ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนทฤษฎีและรายงานการทดสอบในอดีต

2.1 การประเมินด้วยค่า ซีบีอาร์ (Evaluation by CBR value)

วิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วๆไปมีดังนี้

2.1.1 วิธีของ Corps of Engineers

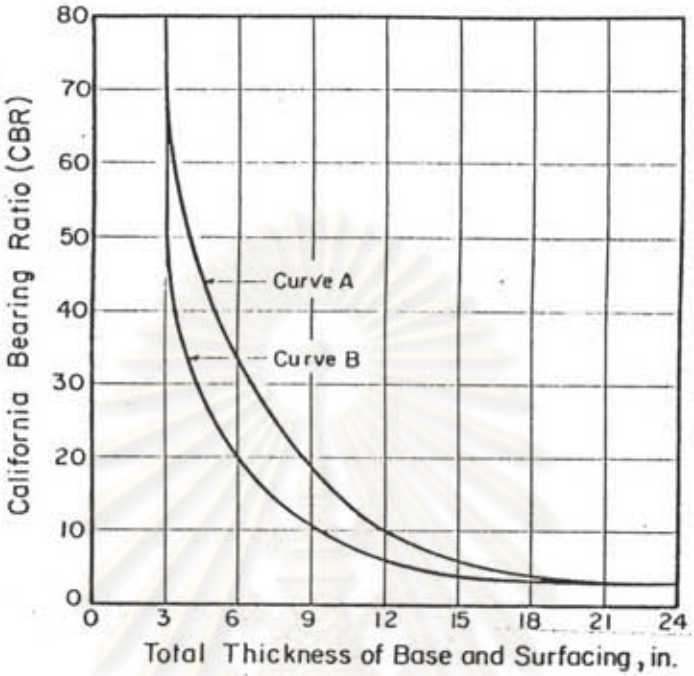
วิธีการออกแบบโดยใช้ค่า CBR ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย California Division of Highway ในปี ค.ศ. 1928 โดยอาศัยผลจากการสำรวจและทดสอบพบว่าการวิบัติของชั้นทาง (Pavement) จะเกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ

1. การวิบัติเนื่องจากการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral Displacement) ซึ่งเกิดเนื่องจากการดูดซึมน้ำของชั้นทาง
2. การวิบัติเนื่องจากความแตกต่างของการทรุดตัว (differential settlement) ของวัสดุภายใต้ชั้นทาง
3. การวิบัติเนื่องจากค่าการทรุดตัวมากเกินไป (Excess Deflection)

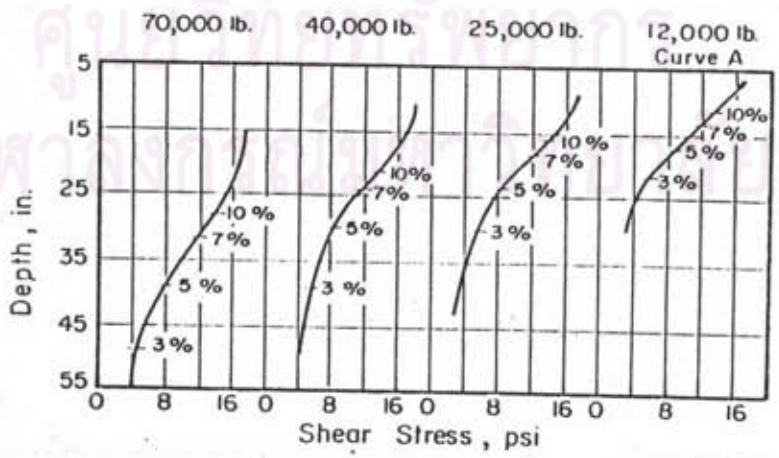
ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบพบว่าชั้นผิวทางที่เป็นหินคลุก(Crusher-run material) ควรจะมีค่า CBR เท่ากับ 100 %

จากการนำผลการทดสอบตัวอย่างดินภายใต้ชั้นทางที่เกิดการวิบัติและไม่วิบัติ นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีบีอาร์ (CBR) และความหนาของชั้นทางดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจากการวิเคราะห์และทดสอบพบว่ากราฟ "A" ใช้แทนเครื่องบินที่มีน้ำหนักล้อ 12,000 ปอนด์ และกราฟ "B" สำหรับเครื่องบินที่มีน้ำหนัก ล้อ 7,000 ปอนด์

เมื่อเครื่องบินได้มีการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำหนักมากขึ้นจึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีอีลาสติกเพื่อขยายกราฟออกไปสำหรับเครื่องบินที่มีน้ำหนักล้อมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยกำหนดให้หน่วยแรงที่ผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ 60 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว และพื้นที่สัมผัสเป็นรูปวงกลม จากรูปที่ 2.1 กราฟ "A" ที่ค่า ซีบีอาร์ 3 , 5 , 7 และ 10 % จะหาค่าความหนาของชั้นทางได้ จากทฤษฎีอีลาสติกสามารถหาค่าแรงเฉือนที่ความหนาต่างๆ นี้ได้ เช่น น้ำหนักล้อ 12,000 ปอนด์ ค่าซีบีอาร์ 3 % แรงเฉือนมีค่า 5 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับค่าความหนาของชั้นพื้นทางและชั้นผิวทาง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและแรงเฉือนโดยทฤษฎีอีลาสติก (Corps of Engineers)

เมื่อต้องการขยายข้อมูลออกไปที่น้ำหนักล้อ เท่ากับ 25,000 ปอนด์ โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก หาค่าความหนาของชั้นทางที่ใช้ค่าแรงเฉือน 5 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว ซึ่งก็คือค่า ซีบีอาร์ 3 % นั่นเอง โดยวิธีการนี้จะสามารถหาค่าความหนาของชั้นทางและค่าซีบีอาร์ที่ความหนาต่างๆ ของน้ำหนักเครื่องบินที่ต้องการได้ โดยนำไปแสดงให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และความหนาดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.1.1.1 น้ำหนักเทียบเท่าน้ำหนักล้อเดี่ยว (Equivalent Single wheel load)

เมื่อมีการพัฒนาชนิดของเครื่องบินมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้น รูปร่างของ landing gear ก็เปลี่ยนไปเป็นล้อคู่ (dual gear) และเพลาคู่ (dual tandem gear) Corps of Engineers จึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับรูปร่างของล้อและเพลา

สาเหตุที่สำคัญของการวิบัติของชั้นทางก็คือการเคลื่อนตัวของวัสดุภายใต้ชั้นทางซึ่งก็คือ ความเค้น (strain) หรือ การทรุดตัว (deflection) ซึ่งจากทฤษฎีของบูซิเนสค์ (Boussinesg's Theory) สามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักล้อเดียวที่ทำให้เกิดค่าการทรุดตัวมากที่สุด (Maximum deflection) เท่ากับค่าการทรุดตัวจากน้ำหนักของเครื่องหลายล้อ (Multiple wheel load) จะทำให้เกิดความเค้น (strain) ที่เท่ากับหรือมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องที่มีหลายล้อ

วิธีการคำนวณหาค่า Equivalent Single wheel load (ESWL) โดยให้พื้นที่สัมผัสของล้อเดียวมีค่าเท่ากับผิวสัมผัสของ ESWL

$$W = prF/Em \qquad \text{---------(2.1)}$$

โดย p = หน่วยแรงที่ผิวสัมผัส

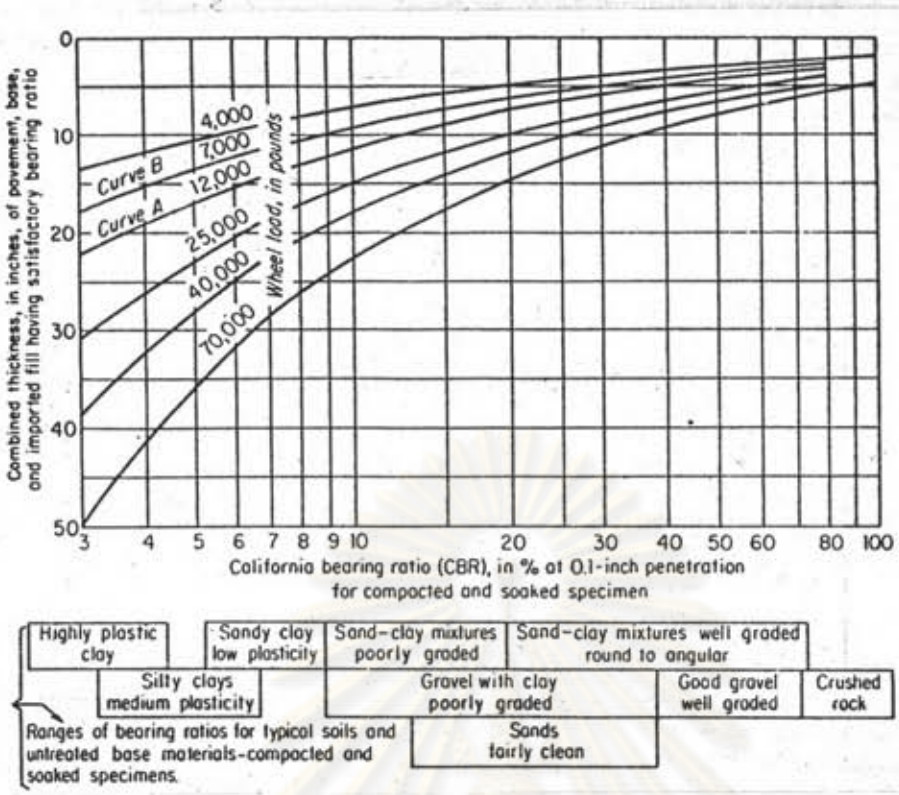
E_m = โมดูลัสการยืดหยุ่นของดิน (modulus of elasticity)

F = แฟคเตอร์การทรุดตัว (Deflection Factor) ซึ่งได้จากรูปที่ 2.4

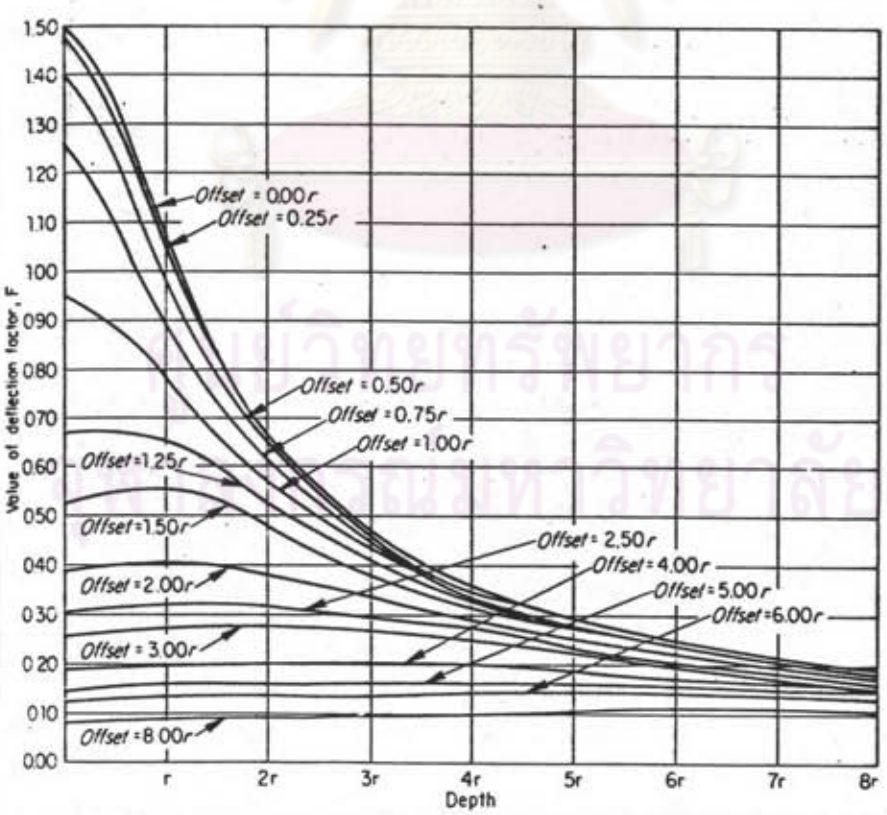
ให้ S = หมายถึง ล้อเดี่ยว (Single Wheel)

D = หมายถึง ล้อคู่ (dual wheel)

$$W_s = \frac{rs \times ps \times Fs}{Em} \quad \text{และ} \quad W_d = \frac{rd \times pd \times Fd}{Em}$$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาของ Pavement ที่น้ำหนักล้อเดี่ยวขนาดต่าง ๆ (Corps of Engineers)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deflection Factor, F และความลึก

เมื่อ $W_s = W_d$ และ $r_s = r_d$

ดังนั้น $p_s/p_d = F_d/F_s$

พื้นผิวสัมผัสของล้อเดี่ยวมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวสัมผัสของล้อใดล้อหนึ่งของเครื่องหลายล้อ

$$P_s/P_d = F_d/F_s \qquad \text{---------} (2.2)$$

โดยค่า แฟคเตอร์การทรุดตัว (F) จากรูปที่ 2.4 จะใช้ค่าที่ความลึกเท่ากับ 3R ในกรณีที่เครื่องชนิดหลายล้อจะต้องหาตำแหน่งที่ให้ค่าการทรุดตัวมากที่สุด

2.1.1.2 **ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์และความหนาของชั้นทาง**

จากการศึกษาของ Corps of Engineers ในปี ค.ศ. 1958 ข้อมูลที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีบีอาร์ และความหนาของชั้นทางดังนี้

$$t = \sqrt{\frac{P - A}{8.1(CBR)\pi}} \qquad \text{---------} (2.3)$$

เมื่อ t = ความหนาที่ออกแบบ , นิ้ว

P = น้ำหนักล้อเดี่ยว , ปอนด์

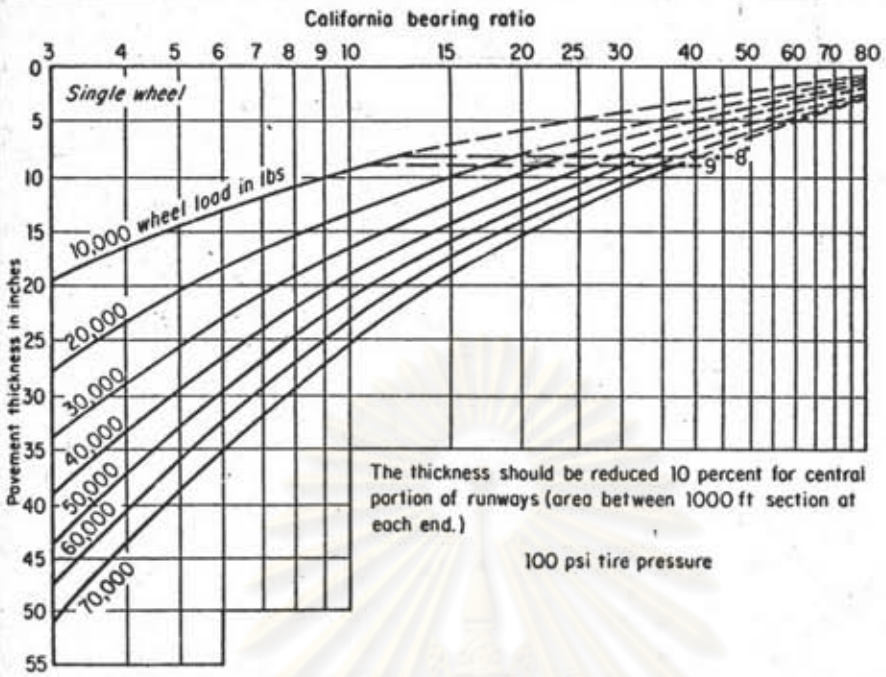
A = พื้นที่สัมผัสของล้อ , ตารางนิ้ว

จากสมการ 2.3 นี้ สามารถนำไปสร้างกราฟสำหรับออกแบบได้โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งจากรูปที่ 2.5 และ 2.6 ในกรณีที่ออกแบบทางวิ่งความหนาจะลดลง 10 เปอร์เซนต์

