

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การพิจารณาคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ

ในการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาในพื้นที่ภาคกลาง โดยเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมด 10 สายทางในภาคกลาง แบ่งเป็น 27 ช่วงทดลอง ช่วงทดลองละ 2 กิโลเมตร ซึ่งจะพิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ดังที่กล่าวในบทที่ 3 สามารถสรุปรายละเอียดของช่วงทดลองดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของช่วงทดลอง

ลำดับ	Section Code	หมายเลขทางหลวง	ตอน กวบคุม	ชื่อสายทาง	ช่วง กม. ทดสอบ	AADT (กันวัน)	ความหนา ผิวทาง (ซม.)	อายุกันทางโดยประมาณ (ปี)	Test * Section
1	F1	3200	0101	ฉะเชิงเทรา - บางน้ำเปรี้ยว	12+000-10+000	4,233	5.8	29	T6
2	F2	3200	0101	ฉะเชิงเทรา - บางน้ำเปรี้ยว	15+000-13+000	4,233	5.8	29	T6
3	F3	0359	0100	แยกทางหลวงหมายเลข 304 - กม.45+851	21+000-23+000	4,293	11.0	2	T4
4	F4	0359	0100	แยกทางหลวงหมายเลข 304 - กม.45+851	29+000-31+000	4,293	10.3	2	T4
5	F5	0359	0100	แยกทางหลวงหมายเลข 304 - กม.45+851	7+000-5+000	4,293	10.8	2	T4
6	F6	0359	0100	แยกทางหลวงหมายเลข 304 - กม.45+851	28+000-26+000	4,293	10.9	2	T4
7	F7	3245	0100	บ้านท่าลาด - สนามชัยเขต	10+000-12+000	6,840	15.2	18	T12
8	F8	3245	0100	บ้านท่าลาด - สนามชัยเขต	13+000-11+000	6,840	15.1	18	T12
9	F9	3121	0100	ต่อเขตเทศบาลบางคล้า - บรรจบทาง NO. 331 (ทุ่งสะเดา)	3+000 - 5+000	10,154	10.0	3	T10

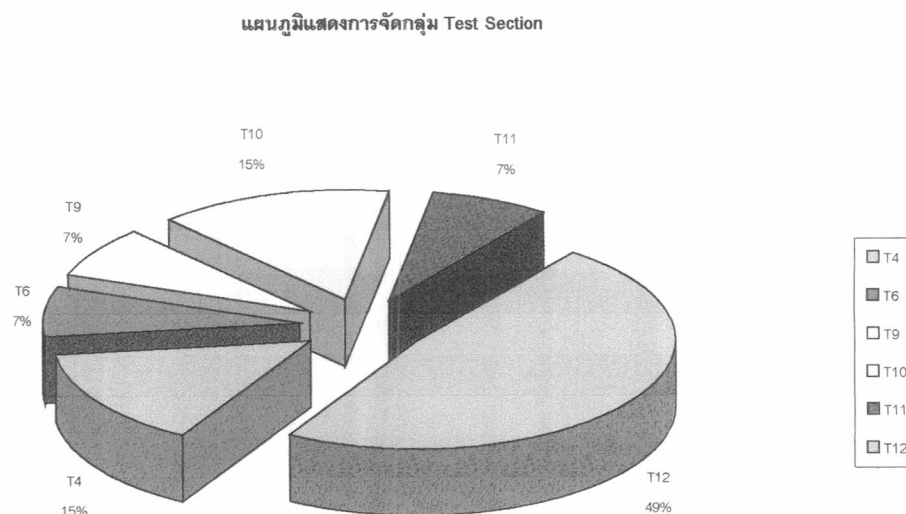
\* การจัดกลุ่ม Test Section ดูได้ในหน้าที่ 30

