
200,000	112

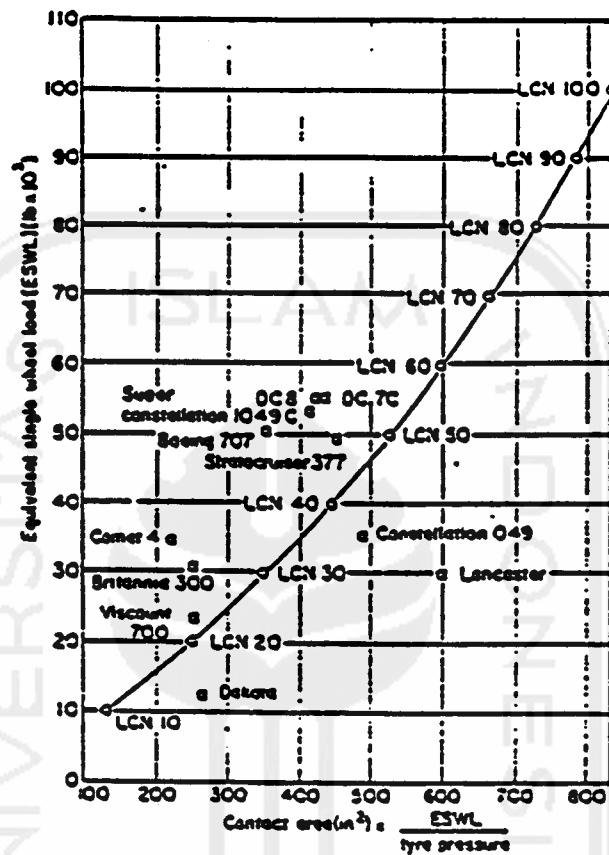
Sumber: R. Horonjeff dan F.X. McKelvey [1994]

### 3.3 Metode LCN (*Load Classification Number*)

Metode perancangan LCN (*Load Classification Number* = bilangan penggolongan beban) adalah metode perancangan lapis keras dan evaluasi yang pertama kali dikembangkan oleh *Air Ministry Directorate General of Work, The United Kingdom*. Kemudian metode ini diperbaiki oleh *Directorate of Civil Engineering Development of The United Kingdom, Department of The Evaluation of Aircraft Pavement*, dalam buletin *Design and Evaluation of Aircraft Pavement*, 1971. [Heru Basuki, 1985]

Dalam perancangan lapis keras dengan metode LCN, setiap pesawat dinyatakan dengan nilai LCN. Nilai LCN pesawat tergantung kepada konfigurasi roda pendaratan utama, tekanan roda pesawat, komposisi dan tebal lapis keras. Dengan demikian, bila nilai LCN lapis keras bandar udara lebih besar daripada nilai LCN pesawat, pesawat tersebut dapat mendarat, dan tinggal landas dengan aman.

Pada gambar 3.5 berikut ini, dapat dilihat kurva penggolongan beban standar.



Gambar 3.5 Kurva penggolongan beban standar

Sumber: M. Sargious [1975]

Kurva penggolongan beban standar pada gambar 3.5 diatas, dibuat untuk mendapatkan nilai LCN, dengan kapasitas lapis keras dapat dinyatakan sebagai bilangan tunggal. Kurva ini dibuat dengan menggambarkan titik-titik yang merupakan nilai tipikal dari urutan beban roda, dan bidang kontak dari pesawat pada sistem LCN, berdasarkan tabel 3.7 berikut ini.

Tabel 3.7 Hubungan antara beban roda tunggal, tekanan roda dan nilai LCN.

Beban Roda		Tekanan Roda		Nilai LCN
lbs.	Kg.	psi	kg/cm <sup>2</sup>	
100,000	45,400	120	8.44	100
90,000	40,800	115	8.09	90
80,000	36,300	110	7.74	80
70,000	31,800	105	7.38	70
60,000	27,200	100	7.03	60
50,000	22,700	95	6.68	50
40,000	18,100	90	6.33	40
30,000	13,600	85	5.98	30
20,000	9,100	80	5.62	20
10,000	4,500	75	5.27	10

Sumber: M. Sargious [1975]