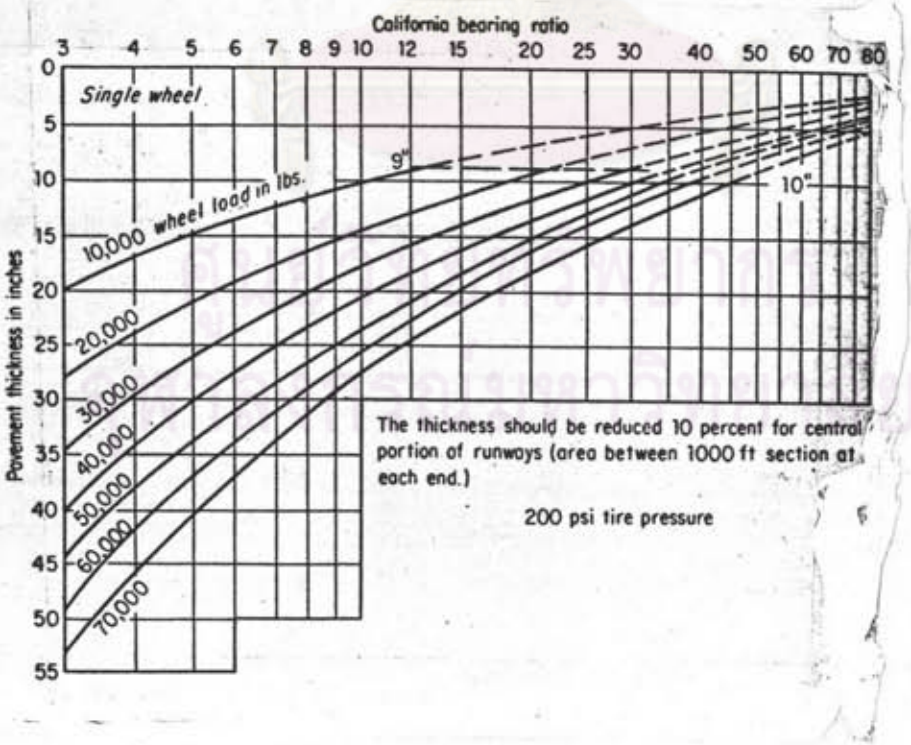
จากการศึกษาต่อมาพบว่าปริมาณการจราจรและลักษณะของล้อมีผลต่อการออกแบบค่าความหนาชั้นทาง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้

$$t = f\sqrt{\frac{ESWL - A}{8.1(CBR)\pi}} \qquad \text{---------} (2.4)$$

โดย $f = 0.23 \log C + 0.15$



รูปที่ 2.5 กราฟสำหรับออกแบบทางวิ่งและทางขับชนิดยืดหยุ่นสำหรับเครื่องบินล้อเดี่ยว (Corps of Engineers)



รูปที่ 2.6 กราฟสำหรับออกแบบทางวิ่งและทางขับ ชนิดยืดหยุ่นสำหรับเครื่องบินล้อเดี่ยว (Corps of Engineers)

ESWL = น้ำหนักเทียบเท่าล้อเดี่ยว (Equivalent Single wheel load)

C = ปริมาณเป็นจำนวนครั้งที่แต่ละจุดบนเลนของทางวิ่งได้รับความเครียดมากที่สุดจากน้ำหนักล้อ (Coverage)

ซึ่งจากสมการที่ 2.4 นี้ สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีบีอาร์ และความหนาสำหรับเครื่องบินไอพ่น (Jet aircraft) ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ในปัจจุบันวิวัฒนาการของเครื่องบินได้พัฒนาไปจนมีเครื่องบินที่มีน้ำหนักมากๆ ล้อจำนวนหลายล้อและมีรูปร่างต่างๆ ซึ่งในการออกแบบที่จำนวนกระทำซ้ำ (Repetition) มากๆ จะทำให้ได้ความหนาของชั้นทางมากเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการแก้ไขสมการที่ 2.4 ให้เหมาะสมใหม่ คือ

$$t = \alpha_i \sqrt{\frac{ESWL}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi}} \qquad \text{--------- (2.5)}$$

โดย α_i = แฟคเตอร์ของน้ำหนักกระทำซ้ำ (Load Repetition Factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนล้อที่ main landing gear ดังรูปที่ 2.8

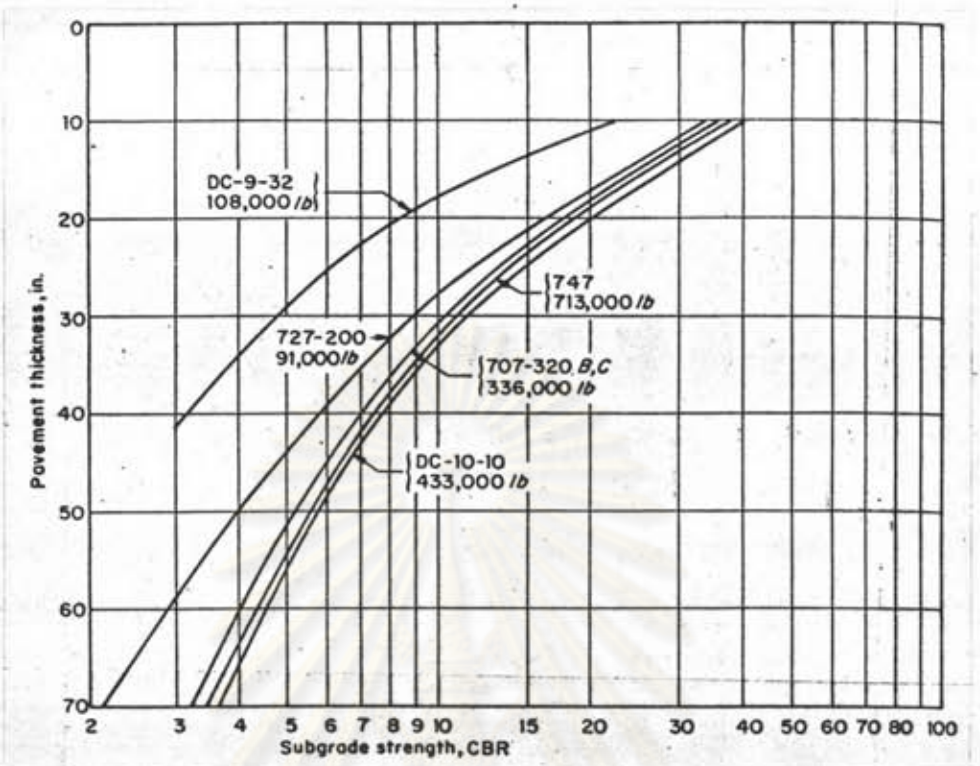
จากรูปที่ 2.8 ค่าแฟคเตอร์ของน้ำหนักกระทำซ้ำจะขึ้นอยู่กับค่า coverage ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า coverage และจำนวนเที่ยวของเครื่องที่ผ่าน (Passes) แสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

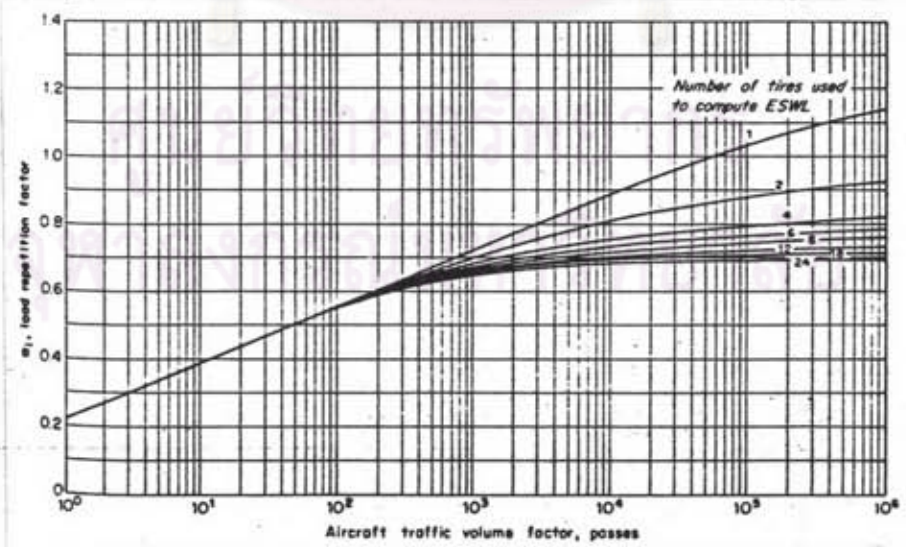
ชั้นผิวทาง ควรใช้วัสดุจำพวก บิทูมินัส (Bituminous) ความหนาไม่น้อยกว่า 3 นิ้ว เพื่อที่จะสามารถถ่ายความเค้นไปยังชั้นพื้นทางไม่มากจนเกินไปโดยไม่เกิดการแตกร้าว

ชั้นพื้นทางซึ่งอยู่ใต้ชั้นผิวทางวัสดุที่ใช้ควรจะเป็นหินคลุก (Crushed Stone) มีค่า CBR อยู่ระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซนต์ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักเครื่องบิน ความหนาน้อยที่สุดไม่น้อยกว่า 6 นิ้ว ตารางที่ 2.2 แสดงค่า CBR สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นชั้นพื้นทาง

ชั้นรองพื้นทางมีค่า CBR อยู่ระหว่าง 20-50 เปอร์เซ็นต์ คุณสมบัติอื่นๆ ของชั้น



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาของ Pavement สำหรับเครื่องบินไอพ่นชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 ความสำหรับระหว่าง Load Repetition Factor และปริมาณการจราจรของเครื่องบิน

(Materways Experiment Station, Corps of Engineers)

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของ **PASS-TO-COVERAGE** สำหรับพื้นผิวชนิดยืดหยุ่น

DESIGN CURVE	PASS-TO-COVERAGE RATIO
SINGLE WHEEL	5.18
DUAL WHEEL	3.48
DUAL TANDEM	1.84
B-747	1.85
DC 10-10	1.82
DC 10-30	1.69
L-1011	1.81

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุชั้นพื้นทาง

DESIGN CBR FOR BASE COURSE

Type	Design CBR
Graded crushed aggregate	100
Water-bound macadam	100
Dry-bound macadam	100
Bituminus intermidiate and surface courses.central plant. hot mix	100
Limerock	80
Stabilized aggrate	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองพื้นทางแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

2.1.2 วิธีของ Federal Aviation Administration (FAA)

วิธีการออกแบบความหนาของพื้นผิวสนามบินแบบยืดหยุ่นของ FAA ในปัจจุบันจะใช้วิธีการของ California Bearing Raito (CBR) ซึ่งวิธีการ CBR นี้ เป็นวิธีแบบเอมไพริคอล (Empirical) คือ อาศัยจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและนำมาหาความสัมพันธ์กับการรับน้ำหนัก FAA ได้จัดทำกราฟสำหรับการออกแบบหาความหนาของพื้นผิวแบบยืดหยุ่น คือ ความหนาของชั้นผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทาง ซึ่งเป็นความหนาสำหรับรับน้ำหนักของเครื่องบินที่กำหนดให้ และจากกราฟนี้จะแสดงค่าต่ำสุดของชั้นพื้นทาง และผิวทางที่ต้องการไว้ด้วย

แต่เดิมนั้น FAA จะออกแบบโดยวิธีจำแนกดินชั้นดินเดิม(Soil Classification) โดยจะพิจารณาร่วมกับลักษณะการระบายน้ำบนผิวดิน ระดับน้ำใต้ดิน และการแข็งตัวของน้ำใต้ดินในประเทศที่มีอากาศหนาวจัดจนน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ใช้ในการพิจารณาความหนาของพื้นสนามบิน โดยมิได้ทดสอบหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักแต่อย่างไรเลย

2.1.2.1 การพิจารณาเครื่องบินที่ใช้ในการออกแบบ

1. น้ำหนักเครื่องบิน ใช้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดขณะเครื่องบินขึ้น (Maximum Take-off Weight) โดยกำหนดให้ 95 % ของน้ำหนักทั้งหมดลงที่เพลาหลัง (Main Gear) และน้ำหนักอีก 5 % ลงที่เพลาหน้า (Nose Gear)

2. ชนิดและระยะห่างของเพลา (Landing Gear Type and Geometry) การจัดชนิดของเครื่องบินจะจัดตามชนิด และระยะห่างของเพลาซึ่งจะบอกถึงการกระจายของน้ำหนักเครื่องบินไปยังพื้นทางวิ่ง โดยที่กราฟที่ใช้ในการออกแบบของ FAA นี้จะมีข้อกำหนดของระยะห่างของล้อและเพลาดังนี้

- ล้อเดี่ยว ไม่มีข้อกำหนดใดๆ
- ล้อคู่ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของล้อคู่สำหรับเครื่องบินขนาดเบาเท่ากับ 20 นิ้ว สำหรับเครื่องบินหนักเท่ากับ 34 นิ้ว
- เพลาคู่ (Dual Tandem) สำหรับเครื่องบินขนาดเบาระยะห่างระหว่าง

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุชั้นรองพื้นทาง

Subbase Requirement

Material	Max.CBR	Maximum Permissible Value Size (in.)	Gradation requirements,% passing NO.10	No.200	LL	PI
Subbase	50	3	50	15	25	5
Subbase	40	3	80	15	25	5
Subbase	30	3	100	15	25	5
Select material	20	3[b]	-	25[b]	35[b]	12[b]

[b] Suggested limits

From TM 5-824-2(AFM 88-6,Chapter 2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์กลางของล้อเท่ากับ 20 นิ้ว ระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากับ 45 นิ้ว สำหรับเครื่องบินหนักระยะห่างระหว่างล้อเท่ากับ 30 นิ้ว ระหว่างเพลาเท่ากับ 55 นิ้ว

- เครื่องบินชนิดลำตัวกว้าง (wide body) เช่น B-747 DC-10 , L-1011 จะใช้ข้อกำหนดของเครื่องแบบเพลาคู่

โดยกำหนดแรงดันลมของล้อมีค่าระหว่าง 75 ถึง 200 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว (516 ถึง 1380 kpa) หากน้ำหนักเครื่องบินมากขึ้นผลของแรงดันลมต่อความหนาของทางวิ่งจะน้อยลง และถ้ากำหนดแรงดันลม 200 psi จะให้ค่าที่ปลอดภัย

ตารางที่ 2.4 ถึง 2.6 แสดงค่าน้ำหนัก แรงดันลมและระยะห่างระหว่างล้อและเพลาของเครื่องบินชนิดล้อเดี่ยว ล้อคู่และเพลาคู่