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของช่วงทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	Section Code	หมายเลขทางหลวง	ตอนควบคุม	ชื่อสายทาง	ช่วง กม. ทดสอบ	AADT (คัน/วัน)	ความหนาผิวทาง (ซม.)	อายุกันทางโดยประมาณ (ปี)	Test * Section
10	F10	3121	0100	ต่อเขตเทศบาลบางคล้า - บรรจบทาง NO. 331 (ทุ่งสะเคา)	5+000 - 3+000	10,154	10.2	3	T10
11	F11	0304	0203	ทางเดี่ยวเมืองฉะเชิงเทรา ด้านเหนือ	2+000 - 4+000	6,631	5.0	29	T9
12	F12	0304	0203	ทางเดี่ยวเมืองฉะเชิงเทรา ด้านเหนือ	5+000 - 3+000	6,631	4.6	29	T9
13	F13	0304	0501	คลองรัง - กบินทร์บุรี	72+000- 74+000	10,930	10.6	2	T10
14	F14	0304	0501	คลองรัง - กบินทร์บุรี	84+000- 86+000	10,930	10.6	2	T10
15	F15	0304	0501	คลองรัง - กบินทร์บุรี	74+000- 72+000	10,930	10.5	39	T12
16	F16	0304	0501	คลองรัง - กบินทร์บุรี	87+000- 85+000	10,930	11.0	39	T12
17	F17	0344	0200	บ้านบึง - คลองพุด	18+000- 20+000	24,106	11.0	22	T12
18	F18	0344	0200	บ้านบึง - คลองพุด	24+000- 26+000	24,106	12.2	22	T12
19	F19	0344	0200	บ้านบึง - คลองพุด	20+000- 18+000	24,106	14.8	22	T12
20	F20	0344	0200	บ้านบึง - คลองพุด	26+000- 24+000	24,106	11.7	22	T12
21	F21	3481	0100	แยกทางหลวงหมายเลข 304 (หนองจอก) - บางขนาก	5+000- 3+000	12,761	11.1	6	T11
22	F22	0304	0300	ทางแยกไปบางปะกง - สามแยกไปปราจีนบุรี	14+000- 16+000	26,655	10.8	39	T12
23	F23	0304	0300	ทางแยกไปบางปะกง - สามแยกไปปราจีนบุรี	23+000- 25+000	26,655	10.0	39	T12
24	F24	0304	0300	ทางแยกไปบางปะกง - สามแยกไปปราจีนบุรี	17+000- 15+000	26,655	10.5	39	T12
25	F25	0304	0300	ทางแยกไปบางปะกง - สามแยกไปปราจีนบุรี	20+000- 18+000	26,655	11.0	39	T12
26	F26	0314	0200	ทางเดี่ยวเมืองฉะเชิงเทรา ด้านใต้	1+000 - 3+000	19,308	12.5	5	T11
27	F27	0314	0200	ทางเดี่ยวเมืองฉะเชิงเทรา ด้านใต้	3+000- 1+000	19,308	13.0	18	T12

\* การจัดกลุ่ม Test Section ดูได้ในหน้าที่ 30

จากผลการพิจารณาคูณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบในตารางที่ 4.1 โดยมีการจัดแยกกลุ่ม Test Section ตามปริมาณการจราจร ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและอายุการให้บริการเป็น T1 ถึง T12 สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงการจัดกลุ่ม Test Section

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ทดสอบ

Section Code	ประเภทวัสดุและความหนาชั้นโครงสร้าง (มม.)				สภาพผิวทาง	
	ชั้นผิวทาง AC	ชั้น Base	ชั้น Subbase	รวม	ขนาดของร่องล้อ (มม.)	ร้อยละการแตกร้าว
F1	58	218	300	576	1.5	3.9
F2	58	202	300	560	3.0	4.1
F3	110	208	250	568	2.6	0.0
F4	103	208	250	561	1.1	0.0
F5	108	200	250	558	0.0	0.8
F6	109	202	250	561	1.6	0.5
F7	152	203	350	705	3.3	2.1

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ทดสอบ (ต่อ)