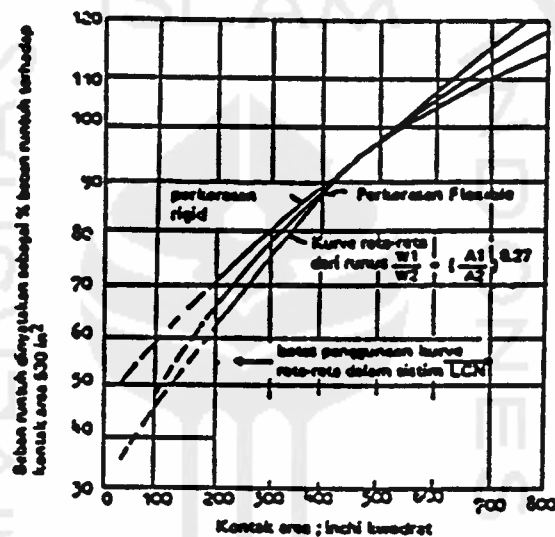
Kurva LCN pada gambar 3.7, dibuat dengan cara menggabungkan kurva penggolongan beban standar pada gambar 3.5 dan kurva hubungan bidang kontak dengan beban kegagalan untuk lapis keras tipikal pada gambar 3.6. Kurva LCN pada gambar 3.7 tersebut [Heru Basuki, 1985], didapat dengan cara sebagai berikut:

1. Garis bidang kontak roda, didapat dari nilai perbandingan beban dengan tekanan roda.

$$\text{Bidang kontak} = \frac{\text{beban}}{\text{tekanan roda}} \quad (3-7)$$

2. Satu beban pada setiap garis LCN langsung berasal dari kurva penggolongan beban standar. Misalkan: beban roda (*wheel load*) sebesar 66.72 KN, dengan tekanan roda 0,534 MN/m<sup>2</sup>, didapat nilai LCN sebesar 15.

3. Titik-titik lain pada setiap garis LCN, dihitung berdasarkan hasil *Bearing Plate Test* pada jenis lapis keras tegar dan lapis keras lentur dengan *contact area* antara 200 - 700 in<sup>2</sup>, yang berasal dari kurva hubungan beban runtuh dengan bidang kontak pada lapis keras tegar dan lapis keras lentur, seperti pada gambar 3.6 berikut ini.



Gambar 3.6 Kurva hubungan bidang kontak-beban kegagalan

Sumber: Heru Basuki [1985]

Secara matematis, hubungan beban runtuh dengan bidang kontak pada lapis keras tegar dan lapis keras lentur, dibuat dengan persamaan berikut.

$$\frac{W_1}{W_2} = \left[ \frac{A_1}{A_2} \right]^{0.27} \quad (3-8)$$

Dengan:  $W_1$  = beban runtuh pada lapis keras tegar (lbs),

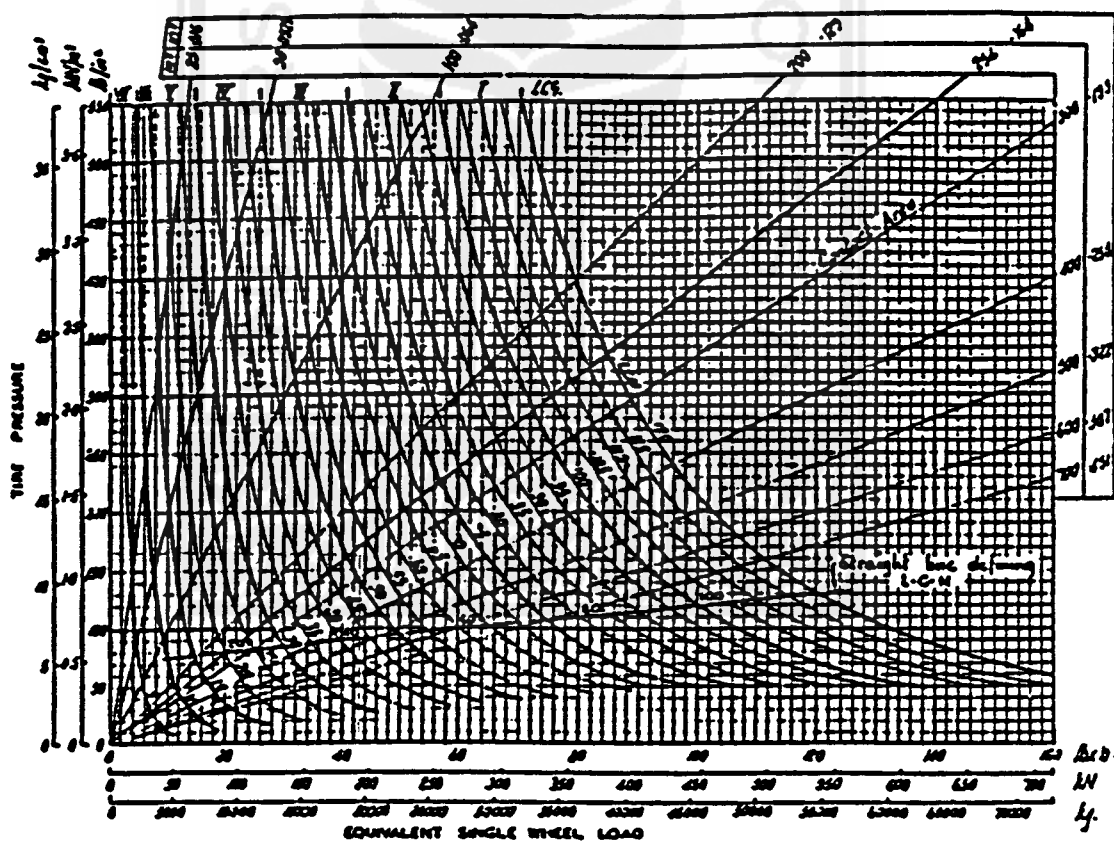
$W_2$  = beban runtuh pada lapis keras lentur (lbs),