3. ปริมาณการจราจร จากการเก็บข้อมูลปริมาณการจราจรในอดีตนำมาคาดคะเนปริมาณ การจราจรในปัจจุบันและอนาคต สำหรับแผนการหลักของสนามบิน (Airport Master Plan) ซึ่งเครื่องบินแต่ละชนิดที่มาใช้สนามบินจะมีขนาดและจำนวนล้อ น้ำหนักบรรทุกไม่เท่ากัน โดยนำข้อมูลเหล่านี้มากำหนดชนิดและแบบของเครื่องบินที่ใช้ออกแบบ (Design Aircraft) เพื่อกำหนดความหนาของโครงสร้างของสนามบิน

2.1.2.2 การพิจรณา Equivalent Annual Departure ของเครื่องบินที่ใช้ออกแบบเนื่องจากปริมาณการจราจรที่ขึ้น-ลงสนามบินมีหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทมีน้ำหนักบรรทุกและจำนวนเพลาไม่เท่า ดังนั้นผลของการจราจรจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเดียวกันกับเครื่องบินที่ใช้ออกแบบ ซึ่งเป็นเครื่องบินที่ให้ค่าความหนาของทางวิ่งมากที่สุด ในขั้นแรกเครื่องบินแต่ละชนิดจะต้องถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปมาตรฐาน น้ำหนักล้อเดียวกันกับเครื่องบินที่ใช้ โดยใช้แฟคเตอร์ในตารางที่ 2.7 ขั้นที่สองหลังจากที่เครื่องบินแต่ละชนิดถูกเปลี่ยนให้อยู่ในมาตรฐานน้ำหนักเดียวกันแล้ว ต่อไปก็หาค่า Equivalent Annual Departures ของเครื่องบินที่ใช้ออกแบบ จากสมการดังต่อไปนี้

$$\log R_1 = \log R_2 \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \text{--------} (2.6)$$

โดยที่

016201

ตารางที่ 2.4 แสดงน้ำหนักและแรงดันลมของเครื่องชนิดล้อเดี่ยว

Gross Weight.		Tire Pressure	
lbs	(kg)	psi	(MN/m)
30,000	(13,600)	75	(0.52)
45,000	(20,400)	90	(0.62)
60,000	(27,200)	105	(0.72)
75,000	(34,000)	120	(0.83)

ตารางที่ 2.5 แสดงน้ำหนักแรงดันลมและระยะระหว่างล้อของเครื่องชนิดล้อคู่

Gross Weight.		Tire Pressure		Dual Spacing	
lbs	(kg)	psi	(MN/m)	in.	(cm)
50,000	(22,700)	80	(0.55)	20	(51)
75,000	(34,000)	110	(0.76)	21	(53)
100,000	(45,400)	140	(0.97)	23	(58)
150,000	(68,000)	160	(1.10)	30	(76)
200,000	(90,700)	200	(1.38)	34	(86)

ตารางที่ 2.6 แสดงน้ำหนักแรงดันลม ระยะระหว่างล้อและเพลาของเครื่องชนิดเพลาคู่

Gross Weight.		Tire Pressure		Dual Spacing		Tandem Spacing	
lbs	(kg)	psi	(MN/m^2)	in.	(cm)	in.	(cm)
100,000	(45,400)	120	(0.83)	20	(51)	45	(114)
150,000	(68,000)	140	(0.97)	20	(53)	45	(114)
200,000	(90,700)	160	(1.10)	21	(58)	46	(117)
300,000	(136,100)	180	(1.24)	26	(76)	51	(130)
400,000	(181,400)	200	(1.38)	30	(76)	55	(140)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 แฟคเตอร์ใช้เปรียบเทียบหาค่าน้ำหนักล้อของเครื่องบินแบบต่างๆ ให้เป็นเครื่องที่ใช้ออกแบบ

Actual aircraft landing gear	Design aircraft landing gear	Multiplier for actual departures to obtain equivalent departures
Single wheel	Dual wheel	0.8
	Dual tandem	0.5
Dual wheel	Single wheel	1.3
	Dual tandem	0.6
Dual tandem	Single wheel	2.0
	Dual wheel	1.7
Double dual tandem	Dual wheel	1.7
	Dual tandem	1.0

SOURCE: Federal Aviation Administration [7].

ตารางที่ 2.8 Equivalency Factor ใช้เปรียบเทียบวัสดุปรับปรุงคุณภาพของชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง

Recommended Equivalency Factors for Stabilized Base and Subbase Materials in Pavements

Material*	Equivalency factor range†	
	Subbase	Base
Bituminous surface course	1.7–2.3	1.2–1.6
Bituminous base course	1.7–2.3	1.2–1.6
Cold laid bituminous base course	1.5–1.7	1.0–1.2
Mixed in-place base course	1.5–1.7	1.0–1.2
Cement treated base	1.6–2.3	1.2–1.6
Soil cement base course	1.5–2.0	NA
Crushed aggregate base course	1.4–2.0	1.0‡
Subbase course	1.0§	NA

* See FAA AC 150/5370-10 for specifications.

† Divide granular material thickness by equivalency factor to obtain stabilized material thickness.

‡ A CBR of 20 was used to establish relative factors.

§ A CBR of 80 was used to establish relative factors.

NA = Not applicable.

SOURCE: Federal Aviation Administration [7].

R_1 = จำนวนเทียบเท่าของการบินขึ้นต่อปี ของเครื่องบินที่ใช้ออกแบบ (Equivalent annual departures by the design aircraft)

R_2 = จำนวนเทียบเท่าของการบินขึ้นต่อปี ของเครื่องบินซึ่งอยู่ในรูปของเครื่องบินที่ออกแบบ

W_1 = น้ำหนักล้อของเครื่องบินที่ใช้ออกแบบ

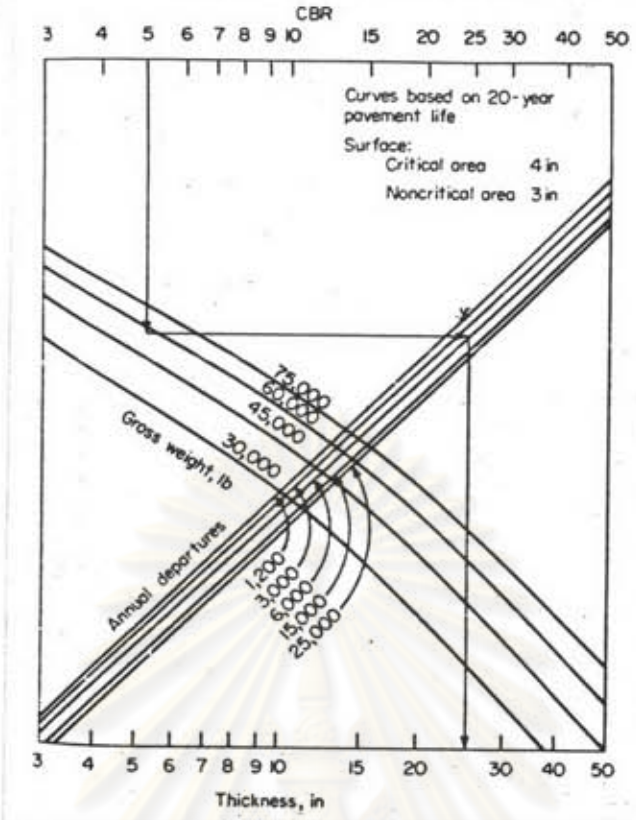
W_2 = น้ำหนักของเครื่องบินที่ต้องการ

เครื่องบินชนิดลำตัวกว้าง เช่น โบอิ้ง (Boeing) 747 , DC-10 Airbus 300 จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากลักษณะของ Landing gear แตกต่างจากเครื่องบินประเภทอื่น ดังนั้นจึงกำหนดให้เครื่องบินแบบลำตัวกว้างมีน้ำหนัก เท่ากับ 300,000 ปอนด์ (136,100 กิโลกรัม) และเป็นเครื่องชนิดเพลาคู่ (Dual Tandem)

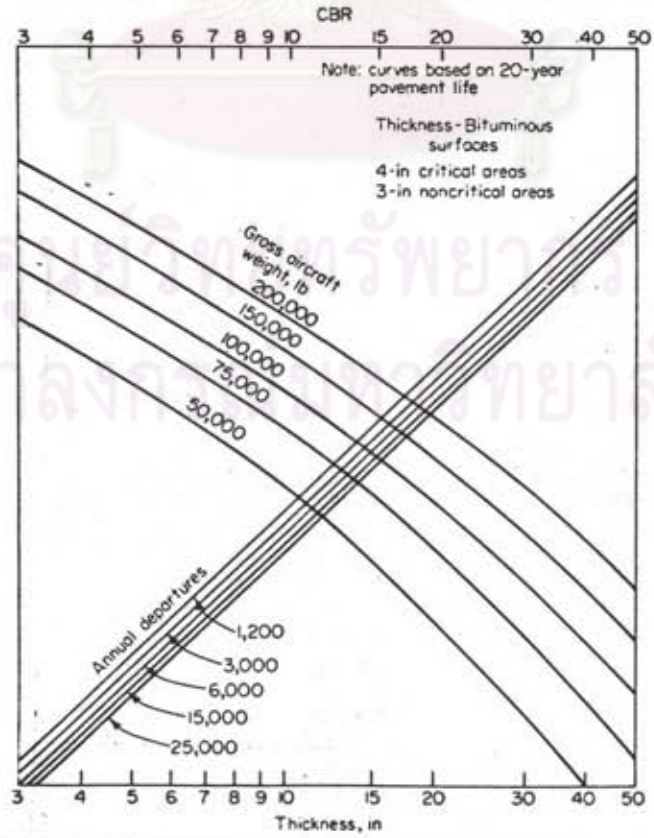
2.1.2.3 การออกแบบพื้นสนามบินแบบยืดหยุ่น

การใช้กราฟ (Design Curve)สำหรับการออกแบบจะต้องให้ค่า CBR ของชั้นดินเดิม (Subgrade) CBR ของชั้นพื้นทาง น้ำหนักของเครื่องบินที่ออกแบบและจำนวนการบินขึ้นต่อปีของเครื่องบินที่ออกแบบโดยใช้รูปที่ 2.9 ถึง 2.12 สำหรับเครื่องบินชนิดล้อเดี่ยว ล้อคู่ เพลาคู่ และเครื่องบินชนิดลำตัวกว้าง เช่น โบอิ้ง 747 ในการหาความหนาของของทางวิ่งสนามบิน และจากรูปที่ 2.13 แสดงถึงค่าความหนาต่ำสุดของชั้นพื้นทางที่ต้องการ พื้นที่วิกฤต และไม่วิกฤต (Critical and Non-critical Area) จากรูปที่ใช้ออกแบบรูปที่ 2.9 ถึง 2.12 ใช้สำหรับการพิจารณาพื้นทางวิ่งสนามบินที่อยู่ในบริเวณวิกฤตมีความหนา T ส่วนบริเวณที่ไม่วิกฤตจะใช้ความหนาเพียง 0.9 T ของค่าที่หาได้จากรูป ส่วนความหนาของผิวทางวิ่ง สำหรับบริเวณที่วิกฤตและไม่วิกฤตได้แสดงอยู่ในรูปที่ใช้ออกแบบแล้ว ในรูปที่ 2.14 แสดงถึงความหนาที่ต้องการสำหรับบริเวณต่างๆ ของสนามบิน

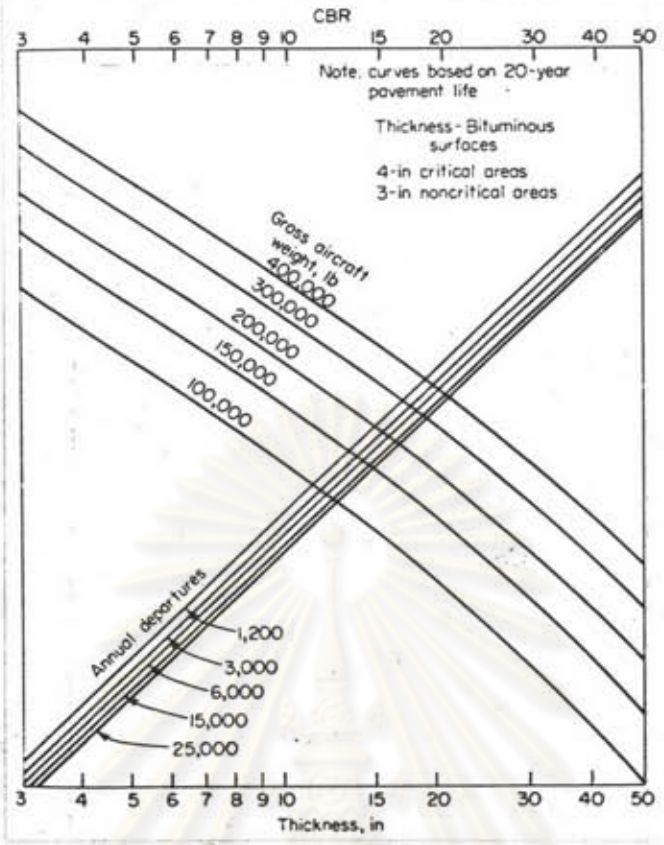
2.1.2.4 การปรับปรุงคุณภาพของชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง (Stabilized Subbase-Base) พื้นทางวิ่งที่ออกแบบให้เครื่องบินหนักมากมาใช้ เช่น เครื่องหนักตั้งแต่ 100,000 ปอนด์ (45,350 กิโลกรัม) ขึ้นไป ชั้นพื้นทางและรองพื้นทางจะต้องใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีมาก เช่น หินคลุกที่มีค่า CBR ในสภาพแช่น้ำ (Soaked) 100 % ใช้สำหรับ



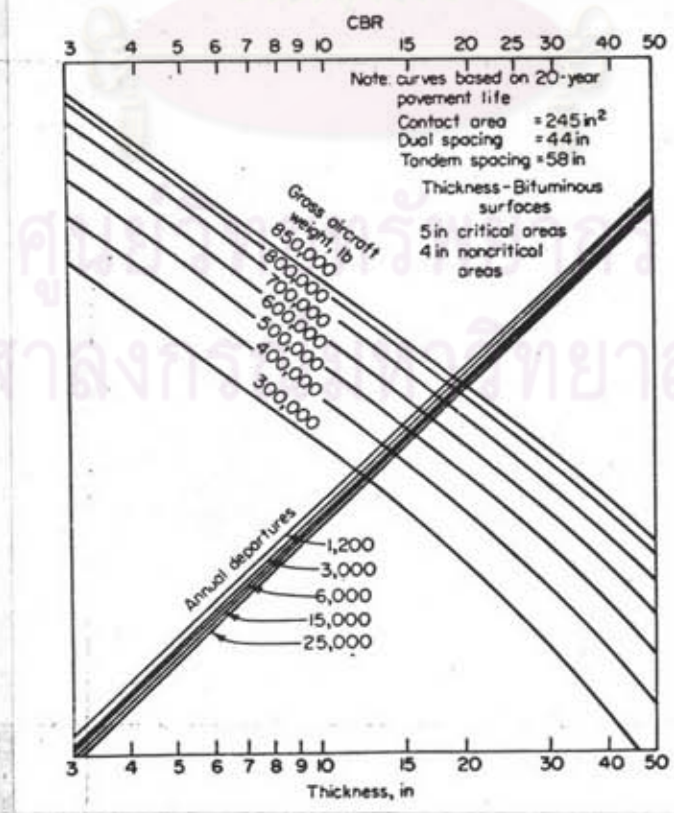
รูปที่ 2.9 กราฟออกแบบสำหรับ Pavement ชนิดยืดหยุ่นของเครื่องบินล้อเดียว (Ferderal Aviation Administration)