Section Code	ประเภทวัสดุและความหนาชั้นโครงสร้าง (มม.)				สภาพผิวทาง	
	ชั้นผิวทาง AC	ชั้น Base	ชั้น Subbase	รวม	ขนาดของร่องล้อ (มม.)	ร้อยละการแตกร้าว
F8	AC 151	CR 197	SA 350	698	2.7	1.8
F9	AC 100	CR 250	SA 200	550	3.0	0.0
F10	AC 102	CR 206	SA 200	508	1.7	0.5
F11	AC 50	CR 216	SA 300	566	5.3	10.2
F12	AC 46	CR 268	SA 300	614	8.0	9.5
F13	AC 106	SC 203	SA 200	509	1.8	0.8
F14	AC 106	SC 197	SA 200	503	1.2	0.0
F15	AC 105	SC 203	SA 200	508	2.5	1.0
F16	AC 110	SC 215	SA 200	525	3.9	2.4
F17	AC 110	CR 163	SA 300	573	7.1	8.2
F18	AC 122	CR 192	SA 300	614	9.0	11.5
F19	AC 148	CR 180	SA 300	628	8.0	7.6
F20	AC 117	CR 203	SA 300	620	12.4	17.5
F21	AC 111	CR 198	SA 150	459	6.2	10.0
F22	AC 108	MR 201	SA 300	609	11.8	18.3
F23	AC 100	MR 214	SA 300	614	2.4	2.0
F24	AC 105	MR 205	SA 300	610	4.5	1.5
F25	AC 110	MR 210	SA 300	620	4.7	3.6
F26	AC 125	MR 215	SA 350	690	6.5	8.5
F27	AC 130	MR 220	SA 350	700	7.5	9.7



หมายเหตุ : AC คือ ASPHALTIC CONCRETE (แอสฟัลต์ติกคอนกรีต)  
 CR คือ CRUSHED ROCK (หินคลุก)  
 SC คือ SOIL CEMENT (ดินซีเมนต์)  
 MR คือ CEMENT MODIFIED CRUSHED ROCK (หินคลุกผสมซีเมนต์)  
 SA คือ SOIL AGGREGATE (วัสดุผสมรวม)

จากผลการพิจารณาคูณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบในตารางที่ 4.2 โดยพิจารณาประเภทของวัสดุและความหนาโครงสร้างทางในแต่ละชั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ความหนารวมทั้งหมดของผิวทางที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 705 มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 459 มม. และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 580 มม. ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 60) ของช่วงทดลองมีค่าความหนารวมทั้งหมดของผิวทางอยู่ระหว่าง 550 ถึง 650 มม.

ความหนาของชั้นผิวทาง AC ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 152 มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 46 มม. และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 105 มม. ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 59) ของช่วงทดลองมีค่าความหนาของชั้นผิวทาง AC อยู่ระหว่าง 100 ถึง 125 มม.

ความหนาของชั้น Base ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 268 มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 163 มม. และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 205 มม. ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 67) ของช่วงทดลองมีค่าความหนาของชั้น Base อยู่ระหว่าง 200 ถึง 225 มม.

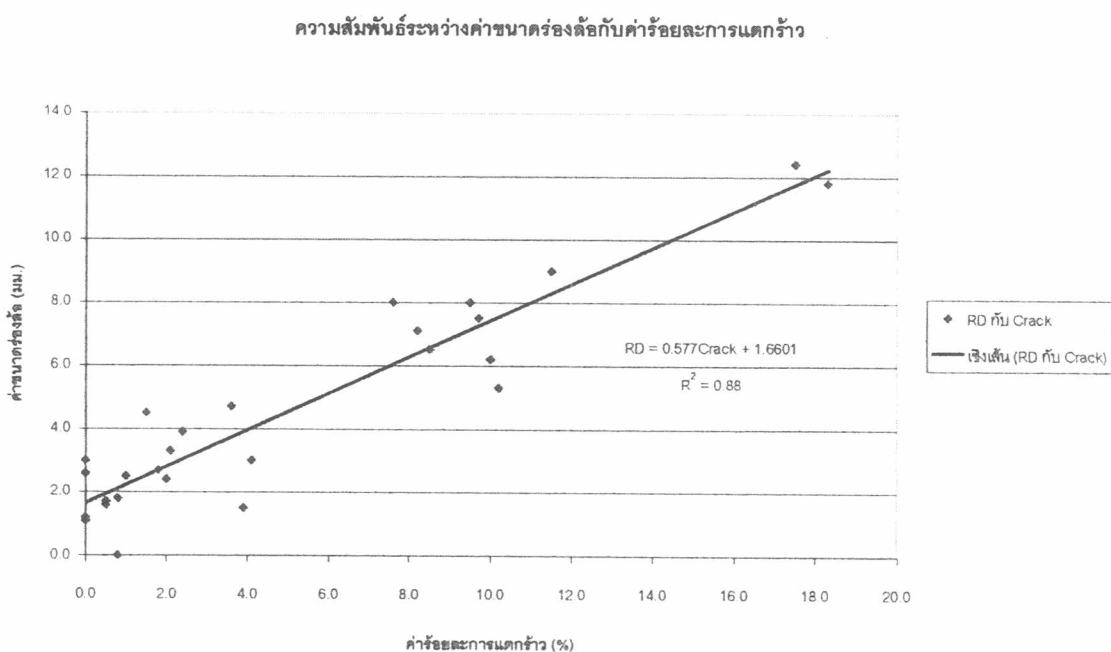
ความหนาของชั้น Subbase ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 350 มม. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 150 มม. และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 270 มม. ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 74) ของช่วงทดลองมีค่าความหนาของชั้น Subbase อยู่ระหว่าง 250 ถึง 400 มม.