$A_1$  = luas daerah kontak ban pada lapis keras tegar (in<sup>2</sup>),

$A_2$  = luas daerah kontak ban pada lapis keras lentur (in<sup>2</sup>),

4. Garis titik-titik merupakan penerusan sistem LCN secara coba-coba, untuk menampung bidang kontak yang lebih kecil dari 200 inci<sup>2</sup> berdasarkan pengujian beban pada lapis keras dengan bidang kontak yang kecil.

Nilai LCN dinyatakan dengan ESWL, tekanan roda, dan bidang kontak, dapat dilihat pada gambar 3.7 berikut ini.



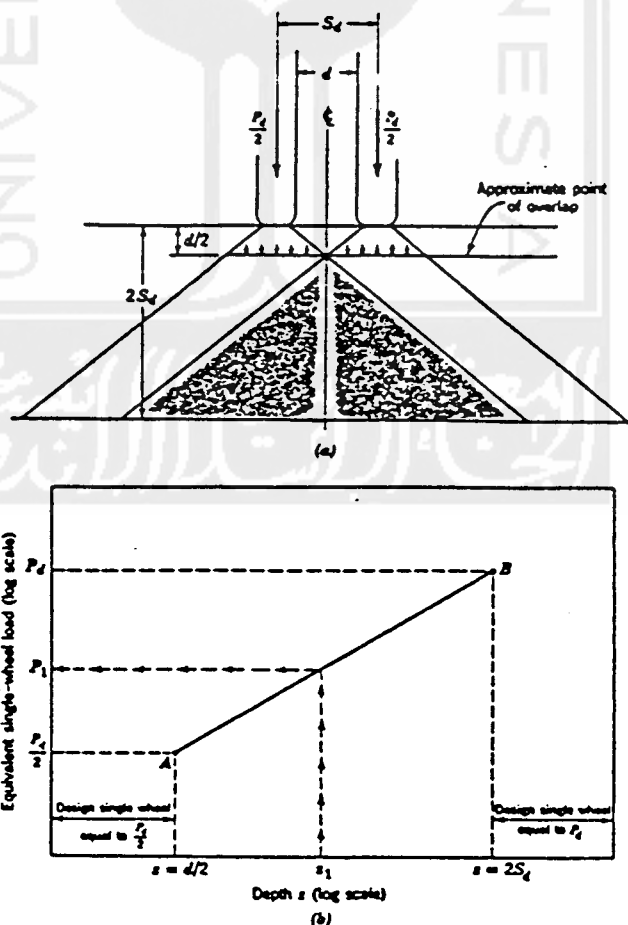
Gambar 3.7 Nilai LCN dinyatakan dengan ESWL, tekanan roda dan bidang kontak

Sumber: M. Sargious [1975]



Nilai LCN pada gambar 3.7, hanya berlaku untuk pesawat dengan beban roda tunggal, sedangkan untuk pesawat dengan beban roda ganda atau lebih, perlu dikonversikan terlebih dahulu kedalam ESWL (*Equivalent Single Wheel Load* = beban roda tunggal ekuivalen). Beban roda tunggal ekuivalen akan mempunyai beban dan tekanan roda yang sama dengan pesawat roda tunggal, sehingga beban ESWL menghasilkan tegangan yang lebih maksimum, jika dibandingkan dengan tegangan akibat roda tunggal itu sendiri.