รูปที่ 2.10 กราฟออกแบบสำหรับ Pavement ชนิดยืดหยุ่นของเครื่องบินล้อคู่ (Ferderal Aviation Administration)

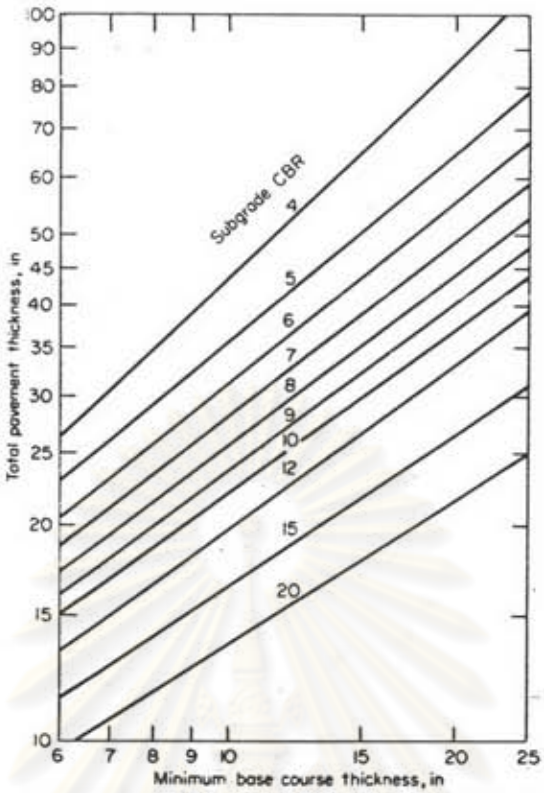


รูปที่ 2.11 กราฟออกแบบสำหรับ Pavement ชนิดยืดหยุ่นของเครื่องบินเพลาคู่ (Ferderal Aviation Administration)

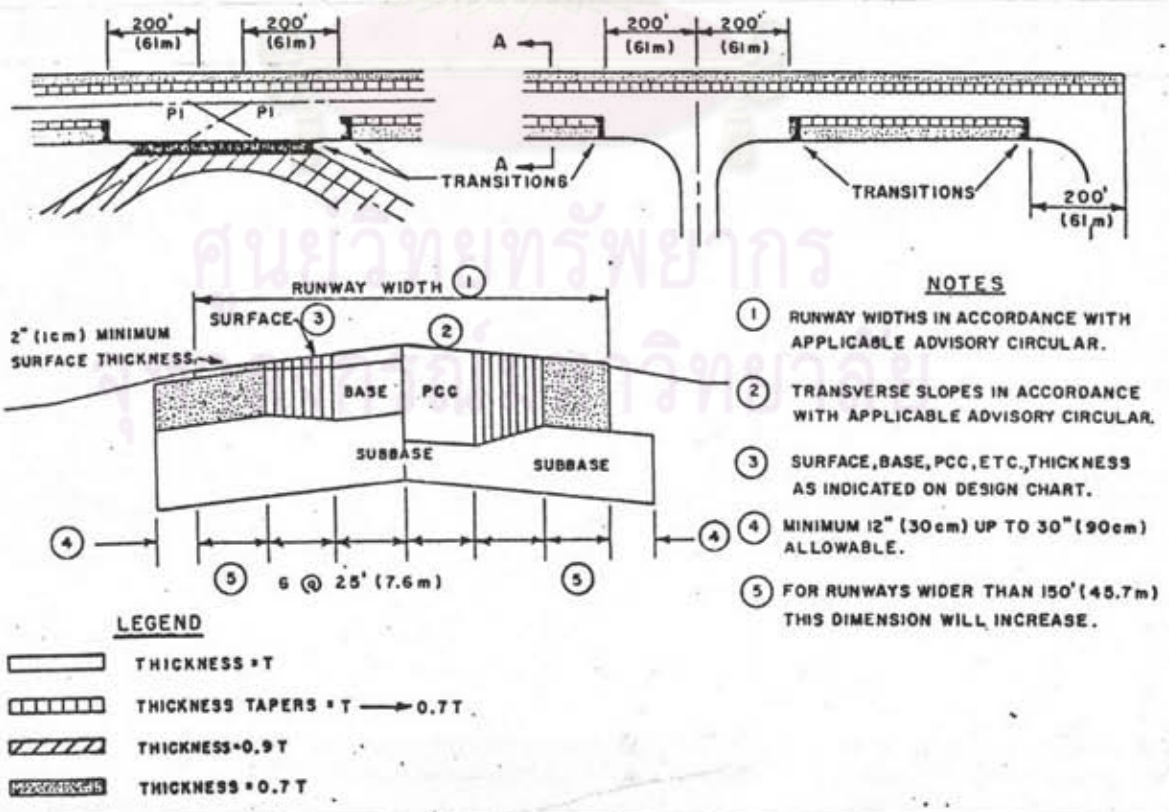


รูปที่ 2.12 กราฟออกแบบสำหรับ Pavement ชนิดยืดหยุ่นของเครื่องบินลำตัวกว้างชนิด โบอิ้ง 747-100

SR, 200 , B , C , F



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาที่ต้องการของชั้นพื้นทาง



รูปที่ 2.14 ความหนาที่ต้องการในบริเวณต่าง ๆ ของสนามบิน

ชั้นพื้นทางและ CBR 35 % (Soaked) สำหรับชั้นรองพื้นทาง นอกจากนี้ FAA ได้กำหนดอัตราส่วนสำหรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพกับวัสดุอื่นๆ ซึ่งใช้ก่อสร้างชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 2.8

2.1.3 วิธีของ French (French Practice)

2.1.3.1 การเลือกใช้น้ำหนักในการออกแบบ

2.1.3.1.1 ผลของลักษณะเครื่องบินต่อการออกแบบ

1. น้ำหนักของเครื่องบิน ใช้น้ำหนักมากที่สุดขณะที่เครื่องบินกำลังจะบินขึ้น (Take-off mass)

2. Undercarriage leg ลักษณะของล้อที่ประกอบกันโดยมีขาตั้งขึ้นรับเครื่องบิน เรียกว่า Undercarriage leg ลักษณะทั่ว ๆ ไปของขารับนี้มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ ลักษณะแบบ ล้อเดี่ยว (Single wheel) ล้อคู่ (dual wheel) และเพลาคู่ (dual tandem wheels) โดยแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะทั่วๆไปดังนี้

ลักษณะทั่วไป (Typical undercarriage leg)	ระยะระหว่างล้อ (Track , Cm)	ระยะระหว่างเพลา (Base , Cm)	แรงดันลม (MPa)
Single wheel	-	-	0.6
Dual wheel	70	-	0.9
Dual Tandem wheel	75	140	1.2

3. การกระจายน้ำหนักเครื่องบินบน undercarriage legs โดยทั่วไปจะกระจายลงที่ขาหน้า (Nose leg) และขาหลัง (Main leg) โดยสมมติว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักจะลงที่ขาหน้า และ 95 เปอร์เซ็นต์ ลงที่ขาหลัง

2.1.3.1.2 น้ำหนักที่ใช้ออกแบบ คือน้ำหนักที่ขาหลัง (Main under carriage leg) ซึ่งทำให้เกิดความเค้นมากที่สุด

2.1.3.2 น้ำหนักกระทำขึ้นอยู่กับหน้าที่ของชั้นทาง

ชนิดของทางในสนามบิน เช่น ทางวิ่ง (Runway) ทางขับ (Taxiway) และลานจอดจะต้องออกแบบความหนาของทาง แตกต่างกันไปเนื่องจากว่าสภาพความเค้นที่กระทำแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะได้รับน้ำหนักขนาดเท่ากันก็ตาม เช่น ในกรณีของลานจอดการเคลื่อนที่ของเครื่องบินจะช้า ดังนั้นน้ำหนักจะกระจายไปมากจึงต้องมีความหนามากกว่าบริเวณที่เครื่องเคลื่อนที่เร็ว เช่น กรณีที่เครื่องกำลังจะขึ้นจะมีแรงจากปีกช่วยพยุงตัวเครื่อง รูปที่ 2.15 แสดงน้ำหนักกระทำให้บริเวณต่างๆ ของสนามบิน

2.1.3.3 การออกแบบพื้นทางวิ่งชนิดยืดหยุ่น

การออกแบบพื้นทางวิ่งชนิดยืดหยุ่น

1. การเก็บข้อมูล ข้อมูลที่ต้องการคือ
   - น้ำหนักเครื่องบินและจำนวนเที่ยวบิน (movement)
   - คุณลักษณะของดินในสภาพที่เป็นอยู่ตามธรรมชาติ
2. การคำนวณความหนาของทางวิ่ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ
   - การพิจารณาหาค่าความหนาเทียบเท่า (Equivalent pavement thickness , e)
   - การเลือกความหนาเทียบเท่าที่มากกว่ามาใช้

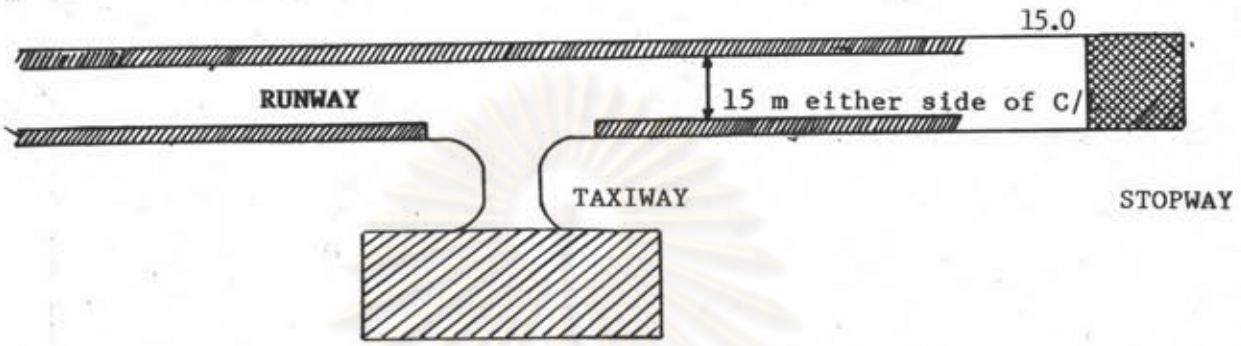
2.1.3.4 กำลังรับน้ำหนักของดินเดิม (Bearing strength of the subgrade)

โดยทั่วไปกำลังแรงของดินเดิมในการประเมินความแข็งแรงหรือ ออกแบบจะใช้ค่า CBR ที่ต่ำสุดเป็นตัวกำหนดจากการทดสอบที่ 95 เปอร์เซนต์ Modified Proctor ในสภาพแช่น้ำ (Soaked Condition) เป็นเวลา 4 วัน

ในกรณีที่ชั้นดินเดิมเป็นกรวดหรือทรายจะไม่ใช้ค่า CBR จากการทดสอบในการออกแบบ โดยจะใช้ค่าจากตารางที่ 2.9

เมื่อชั้นดินเดิมเป็นดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ จะหาค่าความหนาของทางได้จากสมการที่ 2.7

$$e = h_1 - h \frac{CBR_2 - CBR_1}{CBR_2 + CBR_1} \qquad \text{-------(2.7)}$$



Example of a runway not equipped with a parallel taxiway

รูปที่ 2.15 การกระจายน้ำหนักในบริเวณต่าง ๆ ของสนามบิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ h = ความหนาของดินเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพ

CBR_1 = ค่า CBR ของชั้นดินเดิมตามสภาพธรรมชาติ

CBR_2 = ค่า CBR ของชั้นดินเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพ

h_1 = ความหนาจากการออกแบบโดยใช้ค่า CBR_1

h_2 = ความหนาจากการออกแบบโดยใช้ค่า CBR_2

e = ความหนาของชั้นทางจริง

ในกรณีที่ ความหนา $e < h_2$ ใช้ค่า $e = h_2$

2.1.3.5 วิธีการในการประเมินและออกแบบ

หลักการทั่วไป

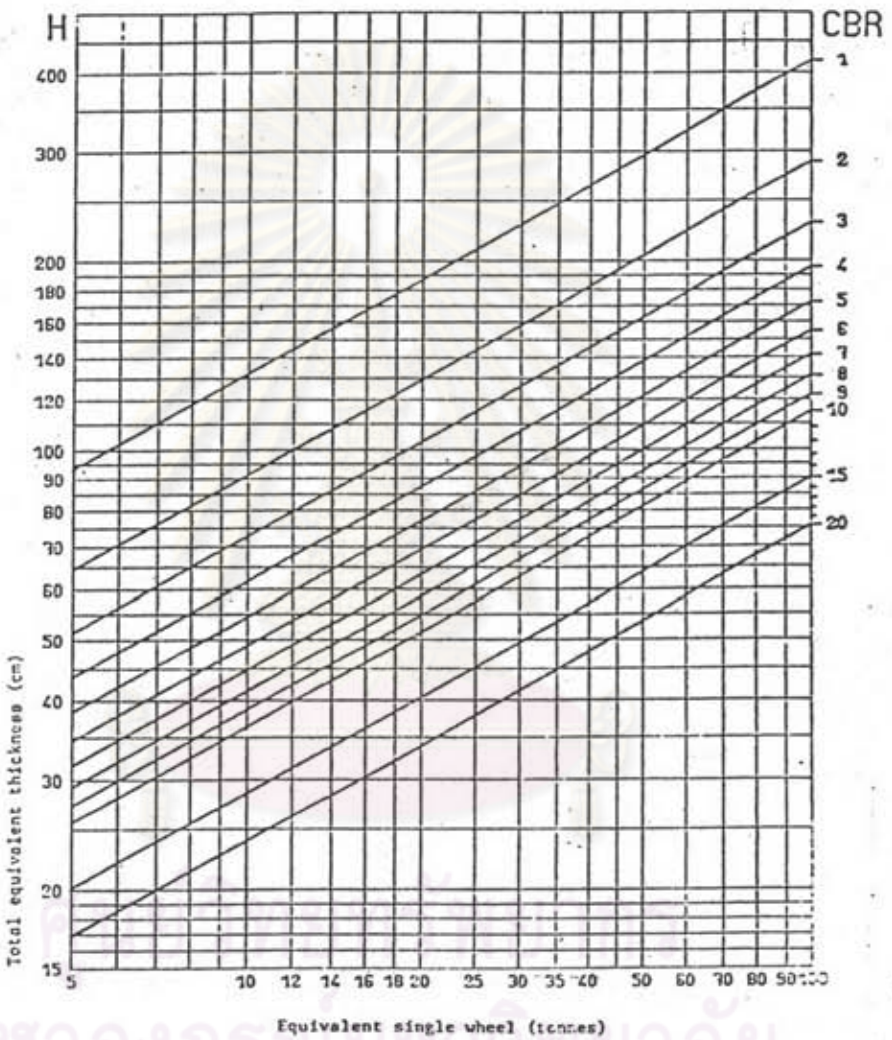
1. น้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบคือ น้ำหนักของเครื่องบินที่มากที่สุด
2. น้ำหนักจะถ่ายลงที่ undercarriage leg ในแต่ละแบบ
3. ปริมาณการจราจรปกติ คือ 10 เที่ยว (movements) ต่อวัน โดย 1 เที่ยว คือ จำนวนที่เครื่องบินขึ้นและลง 1 ครั้ง
4. ระยะเวลาใช้งาน 10 ปี