และพบว่าประเภทของวัสดุของผิวทางในชั้น Base จากทั้งหมด 27 ช่วงทดลอง ประกอบไปด้วย วัสดุประเภทหินคลุก (CR : Crushed Rock) ร้อยละ 48 วัสดุประเภทดินซีเมนต์ (SC : Soil Cement) ร้อยละ 30 และวัสดุประเภทหินคลุกผสมซีเมนต์ (MR : Cement Modified Crushed Rock) ร้อยละ 22 และพบว่าประเภทของวัสดุของผิวทางในชั้น Subbase เป็นวัสดุประเภทวัสดุผสมรวม (SA : Soil Aggregate) ทุกช่วงทดลองที่ทดสอบ และประเภทของวัสดุของผิวทางในชั้น Subgrade เป็นวัสดุประเภทดินเหนียวทุกช่วงทดลองที่ทดสอบ

และพบว่าสภาพผิวทาง (Road Condition) โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ และร้อยละการแตกร้าว ในทุกช่วงทดลอง โดยจากการทดสอบพบว่ามี้ค่าดังนี้ ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 12.4 มม. และร้อยละการแตกร้าวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.0 ถึง 18.3

#### 4.2 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ

จากข้อมูลของโครงสร้างชั้นทางกับสภาพผิวทาง (Road Condition) รวมทั้งข้อมูลปริมาณการจราจรที่ได้จากการเก็บรวบรวมจากการทดสอบในสนาม ซึ่งในรูปที่ 4.2 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดร่องล้อกับค่าร้อยละการแตกร้าว ดังนี้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดร่องล้อกับค่าร้อยละการแตกร้าว

จากกราฟในรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ในทุกช่วงทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดร่องล้อกับค่าร้อยละการแตกร้าว ได้ดังนี้

$$RD = 0.577 Crack + 1.6601$$

เมื่อ RD = ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ (มม.)  
Crack = ค่าร้อยละการแตกร้าว

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.88 ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบต่อไปได้

นอกจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงอย่างง่ายแล้ว ได้ศึกษาการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) โดยให้ตัวแปรอิสระเป็นกลุ่มของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง โดยใช้วิธีการเลือกตัวแปรอิสระเพื่อให้ได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ซึ่งในการศึกษาจะใช้วิธี Stepwise Regression ซึ่งจะเป็นวิธีที่คัดเลือกตัวแปรเข้าไปทีละ 1 ตัวแปร โดยจะคัดเลือกจนกระทั่งไม่มีตัวแปรอิสระตัวใด สามารถเข้าไปและถูกคัดออกจากตัวแบบได้อีก โดยจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรอิสระที่สามารถเข้ามาในตัวแบบได้ คือ ค่าร้อยละการแตกร้าว (Crack) ค่าปริมาณการจราจร (AADT) และค่าความหนาชั้นผิวทาง (AC) โดยทราบได้จากการทดสอบสมมติฐานที่ใช้ คือ

$H_0$  : ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ( $\beta_i = 0$ )