Analisis ESWL untuk pesawat dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual wheel*, dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut ini.



Gambar 3.8 Analisis ESWL untuk pesawat *dual wheel*

a. tekanan roda pada lapis keras    b. Analisis ESWL untuk pesawat *dual wheel*

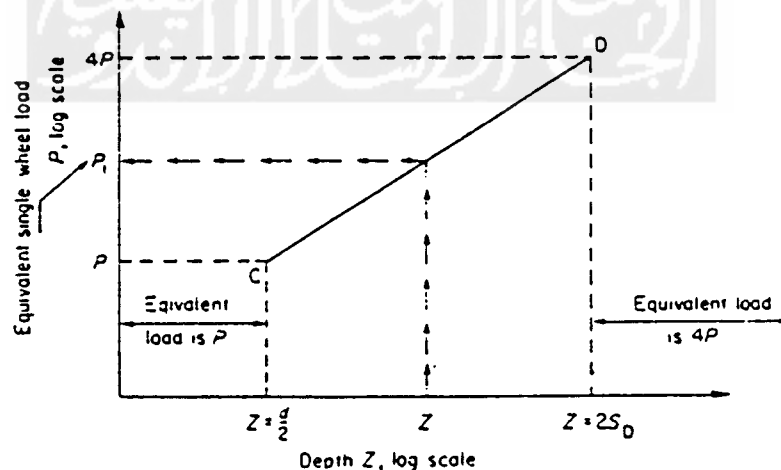
Sumber: E.J. Yoder dan M.W. Witczak [1975]



Analisis ESWL pada gambar 3.8, dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Titik A ( $\frac{P_d}{2}, d/2$ ) adalah tekanan akibat beban roda tunggal ( $\frac{P_d}{2}$ ) terjadi sampai pada kedalaman  $d/2$  ( $d$  = jarak tepi dalam kedua roda).
- Titik B ( $P_d, 2S_d$ ) adalah tekanan akibat beban roda ganda ( $P_d$ ) terjadi sampai pada kedalaman  $2S_d$  ( $S_d$  = jarak roda dari sumbu ke sumbu).
- Garis AB, adalah beban tunggal yang bekerja dinyatakan dalam ekuivalen. Diasumsikan bahwa beban tunggal ekuivalen bekerja pada kedalaman  $Z_1$  (antara  $d/2$  sampai  $2S_d$ ). Dengan menarik garis dari titik  $Z_1$  (kedalaman) kemudian diplotkan kedalam titik beban, maka didapatkan beban ekuivalen tunggal ( $P_1$ ).

Untuk pesawat dengan konfigurasi roda pendaratan utama *dual tandem*, analisis ESWL dilakukan seperti dalam gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9 Analisis ESWL untuk pesawat *dual tandem*

Sumber: M. Sargious [1975]

Analisis ESWL pada gambar 3.9, dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Titik C ( $P, d/2$ ) adalah tekanan akibat beban roda tunggal ( $P$ ) terjadi sampai pada kedalaman  $d/2$  ( $d$  = jarak tepi dalam kedua roda).
- Titik D ( $4P, 2S_d$ ) adalah tekanan akibat beban roda ganda ( $P_d$ ) terjadi sampai pada kedalaman  $2S_d$  ( $S_d$  = jarak roda dari sumbu ke sumbu).
- Garis AB, adalah beban tunggal yang bekerja dinyatakan dalam ekuivalen. Diasumsikan bahwa beban tunggal ekuivalen bekerja pada kedalaman  $Z$  (antara  $d/2$  sampai  $2S_d$ ). Dengan menarik garis dari titik  $Z$  (kedalaman) kemudian diplotkan kedalam titik beban, maka didapatkan beban ekuivalen tunggal ( $P_1$ ).