การออกแบบโดยจะใช้กราฟจากรูปที่ 2.16 ถึง 2.18 ซึ่งเป็นรูปสำหรับออกแบบตามรูปร่างของล้อหรือเพลา 3 ชนิดหลักคือ ล้อเดี่ยว ล้อคู่ และเพลาคู่ ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ต้องการคือ น้ำหนักเครื่องบินมากที่สุดและค่า CBR ของชั้นดินเดิม

ในการประเมินความแข็งแรงของทางวิ่งก็จะใช้รูปเดียวกันกับการออกแบบแต่ข้อมูลที่ใช้คือค่า CBR ของชั้นดินเดิมและค่าความหนาของทางวิ่งที่วัดได้จากการเจาะสำรวจหรือได้จากแบบก่อสร้าง

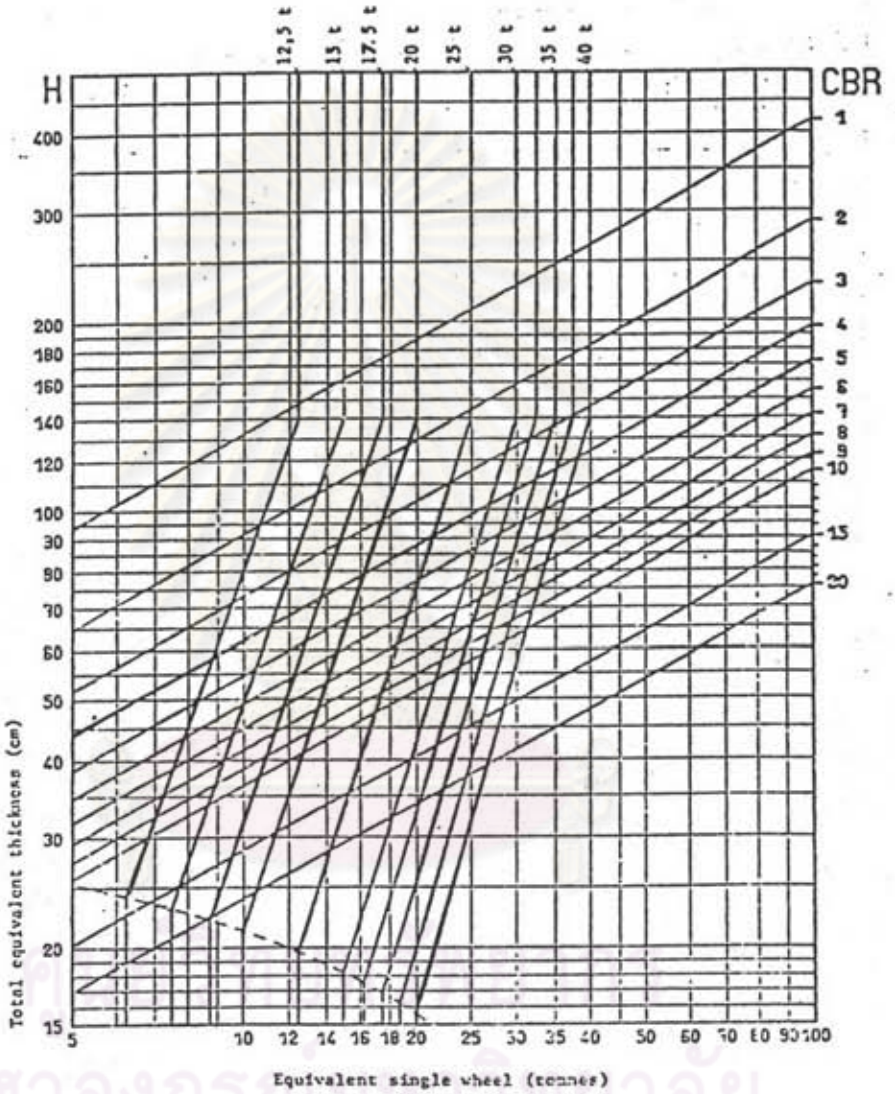
2.1.3.6 จำนวนปริมาณการจราจร (Traffic Intensity)

ในการออกแบบจากรูปที่ 2.16 ถึง 2.18 กำหนดให้ปริมาณการจราจรมีค่าเท่ากับ 10 เที่ยว (Movements) ต่อวัน แต่ในกรณีที่ปริมาณการจราจรแตกต่างไปจากนี้จำเป็นต้องมีการแก้ไขให้เป็นไปตามปริมาณที่เป็นจริง โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงและจำนวนของเที่ยวบินจริงต่อวัน (P, n) กับน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ (Normal design load) และจำนวนเที่ยวบิน 10 เที่ยวต่อวัน $(P', 10)$ โดยสามารถสร้างสมการความ

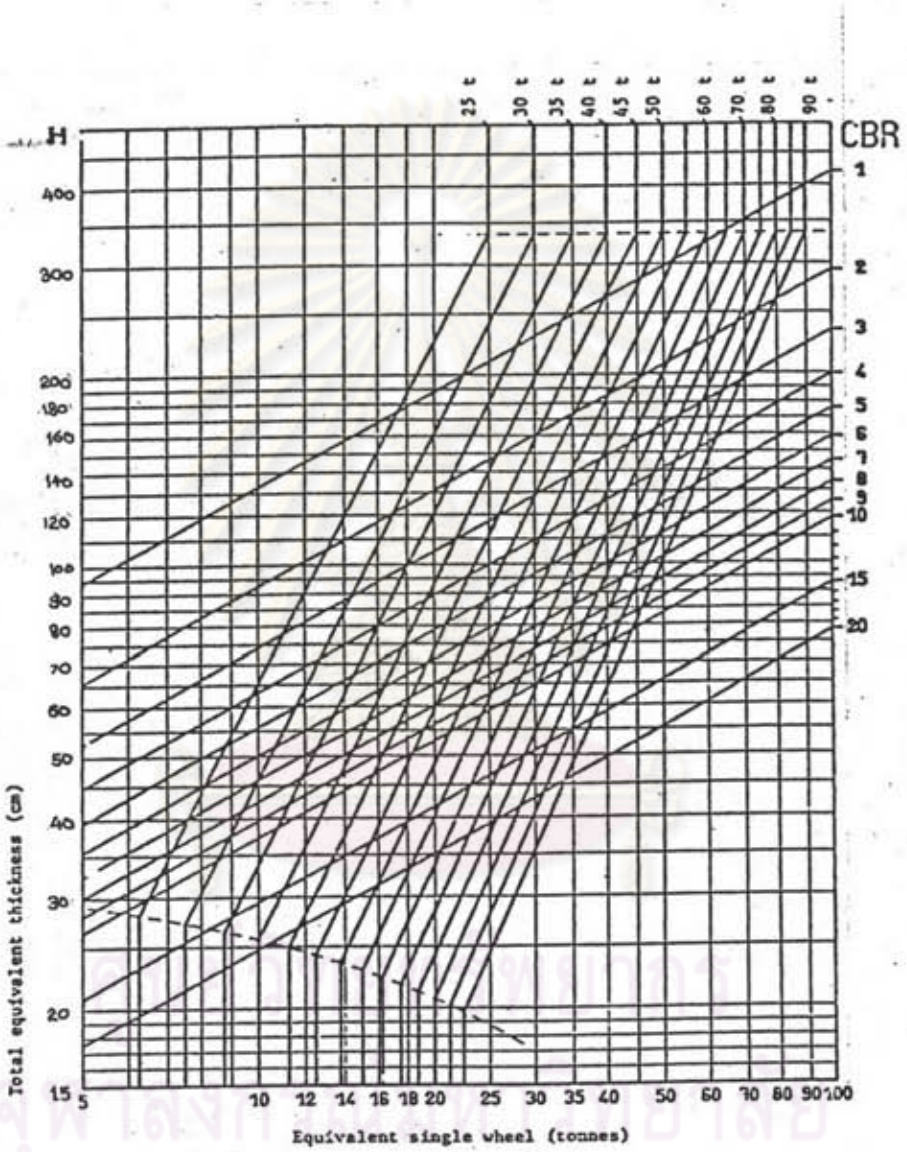


รูปที่ 2.16 กราฟสำหรับออกแบบ Pavement ชนิดยืดหยุ่นสำหรับเครื่องบินล้อเดี่ยว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 กราฟสำหรับออกแบบ Pavement ชนิดยืดหยุ่นสำหรับเครื่องบินล้อคู่



รูปที่ 2.18 กราฟสำหรับออกแบบ Pavement ชนิดยืดหยุ่นสำหรับเครื่องบินเพลาคู่

สัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P' = P/C \qquad \text{--------(2.8)}$$

ซึ่ง $C = 1.2 - 0.2 \log n$

โดยที่สมการที่ 2.8 นี้จะใช้กับอายุสนามบิน 10 ปี และในรูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C และ ค่า n

2.1.3.7 โครงสร้างของชั้นทาง (Structure of pavement)

โครงสร้างของชั้นทางชนิดยืดหยุ่นโดยปกติจะประกอบด้วยชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นพื้นผิว แนวความคิดเกี่ยวกับความหนาเทียบเท่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุในแต่ละชั้น ค่าความหนาเทียบเท่า (Equivalent Thickness ,e) นี้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความหนาจริง (er) ของแต่ละชนิดของชั้นทางคูณด้วยค่า แฟคเตอร์เทียบเท่า (Equivalence Coefficient) โดยในตารางที่ 2.10 จะแสดงค่าของแฟคเตอร์เทียบเท่านี้สำหรับวัสดุต่างๆ

2.2 การประเมินด้วยค่าจากเพลตโหลดเทสต์

2.2.1 วิธีของ McLeod

Norman W McLeod ได้รวบรวมข้อมูลจากการทดสอบพื้นผิวสนามบินแบบยืดหยุ่นที่มีอยู่ในประเทศแคนาดา โดยทดสอบเพลตแบริ่ง (Plate Bearing) การทดสอบกระทำที่ชั้นผิวทาง พื้นทาง และชั้นดินเดิมของทางวิ่งสนามบินที่เปิดใช้งานแล้ว ขณะเดียวกันก็ใช้วิธี Cone - bearing , Penetrometer , California bearing ratio และ Triaxial Compression ทดสอบควบคู่กันไปด้วยที่ชั้นดินเดิม เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดสอบ Plate Bearing

วิธีการออกแบบความหนาของพื้นสนามบินจะเลือกใช้เครื่องบินที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Critical Aircraft) ที่จำนวนบดทับซ้ำ (Coverage) 5000 ครั้ง ในการทดสอบ plate Bearing ชนิดกระทำซ้ำ (Repettition Load Test) กระทำโดย

1. ใช้น้ำหนักกดแผ่นเหล็กที่วางซ้อนกันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12" , 18"

ตารางที่ 2.9 ค่า **CBR** ของชั้นดินเดิมที่เป็นกรวดหรือทราย

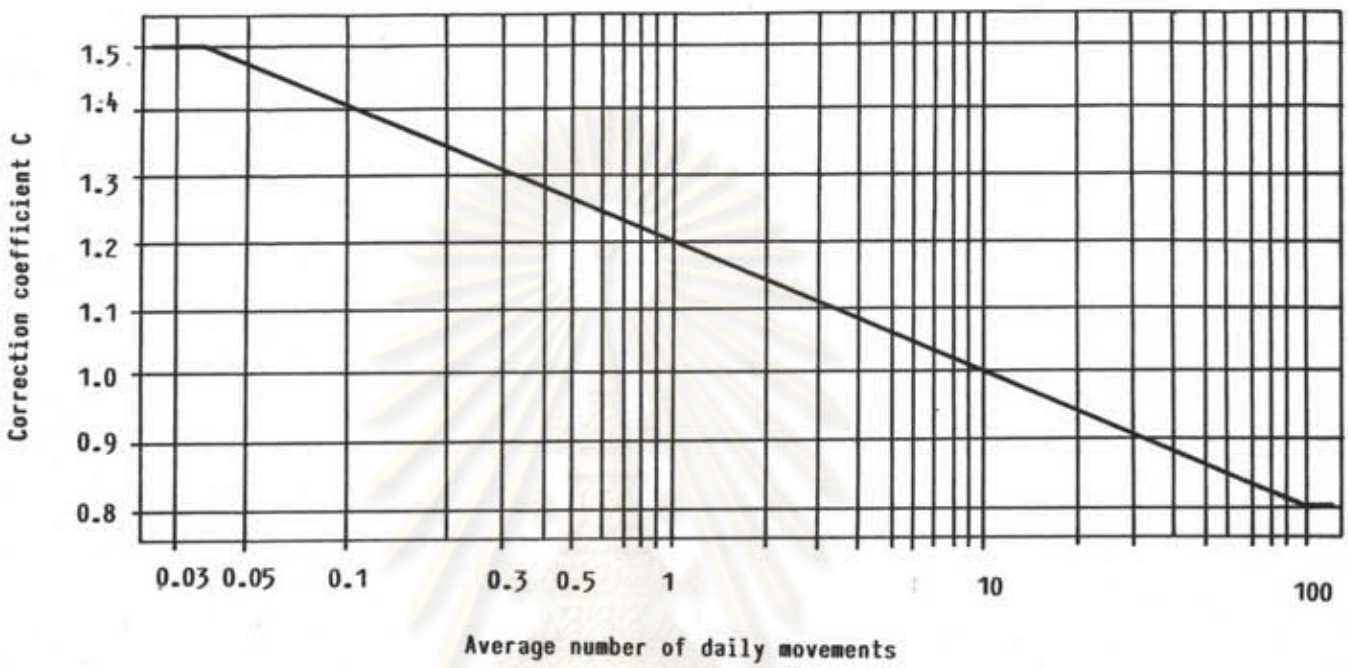
Description of the soil	Measured CBR	Significant CBR
Pure well-graded gravel	40	20
Pure badly graded gravel		
Gravel containing silt	>40 (PI <7)> 20 (PI>7)	20 (FI<7) 10 (PI >7)
Gravel containing clay	20	10
Pure well-graded sand	20	10
Pure badly graded sand	10	6 to 8

PI - Plasticity Index

ตารางที่ 2.10 ค่า **Equivalence Coefficient** ของวัสดุต่างๆ

New materials	Equivalence coefficient
Concrete-type dense bituminous mix	2
Sand-gravel mix bound with bitumen	1.5
Emulsion sand-gravel	1.2
Sand-gravel treated with hydraulic binders (cement, slag, fly-ash, lime)	1.5
Well-graded crushed gravel (cement, slag)	1 1
Pea gravel	0.75
Sand	0.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(Correction of the design load with regard to the traffic intensity)

$$\text{Corrected load} = \frac{\text{Actual load}}{C}$$

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C และ N

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

24" และ 30" ตามลำดับจนกระทั่งชั้นดินที่ทดสอบเกิดการทรุดตัว (Deflection) 0.05" และรอให้อัตราการทรุดตัวมีไม่เกิน 0.001" ต่อนาที ติดต่อกัน 3 นาที แล้วปล่อยน้ำหนักกดจนค่าการทรุดตัวเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 นิ้ว ต่อนาที ติดต่อกัน 3 นาที