$H_1$  : ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ( $\beta_i \neq 0$ )

โดยจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $t$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $t$  ที่เปิดได้จากตารางสถิติด้วยจำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ 50 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 ถ้าปฏิเสธสมมติฐานแสดงว่า ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  นั้นควรอยู่ในตัวแบบ ดังตารางที่ 4.3 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) โดยให้ตัวแปรอิสระเป็นกลุ่มของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง

Model	$\beta$	$t$	$t_{0.050(50)} = 1.678$
Crack	0.518	19.005	Reject
AADT	7.098E-05	3.855	Reject
AC	9.390E-03	4.128	Reject

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  สำหรับตัวแปรอิสระ Crack AADT และ AC จึงสามารถนำไปใช้พยากรณ์ได้ โดยได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังนี้

$$RD = 0.518 \text{ Crack} + 7.098E-05 \text{ AADT} + 9.390E-03 \text{ AC}$$

เมื่อ RD = ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ (มม.)  
 Crack = ค่าร้อยละการแตกร้าว  
 AADT = ค่าปริมาณการจราจร (คัน/วัน)  
 AC = ค่าความหนาชั้นผิวทาง (มม.)

จากการพิจารณาหาสมการถดถอยที่เหมาะสมจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อนั้น จะมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ ค่าร้อยละการแตกร้าว ค่าปริมาณการจราจร และค่าความหนาชั้นผิวทาง เนื่องจากการที่มีการแตกร้าว ปริมาณการจราจร และความหนาชั้นผิวทางเพิ่มมากขึ้น เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดขนาดร่องล้อที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งจากการความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.974 ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบต่อไปได้ และมีค่าที่ต่ำกว่าสมการถดถอยแบบเส้นตรงอย่างง่ายในช่วงต้น

#### 4.3 การทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

ในการศึกษานี้ทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer เพื่อศึกษาว่าผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากทั้งสองวิธีนั้นมีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจะทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางทั้งสองวิธีดังที่กล่าวในบทที่ 3 โดยใช้น้ำหนักในการทดสอบของเครื่อง Falling Weight Deflectometer เท่ากับ 566 kPa (80 kN) โดยให้น้ำหนักดังกล่าวใช้เปรียบเทียบกับเครื่องมือ Benkelman Beam ได้ เนื่องจากในการทดสอบของเครื่อง Benkelman Beam นั้นจะใช้รถบรรทุกหนัก 566 kPa (80 kN) ในการทดสอบเช่นกัน โดยใช้วิธีของ Standard Method DOH ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีการทดลองตามแบบ Transient Deflection โดยจะทดสอบด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer ก่อน แล้วจึงค่อยตามด้วยเครื่อง Benkelman Beam ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิในการทดสอบจะไม่ต่างกันหรือต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทดสอบติดต่อกันทันทีในจุด

ทดสอบเดียวกัน และจากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางทั้ง 2 วิธี ของทุกจุดทดสอบทั้งหมด 1,101 จุดทดสอบ สามารถนำมาสรุปค่าทางสถิติในเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 4.4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าการแอ่นตัวของผิวทางทุกจุดทดสอบ

ค่าทางสถิติ	Benkelman Beam	Falling Weight Deflectometer
Max	1.600	0.990
Min	0.020	0.055
Range	1.580	0.935
Mean ( $\bar{x}$ )	0.400	0.369
Standard Deviation (SD)	0.201	0.162
Coefficient of Variation (C.V.)	0.503	0.439
Standard Error (SE)	0.006	0.005
Percentile 85	0.600	0.530

จากตารางที่ 4.4 พบว่าจากการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากทั้งสองเครื่องมือในทุกจุดทดสอบ จะให้ค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam มีค่ามากกว่าของเครื่อง Falling Weight Deflectometer โดยจะพบว่าค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam นั้นจะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าผิดพลาดมาตรฐาน มีค่ามากกว่าของเครื่อง Falling Weight Deflectometer นั้นหมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการใช้เครื่องมือ Benkelman Beam มีค่าการกระจายและความผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer

ต่อไปเป็นการพิจารณาค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของผิวทาง ในทุกระยะ 1 กิโลเมตรจากช่วงทดลองดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.5 ดังนี้

จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางทั้ง 2 วิธีของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิ โดยเรียงจากค่ามากไปหาน้อยของเครื่อง Benkelman Beam ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.3 และสามารถนำมาสรุปค่าทางสถิติในเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 4.6 ดังต่อไปนี้

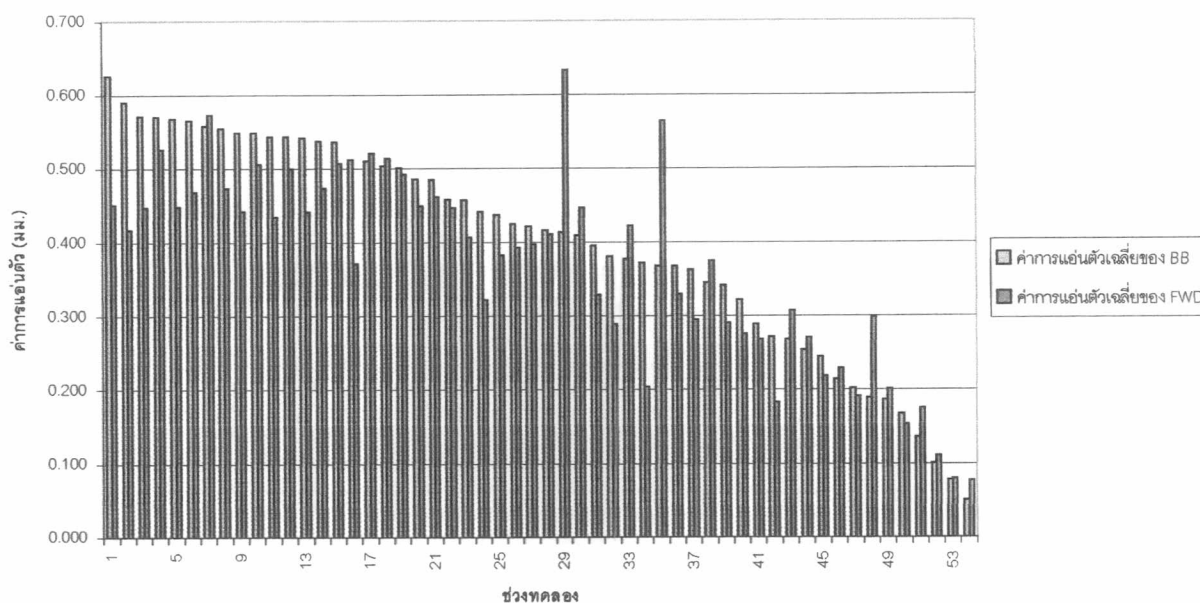
ตารางที่ 4.5 ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบภายในสนามทั้ง 2 วิธี

Section Code	Sub-Section	ค่าการแอ่นตัว เฉลี่ย BB (มม.)	ค่าการแอ่นตัว เฉลี่ย FWD (มม.)	ผลต่างค่า การแอ่นตัวเฉลี่ย BB - FWD (มม.)
F1	1	0.459	0.447	0.012
	2	0.410	0.447	-0.037
F2	1	0.510	0.521	-0.011
	2	0.570	0.526	0.044
F3	1	0.372	0.204	0.168
	2	0.322	0.276	0.046
F4	1	0.504	0.514	-0.010
	2	0.368	0.564	-0.196
F5	1	0.377	0.423	-0.046
	2	0.417	0.411	0.006
F6	1	0.414	0.633	-0.219
	2	0.626	0.451	0.175
F7	1	0.363	0.295	0.068
	2	0.342	0.291	0.051
F8	1	0.442	0.322	0.120
	2	0.368	0.330	0.038
F9	1	0.541	0.442	0.099
	2	0.421	0.398	0.023
F10	1	0.568	0.449	0.119
	2	0.544	0.435	0.109
F11	1	0.187	0.201	-0.014
	2	0.485	0.462	0.023
F12	1	0.437	0.383	0.054
	2	0.346	0.375	-0.030
F13	1	0.214	0.229	-0.015
	2	0.254	0.271	-0.017
F14	1	0.189	0.299	-0.110
	2	0.269	0.307	-0.038
F15	1	0.136	0.175	-0.039
	2	0.203	0.191	0.012