2. ใช้น้ำหนักกดขนาดเท่าเดิมกระทำตามข้อ 1 อีก 6 ครั้ง
3. ทำตามข้อ 1 และ 2 แต่เพิ่มน้ำหนักกดให้เกินการทรุดตัว 0.2 นิ้ว
4. ทำตามข้อ 3 แต่ค่าทรุดตัวเท่ากับ 0.5 นิ้ว
5. ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบข้างต้นเขียนกราฟระหว่างการทรุดตัวและล็อก (Log) ของจำนวน ลากเส้นตรงผ่านจุด 6 จุด แล้วต่อเส้นตรงผ่านจุด 10 , 100 , 1000 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.20

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามและจากการศึกษาข้อมูลของเครื่องบินพบว่าค่าการทรุดตัวที่เหมาะสมในการออกแบบทางวิ่ง (Runway) ของสนามบิน โดยใช้น้ำหนักกดแผ่นเหล็ก 10 ครั้ง ให้เกิดการทรุดตัว 0.5 นิ้ว และสำหรับทางขับ (Taxiway) และลานจอด (Apron) เกิดการทรุดตัว 0.35 นิ้ว

2.2.1.1 การหาสมการในการออกแบบ

Mcleod ได้หาสมการในการออกแบบความหนาของพื้นสนามบิน ดังนี้

$$T = K \log P/S \qquad (2.9)$$

โดยที่

T = ความหนาของพื้นทาง (Granular Base) ที่ต้องการ, นิ้ว

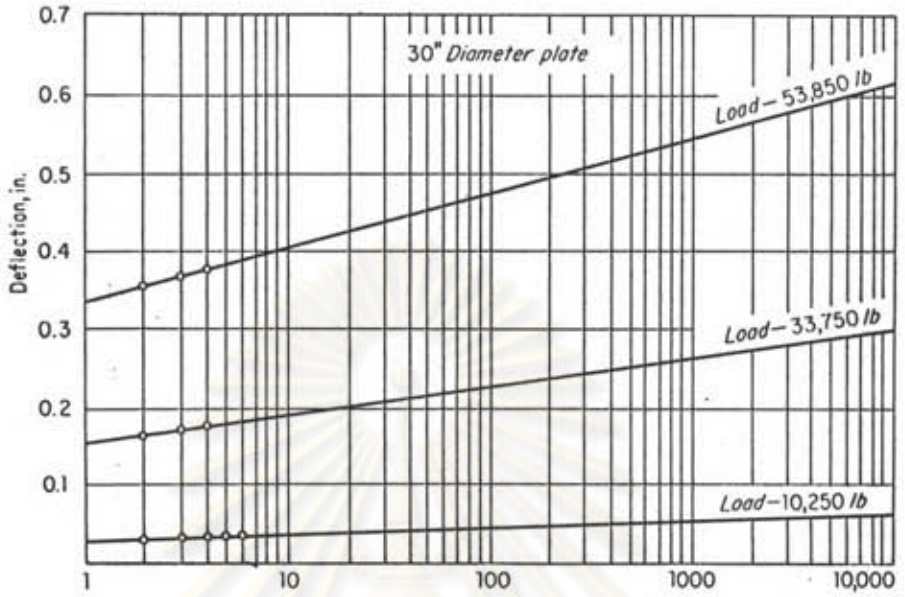
P = น้ำหนักล้อเครื่องบิน , ปอนด์

S = ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินเดิม (Subgrade), ปอนด์

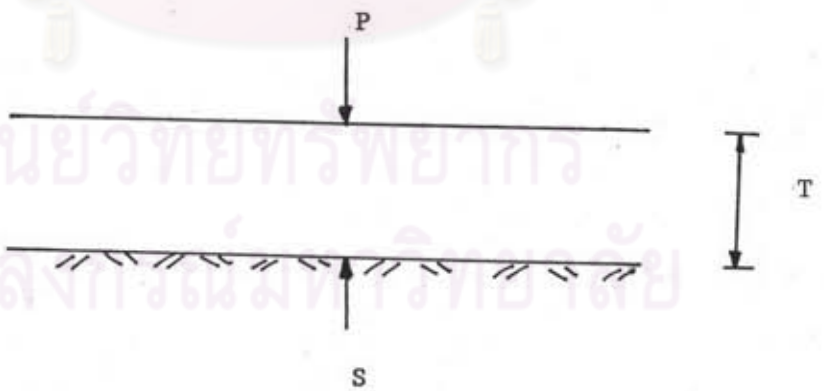
K = ค่าคงที่ของพื้นทาง

วิธีการโดย

จากรูป 2.21 และรูปที่ 2.22 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัว และจำนวนครั้งที่กระทำซ้ำ



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของสมการของ Mcleod

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{BJ}{AJ} = \frac{DK}{CK} = \frac{FL}{EL}$$

$$\frac{P_1}{S} = \frac{P_2}{S_1} = \frac{P_3}{S_2} = \frac{P_n}{S_{n-1}}$$

กำหนดให้ S = ความสามารถรับน้ำหนักของดินเดิมโดยไม่มีความหนาของพื้นทาง ($T = 0$)

S_1 = น้ำหนักที่กระทำต่อชั้นดินเดิมโดยมีชั้นพื้นทางชั้นแรกหนา t

S_n = น้ำหนักที่กระทำต่อชั้นดินเดิมโดยมีชั้นพื้นทาง n ชั้น

P_1 = ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นพื้นทางชั้นแรกอยู่บนชั้นดินเดิมซึ่งสามารถรับน้ำหนัก S

$P = P_n$ = ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นพื้นทาง n ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นหนา t และอยู่บนชั้นดินเดิมซึ่งสามารถรับน้ำหนัก S

$P_1 = S_1$, $P_2 = S_2 \ldots$, $P_n = S_n$

แทนค่า $\frac{P_1}{S} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2}$

$$P_2 = \frac{P_1^2}{S}$$

$$\frac{P_3}{S} = \frac{P_1 \times P_1^2}{S \cdot S}$$

$$\frac{P_3}{S} = \left(\frac{P_1}{S}\right)^3$$

$$\frac{P_n}{S} = \left(\frac{P_1}{S}\right)^n$$

ถ้าแต่ละชั้นของ n layers หนา 1 นิ้ว

$$\frac{P}{S} = \left(\frac{P_1}{S}\right)^T$$

$$T = \frac{1}{\log P_1/S}(\log P/S)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมมติให้ P_1/S ไม่ขึ้นกับความหนาผิวทาง

$$T = K \log P/S$$

ค่าคงที่ K คำนวณได้จากข้อมูลของการทดสอบ Plate Bearing ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ รูปที่ 2.23

2.2.1.2 ขั้นตอนในการออกแบบ

1. หาน้ำหนักของ ล้อเดี่ยว (P) และแรงดันลมของล้อ
2. คำนวณหาพื้นที่สัมผัส $a = \frac{\text{น้ำหนักล้อเดี่ยว}}{\text{แรงดันลม} \times \pi}$
3. หาอัตราส่วน Perimeter , P/A
4. จากผลการทดสอบ Plate Bearing ที่ชั้นดินเดิมใช้แผ่นเหล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 นิ้ว ค่าการทรุดตัว 0.2 นิ้ว ที่จำนวนกระทำซ้ำ 10 ครั้ง
5. จากข้อ 4 หาค่า unit support
6. จากรูปที่ 2.24 หาค่า unit support ที่ใช้ในการออกแบบ (S)
7. หาค่า total support ซึ่งมีค่าเท่ากับ $S = s \cdot a$
8. จากรูปที่ 2.23 และสมการ $T = k \log P/S$ คำนวณหาค่าความหนาของผิวสนามบิน
9. ค่าที่คำนวณได้คือค่าความหนาของชั้นผิวทางซึ่งเป็น granular base

หมายเหตุ ความหนาขั้นต่ำของผิวผิวและผิวทางสำหรับล้อที่มีลมยางต่ำกว่า 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เท่ากับ 2.5" และ 9" ตามลำดับ สำหรับล้อที่ลมยางสูงกว่า 150 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว เท่ากับ 4" และ 12"

จากสมการ 2.9 และวิธีการหาค่าน้ำหนักเทียบเท่าล้อเดี่ยวของ Corps of Engineers McLeodได้กำหนดกราฟสำหรับออกแบบขึ้นดังรูปที่ 2.25 ถึง 2.27 ซึ่งใช้สำหรับน้ำหนักเครื่องบินชนิดล้อเดี่ยวที่มีแรงดันลม 100 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว 200 ปอนด์

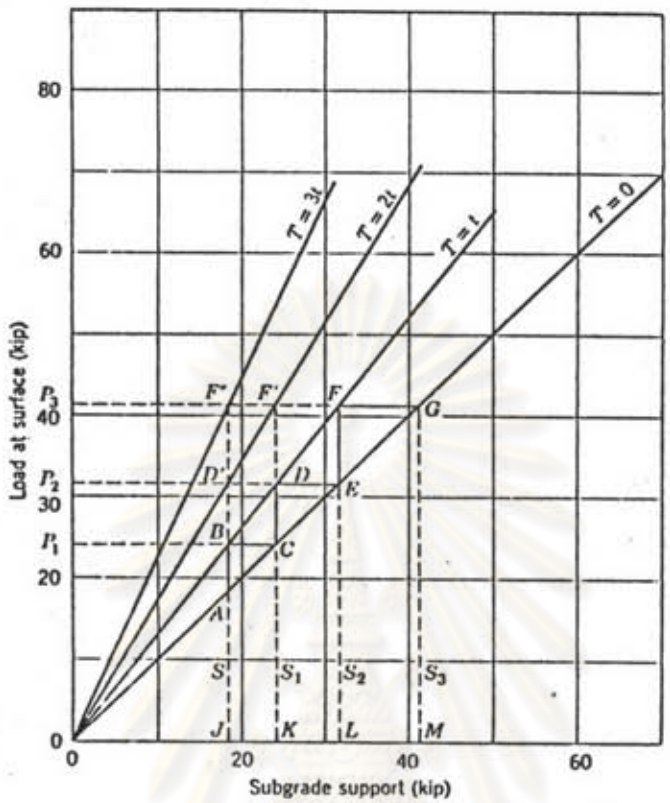
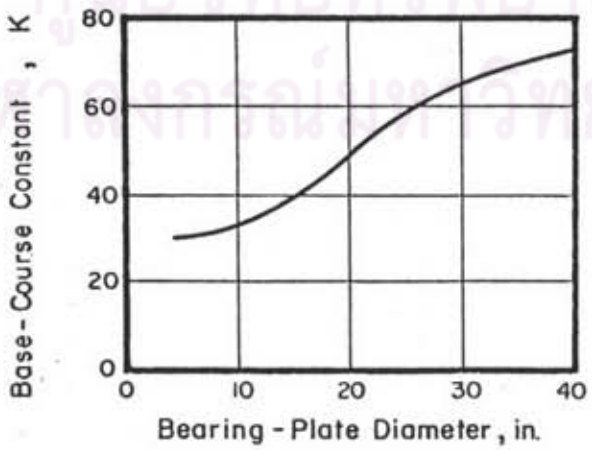
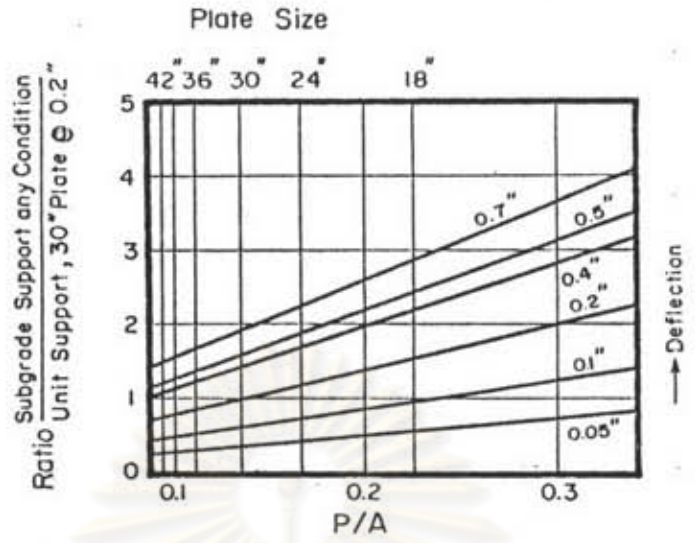


Diagram illustrating McLeod analysis. (From McLeod, Highway Research Board Research Report 4–B.)

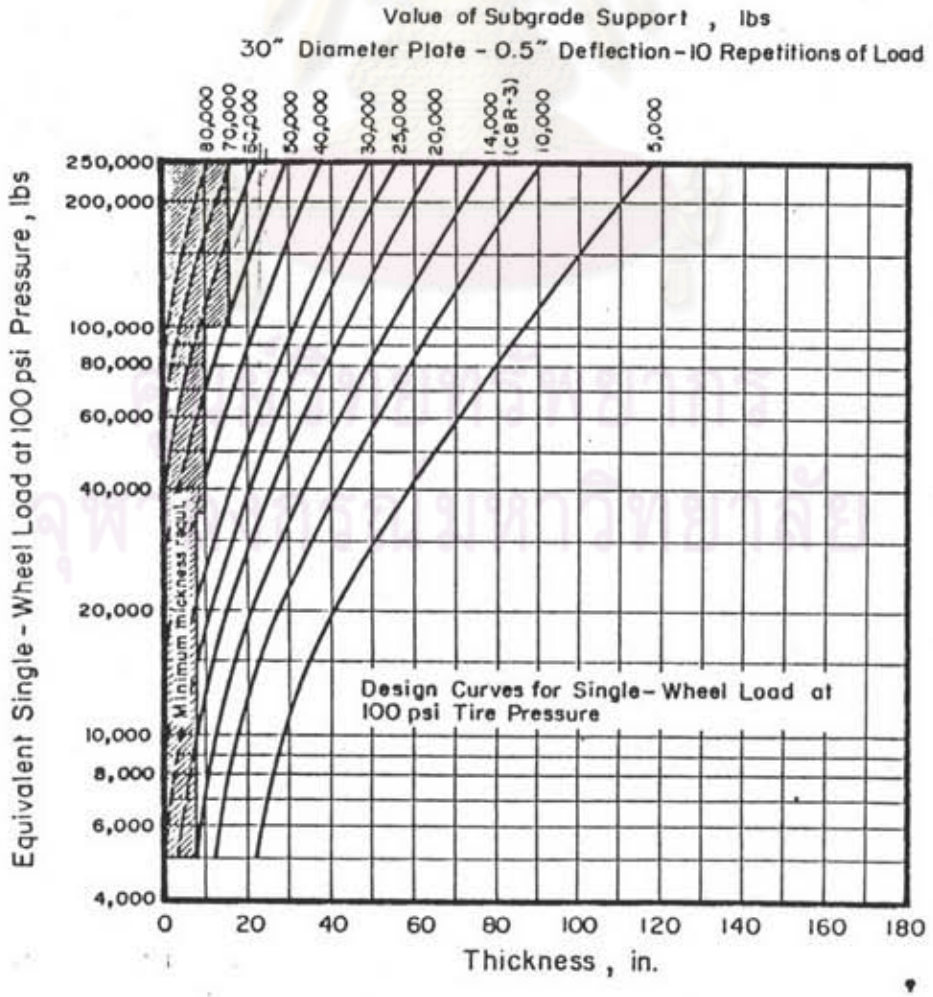
รูปที่ 2.22 แผนภูมิที่ใช้ในการกำหนดสมการของ Mcleod