ตารางที่ 4.5 ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบภายในสนามทั้ง 2 วิธี (ต่อ)

Section Code	Sub-Section	ค่าการแอ่นตัว เฉลี่ย BB (มม.)	ค่าการแอ่นตัว เฉลี่ย FWD (มม.)	ผลต่างค่า การแอ่นตัวเฉลี่ย BB - FWD (มม.)
F16	1	0.289	0.268	0.021
	2	0.245	0.219	0.026
F17	1	0.486	0.450	0.036
	2	0.544	0.500	0.044
F18	1	0.500	0.492	0.008
	2	0.537	0.474	0.063
F19	1	0.558	0.573	-0.015
	2	0.566	0.469	0.097
F20	1	0.548	0.506	0.042
	2	0.590	0.417	0.173
F21	1	0.555	0.474	0.081
	2	0.536	0.507	0.029
F22	1	0.571	0.448	0.123
	2	0.457	0.407	0.050
F23	1	0.426	0.393	0.033
	2	0.396	0.329	0.067
F24	1	0.050	0.077	-0.027
	2	0.078	0.080	-0.002
F25	1	0.168	0.154	0.014
	2	0.100	0.111	-0.011
F26	1	0.512	0.371	0.141
	2	0.549	0.443	0.106
F27	1	0.381	0.289	0.092
	2	0.272	0.183	0.089

แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

ค่าทางสถิติ	Benkelman Beam	Falling Weight Deflectometer
Max	0.626	0.633
Min	0.050	0.077
Range	0.576	0.556
Mean ( $\bar{x}$ )	0.399	0.369
Standard Deviation (SD)	0.149	0.133
Coefficient of Variation (C.V.)	0.373	0.360
Standard Error (SE)	0.020	0.018
Percentile 85	0.548	0.502

จากรูปที่ 4.3 ค่าการแอ่นตัวโดยส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการทดลองพบว่า ค่าการแอ่นตัวของ BB มากกว่าค่าการแอ่นตัวของ FWD เท่ากับร้อยละ 70 ของช่วงทดลองทั้งหมด และอีกร้อยละ 30 เป็นค่าการแอ่นตัวของ BB น้อยกว่า FWD โดยจากการแยกพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่มพบว่า กลุ่มที่ค่าการแอ่นตัวของ BB มากกว่า FWD มีค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวที่มากกว่าอยู่เท่ากับ 0.067 มม.



และกลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวของ BB น้อยกว่า FWD มีค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวที่น้อยกว่าเท่ากับ 0.048 มม.

และจากตารางที่ 4.6 พบว่าจากการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากทั้งสองเครื่องมือจะให้ค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam มีค่ามากกว่าของเครื่อง Falling Weight Deflectometer โดยจะพบว่าค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam นั้นจะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าผิดพลาดมาตรฐาน มีค่ามากกว่าของเครื่อง Falling Weight Deflectometer นั้นหมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการใช้เครื่องมือ Benkelman Beam มีค่าการกระจายและความผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องเช่นเดียวกับการคำนวณค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าการแอ่นตัวในทุกจุดทดสอบที่ได้คำนวณแล้วในตารางที่ 4.4