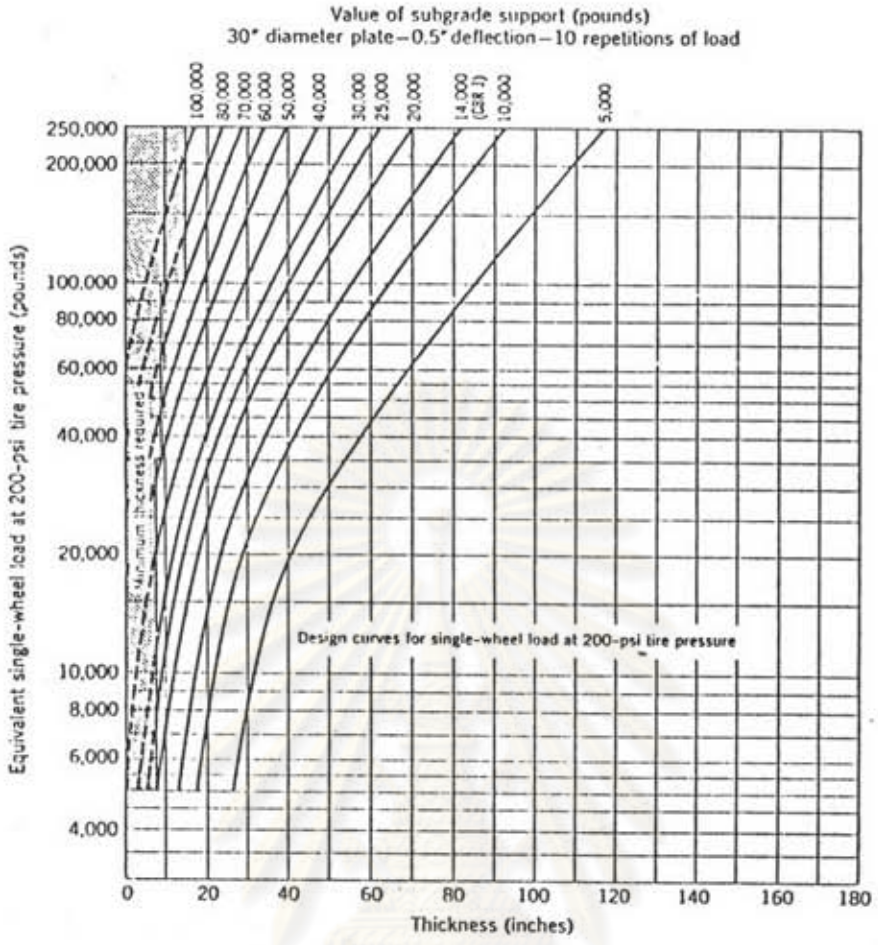
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Base Course Constant , K และเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Subgrade Support และขนาดของแผ่นเหล็ก



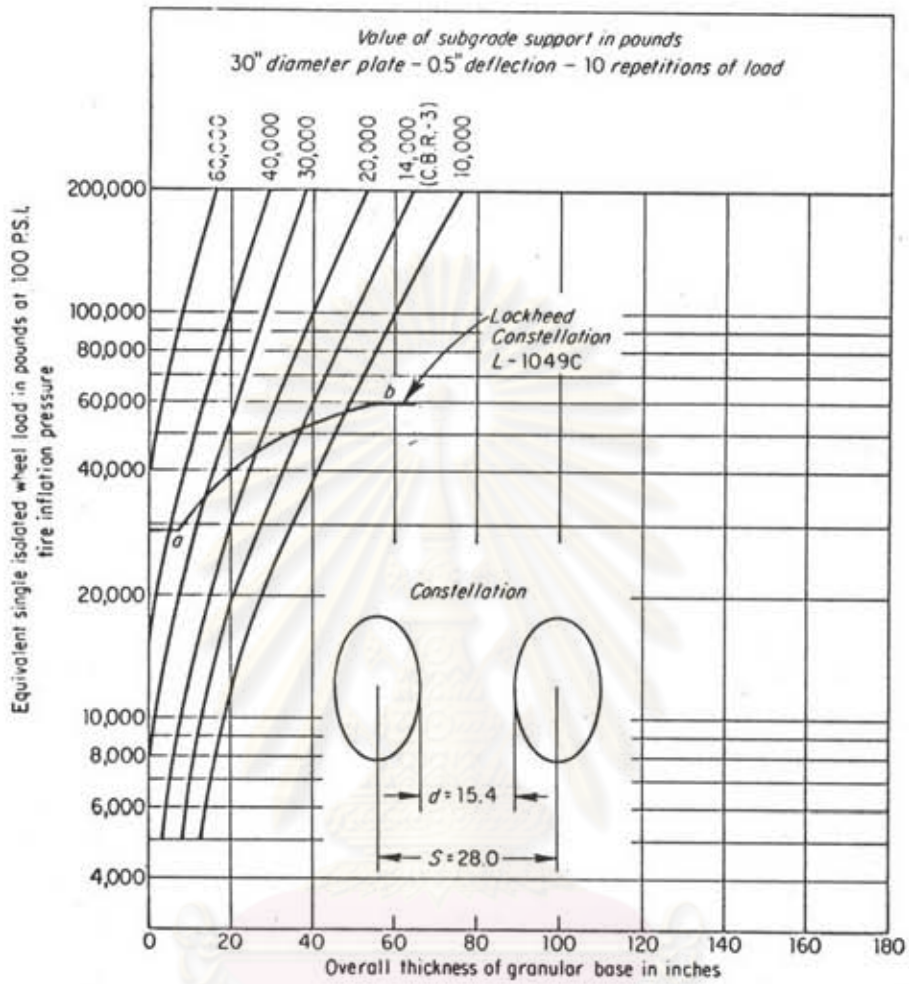
รูปที่ 2.25 กราฟออกแบบของ Mcleod สำหรับเครื่องบินล้อเดียวแรงดันลม 100 psi



Flexible-pavement thickness. (From McLeod, *Proceedings*, AAPT, 1950.)

รูปที่ 2.26 กราฟออกแบบของ McLeod สำหรับเครื่องบินล้อเดี่ยวแรงดันลม 200 psi

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.27 กราฟออกแบบของ McLeod สำหรับเครื่องบินล้อคู่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อ ตารางนิ้ว และน้ำหนักเครื่องบินชนิดล้อคู่ ซึ่งมีแรงดันลม 100 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว ตามลำดับ

2.2.2 วิธีของแคนาดา (Canadian Practice)

วิธีการออกแบบสนามบินในประเทศแคนาดาใช้วิธีของ Transport Canadian Practice ซึ่งใช้ค่าการรับน้ำหนักของดินเดิม (Subgrade Strength) ในการออกแบบ โดยทำการทดสอบ Plate Bearing ชนิดทดสอบซ้ำ ซึ่งค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเดิมนี้ คือ น้ำหนักที่ทำให้เกิดการทรุดตัว 12.5 มม. หลังจากน้ำหนักกระทำซ้ำ 10 ครั้ง โดยน้ำหนักกระทำต่อแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 762 มม. ซึ่งค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเดิมนี้อาจหาได้จากการจำแนกชนิดดินดัง ตารางที่ 2.11

2.2.2.1 สมการที่ใช้ในการออกแบบ

พื้นผิวชนิดยืดหยุ่นหาได้จากสมการซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของกำลังรับน้ำหนักของดินเดิมดังนี้

$$S = (ESWL)(C_1\ 10^{-c2t}) \quad \text{---------(2.10)}$$

S = กำลังรับน้ำหนักของดินเดิม kN , kg

ESWL = น้ำหนักเทียบเท่าล้อเดี่ยว (Equivalent Single wheel load) kN , kg

t = ความหนาของพื้นสนามบิน , cm

C1,C2 = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัสของ ESWL ดังรูปที่ 2.28

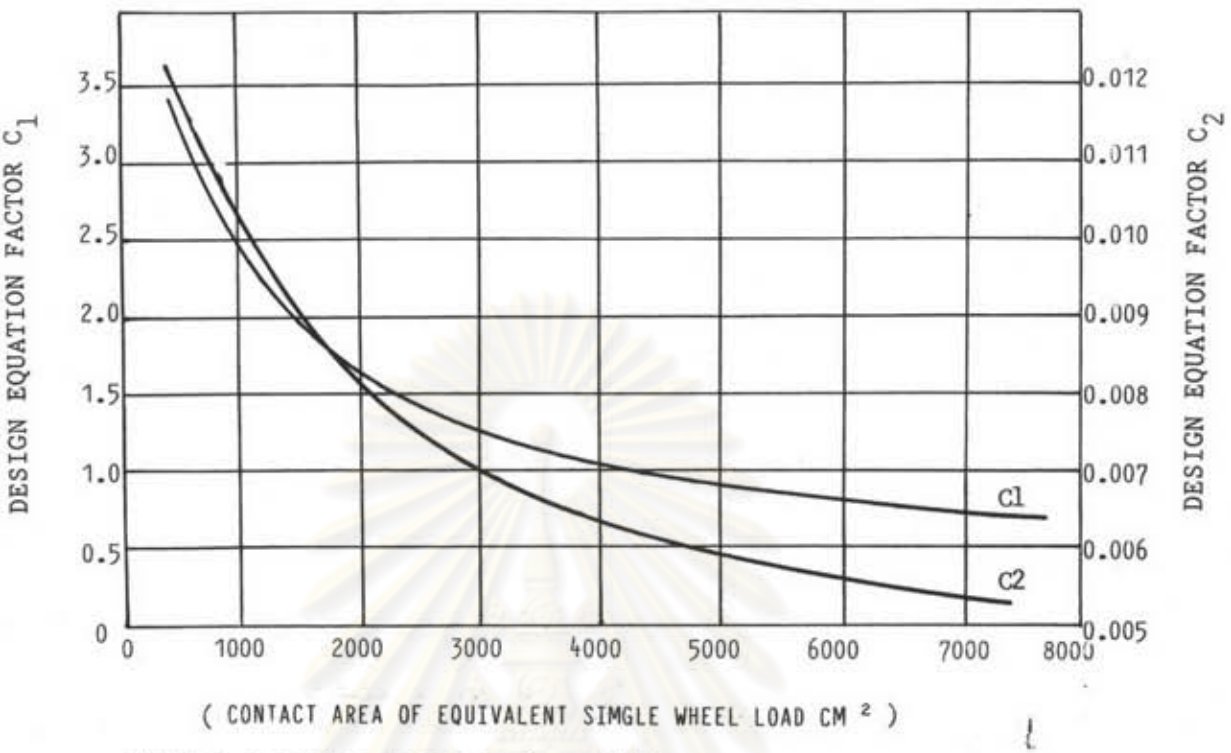
2.2.2.2 กราฟออกแบบสำหรับกลุ่มน้ำหนักเครื่องบินมาตรฐาน (Design curve for standard gear loading)

การออกแบบพื้นผิวของสนามบินโดยทั่วไปจะจัดกลุ่มเครื่องบินออกตามลักษณะของน้ำหนักกระทำที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งตามวิธีการของแคนาดาได้จัดกลุ่มน้ำหนักมาตรฐานออกเป็น 12 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.12 และรูปที่ 2.29 แสดงถึงค่ามาตรฐานน้ำหนักของเครื่องบินชนิดต่างๆ ซึ่งค่าน้ำหนักมาตรฐานเหล่านี้เรียกว่า Aircraft Load Rating (ALR)

ตารางที่ 2.11 ความสามารถรับน้ำหนักของดินประเภทต่างๆ

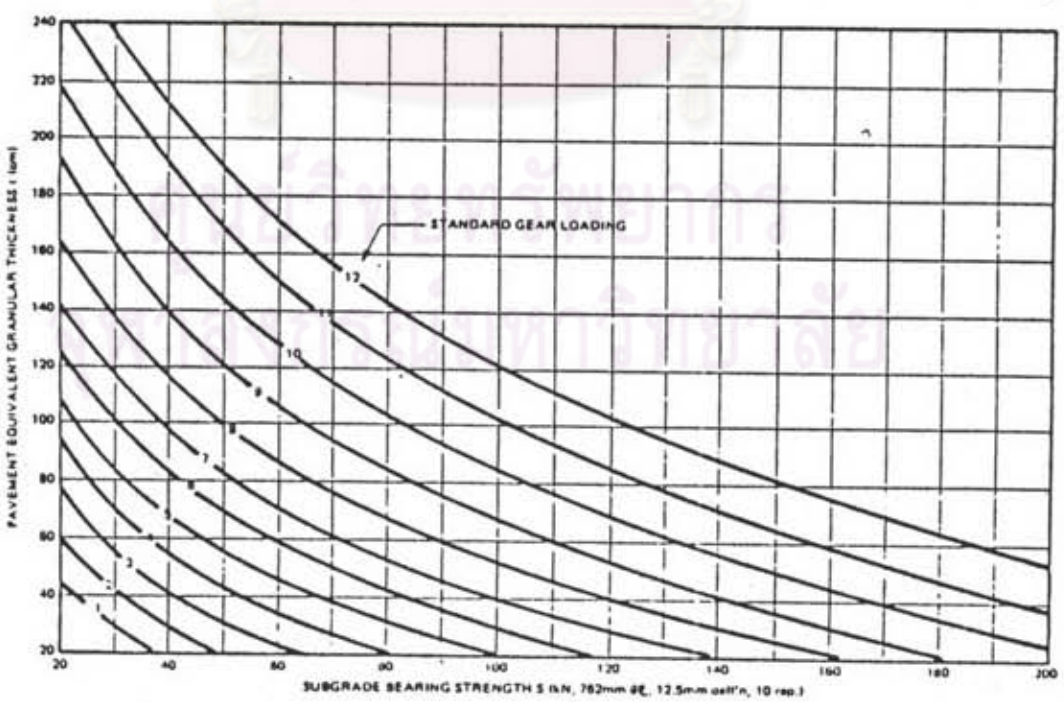
Subgrade Soil Type	Usual Spring Reduction %	Subgrade Bearing Strength (kN)		
		Fall Range	Design Value	
			Fall	Spring
GW - well graded gravel	0	290-400	290	290
GP - poorly graded gravel	10	180-335	220	200
GM - gravel with silty fines	25	135-335	180	135
GC - gravel with clay fines	25	110-245	145	110
SW - well graded sand	10	135-335	180	160
SP - poorly graded sand	20	110-200	135	110
SM - sand with silty fines	45	95-190	120	65
SC - sand with clay fines	25	65-155	85	65
ML - silt with low liquid limit	50	90-180	110	55
CL - clay with low liquid limit	25	65-135	85	65
MH - silt with high liquid limit	50	25-90	40	20
CH - clay with high liquid limit	45	25-90	55	30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Design equation factors C_1 and C_2

รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ C_1 , C_2 และพื้นที่สัมผัส



Flexible pavement design curves for standard gear loadings

รูปที่ 2.29 กราฟออกแบบ Pavement สำหรับน้ำหนักเครื่องบินมาตรฐาน

ตารางที่ 2.12 ค่าน้ำหนักมาตรฐานของเครื่องบินแบบต่างๆ

Aircraft load ratings

AIRCRAFT	TIRE PRESSURE (MPa)	WEIGHT (kN) (MAX) (MIN)	NOMINAL	AIRCRAFT LOAD RATINGS (ALR)							
				FLEXIBLE PAVEMENT AT S VALUE OF (kN)				RIGID PAVEMENT AT K VALUE OF (MPa/m)			
				50	90	130	180	20	40	80	150
B707-320	1.24	1500 800	10.7 7.6	10.7 7.3	10.7 7.2	10.5 7.2	10.4 7.2	10.5 7.6	10.3 7.6	10.2 7.2	10.1 7.1
B727-100-200	1.35	930 500	11.1 8.7	10.3 7.0	10.7 7.2	10.9 7.5	11.1 7.8	10.5 8.3	10.8 8.4	11.1 8.4	11.3 8.7
B737-100-200	1.02	450 300	8.0 6.5	7.5 5.8	7.5 6.0	7.5 6.4	7.5 –	7.8 6.2	7.7 6.4	7.9 6.4	8.0 6.5
B747-100-200	1.40	3600 2000	11.1 8.4	11.1 8.0	10.9 7.9	10.9 8.0	10.5 8.0	11.0 8.4	10.9 8.3	10.8 8.0	10.8 8.0
B767-200	1.20	1400 800	9.8 7.8	9.8 6.9	9.4 7.0	9.2 6.9	9.2 6.9	9.7 7.3	9.5 7.1	9.3 6.9	9.0 6.5
DC 6B	0.72	470 300	7.9 6.1	7.9 5.6	7.6 5.6	7.2 5.8	– –	7.9 6.0	7.9 6.1	7.9 6.1	7.9 6.1
DC-8-62-63	1.35	1600 800	11.2 7.9	11.0 7.5	11.0 7.6	11.1 7.7	11.2 7.7	10.9 7.9	10.9 7.9	10.9 7.7	10.9 7.5
DC-9-21-32	1.00	485 300	8.7 6.8	8.1 6.0	8.1 6.1	8.2 6.1	8.2 6.1	8.3 6.7	8.4 6.7	8.6 6.7	8.7 6.8
DC-10-20-30-40	1.21	1970 1200	11.0 7.8	11.0 7.0	10.9 6.6	10.8 6.3	10.7 6.0	11.0 7.8	11.0 7.7	10.8 7.5	10.8 7.2
A300-B2-B4	1.25	1480 1000	10.5 8.6	10.5 8.5	10.5 8.6	10.4 8.2	10.2 8.0	10.3 8.6	10.3 8.5	10.2 8.2	10.2 8.0
L1011-100-200	1.25	2080 1400	11.1 9.2	11.1 9.2	11.0 8.7	10.9 8.3	10.5 8.3	10.8 9.2	10.5 9.1	10.5 8.9	10.5 8.5
CONCORDE	1.27	1750 1000	11.8 9.0	11.4 9.0	11.6 8.9	11.7 8.7	11.8 8.5	11.3 9.0	11.3 9.0	11.4 8.7	11.4 8.4
HERCULES C-130	0.69	689 400	8.7 6.7	8.3 6.0	8.0 6.0	8.0 6.0	8.0 –	8.6 6.5	8.6 6.7	8.7 6.6	8.7 6.6
BAC-1-11-400	0.97	390 250	8.5 6.2	7.4 5.5	7.5 5.9	7.4 5.8	– –	8.0 6.0	8.1 6.2	8.3 6.2	8.5 6.2
CONVAIR 640	0.52	280 200	6.0 5.0	5.8 4.3	5.0 4.0	– –	– –	5.9 5.2	6.0 5.0	5.8 5.0	5.6 4.9

To determine aircraft load ratings at intermediate weights, interpolate linearly between the ALR values listed for minimum and maximum weights.

To determine aircraft load ratings at subgrade bearing strength (S) or bearing modulus (k) other than those listed, interpolate between the ALR values shown.

2.2.2.3 ขั้นตอนการออกแบบ

1. กำหนดกลุ่มน้ำหนักของเครื่องบินที่จะใช้ในสนามบินจากการศึกษาปริมาณการจราจร และชนิดของเครื่อง ตารางที่ 2.13
2. หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเดิมจากการทดสอบ Plate Bearing
3. จากรูปที่ 2.30 หาค่าความหนาเทียบเท่าของวัสดุมวลหยาบ (Equivalent Granular Thickness)
4. ใช้ความหนาจาก ข้อ 3 และค่าจากตารางที่ 2.14 ใช้พิจารณาเปรียบเทียบเปลี่ยนแปลงวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นผิวทาง พื้นทางและรองพื้นทาง

โดยความหนาของโครงสร้างชั้นทางชั้นต่างๆ ขึ้นอยู่กับแรงดันลมในล้อ ดังนี้

ชั้นทาง	แรงดันลมในล้อ (MPa)			
	<0.4	0.4-0.7	0.7-1.0	>1.0
ผิวทาง แอสฟัลท์คอนกรีต (cm)	5.0	6.5	9.0	10.5
พื้นทาง หินหรือกรวด (cm)	15	23	23	30
รองพื้นทาง วัสดุมวลหยาบคัด	ความหนามีได้ตามความจำเป็น			

2.2.2.4 ความหนาเทียบเท่าวัสดุมวลหยาบ (Equivalent gvarvlar thickness)

การประเมินความหนาของทางวิ่งของสนามบิน เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของทางวิ่ง จะต้องทราบข้อมูลของชั้นทางชั้นต่างๆ ซึ่งจะทราบจากการเจาะสำรวจ ค่าความหนา Equivalent granular นี้ จะใช้สำหรับเปรียบเทียบในกรณีที่ชั้นต่างๆ ของทางวิ่งประกอบ

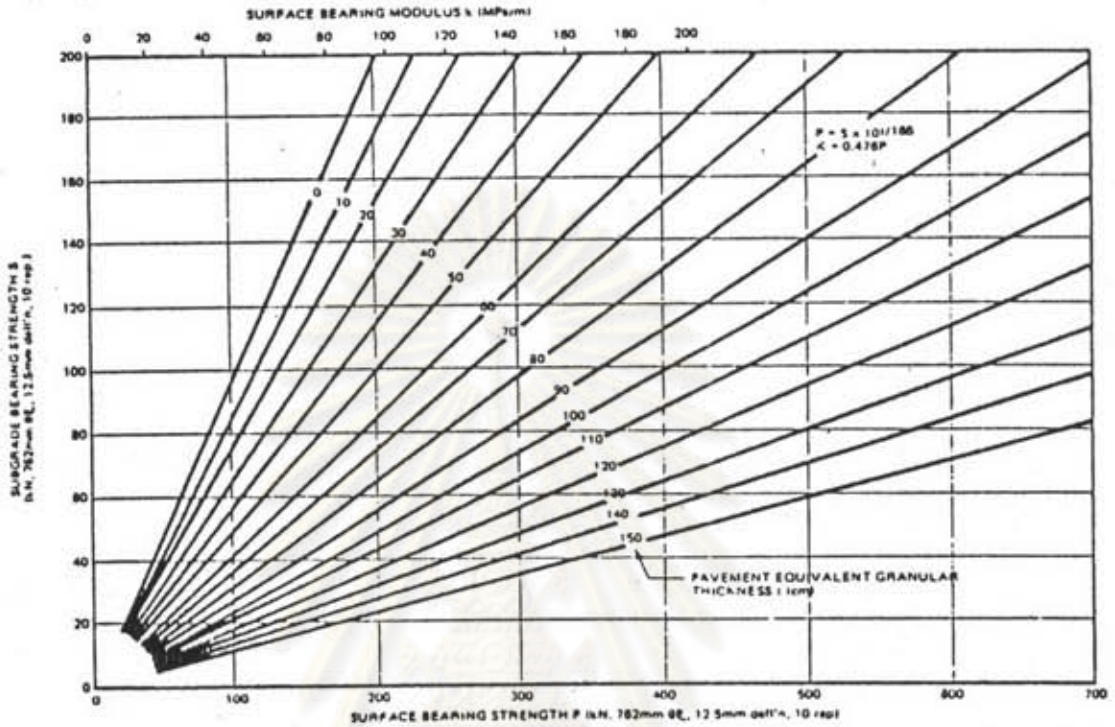
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.13 อัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างหินและผิวทางประเภทต่างๆ

Granular equivalency factors

Pavement Material	Granular Equivalency Factor
Selected granular sub-base	1
Crushed gravel or stone base	1
Waterbound Macadam base	1-1/2
Bituminous stabilized base	1-1/2
Cement stabilized base	2
Asphaltic concrete (good condition)	2
Asphaltic concrete (poor condition)	1-1/2
Portland cement concrete (good condition)	3
Portland cement concrete (fair condition)	2-1/2
Portland cement concrete (poor condition)	2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.30 กราฟกำหนดค่าการรับน้ำหนักของดินเดิมและค่า Equivalent Granular Thickness

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้วยวัสดุแตกต่างกัน โดยจะใช้ค่า equivalent แฟคเตอร์ คูณความหนาของแต่ละชั้นซึ่งแฟคเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุแล้วผลรวมของความหนาของแต่ละชั้นก็คือความหนาที่ต้องการในการนำไปประเมิน

2.3 การประเมินความแข็งแรงของทางวิ่ง

จุดประสงค์ในการประเมินความแข็งแรง

1. การประเมินสำหรับการใช้งานในอนาคต (Evaluations for Expected Operations)

เมื่อทางวิ่งรับน้ำหนักเครื่องบินซึ่งคาดคะเนไว้ในขณะออกแบบ การประเมินความแข็งแรงภายหลังจะต้องใช้วิธีการเดียวกันกับที่ออกแบบไว้ ซึ่งตลอดอายุการใช้งานของสนามบิน ชั้นผิวทางอาจจะมี การเสียหายไปบ้างแต่หากว่า ยังสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย กำลังรับน้ำหนักของทางวิ่งก็ไม่ควรจะลดน้อยลง

2. การประเมินสำหรับการเปลี่ยนแปลงการจราจร (Evaluations for changing traffic)

การประเมินเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงชนิดของเครื่องบินหรือเพิ่มปริมาณการจราจร ซึ่งในกรณีนี้วิธีการประเมินควรเป็นวิธีการเดียวกันกับเมื่อออกแบบ ผลของการเปลี่ยนแปลงการจราจรจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับน้ำหนักของทางวิ่ง แต่การเปลี่ยนแปลงชนิดของเครื่องบินจะมีผลโดยตรงต่อกำลังรับน้ำหนักของทางวิ่ง

3. การประเมินสำหรับการวางแผนและออกแบบ (Evaluations for Planning and Design)

2.3.2 ขั้นตอนในการประเมิน

1. การสำรวจสถานที่ (Site Inspection) คือ การตรวจสอบสภาพทั่วๆ ไปของสนามบิน เช่น สภาพการระบายน้ำที่เป็นอยู่ พื้นที่รับน้ำฝนระดับน้ำใต้ดิน

2. การบันทึกข้อมูลการวิจัยและการประเมิน (Records Research and Evaluation) ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบข้อมูลระหว่างการก่อสร้าง การออกแบบ ข้อกำหนด (Specification) วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ และวิธีการบำรุงรักษา รวมทั้งข้อมูลการจราจร สภาพความชื้นของดิน และสภาพดินฟ้าอากาศที่จะทำให้เกิดสภาพที่เป็นอันตรายต่อทางวิ่ง

3. การเก็บตัวอย่างและการทดสอบ (Sampling and Testing) การจำเป็นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับว่าขั้นตอนที่ 1 และ 2 มีข้อมูลครบถ้วนหรือไม่และความละเอียดของการประเมินความแข็งแรงที่ต้องการมากเพียงไร ในกรณีที่ต้องการประเมินเพื่อออกแบบก็จำเป็นต้องเก็บตัวอย่าง และทดสอบเพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติม

4. การแสดงผลการประเมินความแข็งแรง (Evaluation Report) จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เพื่อหาค่าความสามารถรับน้ำหนัก (Load Carrying Capacity) ของทางวิ่ง

2.3.3 <u>การประเมินความแข็งแรงสำหรับพื้นผิวชนิดยืดหยุ่น</u>

ผลการทดสอบค่า CBR ในสนามและในห้องปฏิบัติการเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสำหรับวิธีการออกแบบด้วยค่า CBR ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ในกรณีที่ไม่สามารถทดสอบหาค่า CBR ได้อาจจะใช้ค่าประมาณจากการจำแนกประเภทดินแล้วนำไปเปรียบเทียบเป็นค่า CBR ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นวิธีการเปรียบเทียบของ FAA

ในกรณีที่ทำการทดสอบค่า CBR ในห้องปฏิบัติการจะนำค่า CBR ในสภาพแช่น้ำขังไว้ (Soaked Condition) เป็นเวลา 4 วัน มาใช้ประเมิน

สำหรับการทดสอบ CBR ในสนามจกระทำเมื่อสนามบินนั้นได้ใช้งานมาไม่น้อยกว่า 3 ปี เนื่องจากว่าความแตกต่างของปริมาณความชื้นของดินจะไม่ต่างกันมากนัก

2.3.4 <u>การเปรียบเทียบวัสดุและค่าเทียบเท่า</u> (Materials Comparison and Equivalencies)

2.3.4.1 การประเมินโดยกำหนดให้ชั้นผิวทางเป็น แอสฟิลท์คอนกรีตชั้นพื้นทางและรองพื้นทางเป็นวัสดุมวลหยาบ ในการประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักให้ตรวจสอบ 2 กรณี คือ

1. ประเมินจากความหนาของชั้นพื้นทางและผิวทาง
2. ประเมินจากความหนาของทั้งหมด

ใช้ค่าจากการประเมินที่น้อยที่สุด

2.3.4.2 ค่าแฟคเตอร์ของความหนาเทียบเท่า (Equivalency factor) สำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางแสดงในตารางที่ 2.9

2.3.4.3 ในกรณีที่ชั้นผิวทางมีรอยแตกเนื่องจากอายุใช้งาน หรือการสึกกร่อน โดยชั้นพื้นทางไม่เสียหาย จะให้ความหนาของชั้นผิวทางนี้คือความหนาของชั้นพื้นทาง

2.3.5 <u>การประยุกต์วิธีการประเมินค่า</u> (Application of Procedures)

การประเมินสำหรับพื้นผิวชนิดยืดหยุ่น เมื่อได้ข้อมูลต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วครบถ้วน จากนั้นวิธีการที่ใช้เป็นการย้อนกลับกับวิธีการออกแบบซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 โดยข้อมูลที่ใช้คือ ค่า CBR ของชั้นดินเดิมและชั้นรองพื้นทาง ความหนาของชั้นผิวทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทางและปริมาณการจราจร (Annual departure level) โดยใช้ค่าที่ต่ำที่สุดจากการประเมิน

วิธีการประเมิน

1. ค่าความหนาทั้งหมด จากการเจาะสำหรับหรือแบบ ค่า CBR ในสนามของดินเดิมและปริมาณการจราจร
2. ใช้รูปจากรูปที่ 2.9 ถึง 2.11 หาค่าน้ำหนักที่สามารถรับได้ (ในกรณีที่ใช้วิธีของ FAA)
3. ค่าความหนาของชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ค่า CBR ของชั้นรองพื้นทางหาค่าน้ำหนักที่ทางวิ่งรับได้
4. เปรียบเทียบน้ำหนักจากข้อ 1 และ 3 ใช้ค่าน้อยในการประเมิน
5. ตรวจสอบความหนาที่ต่ำที่สุดของชั้นพื้นทาง
6. ตรวจสอบความหนาที่ต่ำที่สุดของชั้นผิวทาง

ในกรณีที่ใช้ค่าจากเพลตโหล์ดเทส ก็ใช้หลักการเช่นเดียวกัน คือ การย้อนกลับกับการออกแบบ (Reverse of design Method)