#### 4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบ

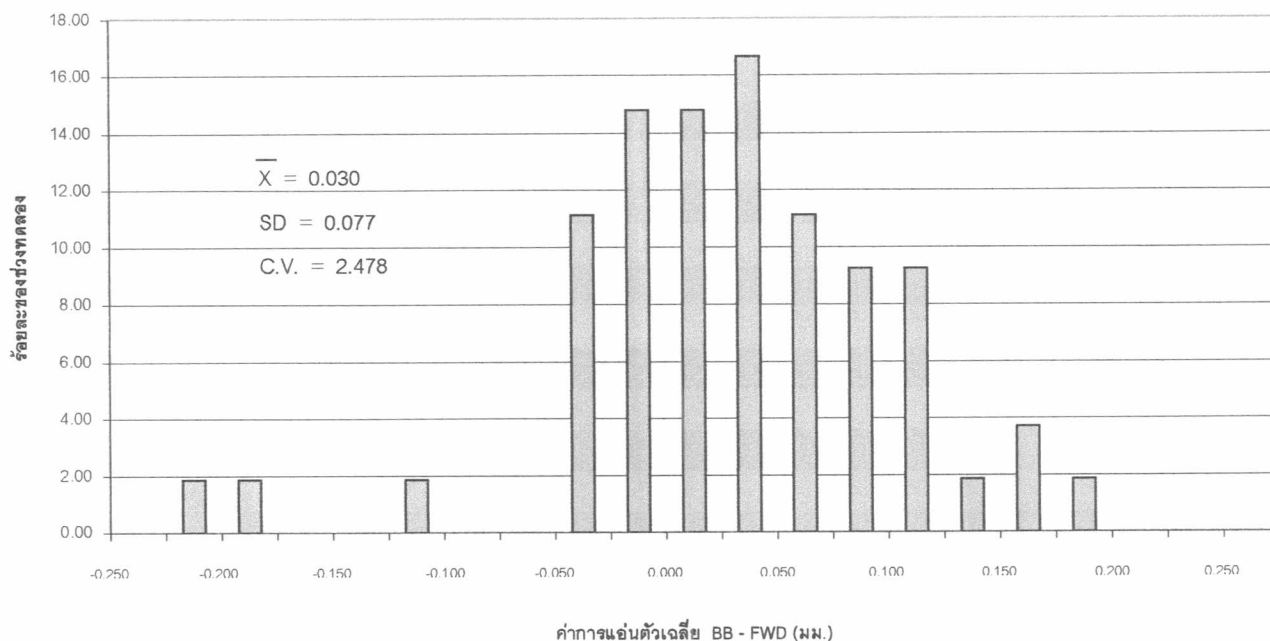
นำค่าการแอ่นตัวของผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าการแอ่นตัวในข้างต้น โดยค่าผลต่างสามารถอธิบายได้โดย

$$\text{ปริมาณที่แตกต่าง} = \text{ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่ได้จากวิธี BB} - \text{ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่ได้จากวิธี FWD}$$

โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิแสดงผลต่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของวิธี BB และ FWD โดยจะแสดงดังรูปที่ 4.4

โดยจากการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตของผลต่างค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD เท่ากับ 0.030 มม. ซึ่งหมายความว่าผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่วัดได้จากเครื่อง BB นั้นให้ค่าเฉลี่ยที่มากกว่าเครื่อง FWD โดยประมาณ 0.030 มม.

## แผนภูมิแสดงค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย BB - FWD



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงผลต่างค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จาก BB และ FWD

นอกจากการวิเคราะห์ในข้างต้นแล้ว ได้ศึกษาการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับ 2 กลุ่มตัวอย่าง กรณีกลุ่มตัวอย่างมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้กลุ่มตัวอย่างเดียวกันทดสอบสองครั้ง เป็นการทดสอบความแตกต่างเป็นคู่ ๆ คือการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งการทดสอบสมมติฐานทางสถิติสำหรับการทดสอบแบบจับคู่ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$H_0 : \text{ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรไม่แตกต่างกัน } (\mu_d = 0)$$

$$H_1 : \text{ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน } (\mu_d \neq 0)$$

โดยจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $t$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $t$  ที่เปิดได้จากตารางสถิติด้วยจำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ 53 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 ถ้าปฏิเสธสมมติฐานแสดงว่า ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรนั้นแตกต่างกัน หรือค่าการแอ่นตัวที่ใช้ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาต่อไปว่าวิธีการใดให้ค่าแตกต่างกันอย่างไร โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลต่าง  $\bar{d}$

ตารางที่ 4.7 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ของค่าการแอ่นตัว

Paired Test	Correlation	$\bar{d}$	t	$t_{0.050(53)} = 1.676$
D_BB - D_FWD	0.859	3.0852E-02	2.963	Reject

เมื่อ  $D_{BB}$  = ค่าการแอ่นตัวของ BB (มม.)

$D_{FWD}$  = ค่าการแอ่นตัวของ FWD (มม.)

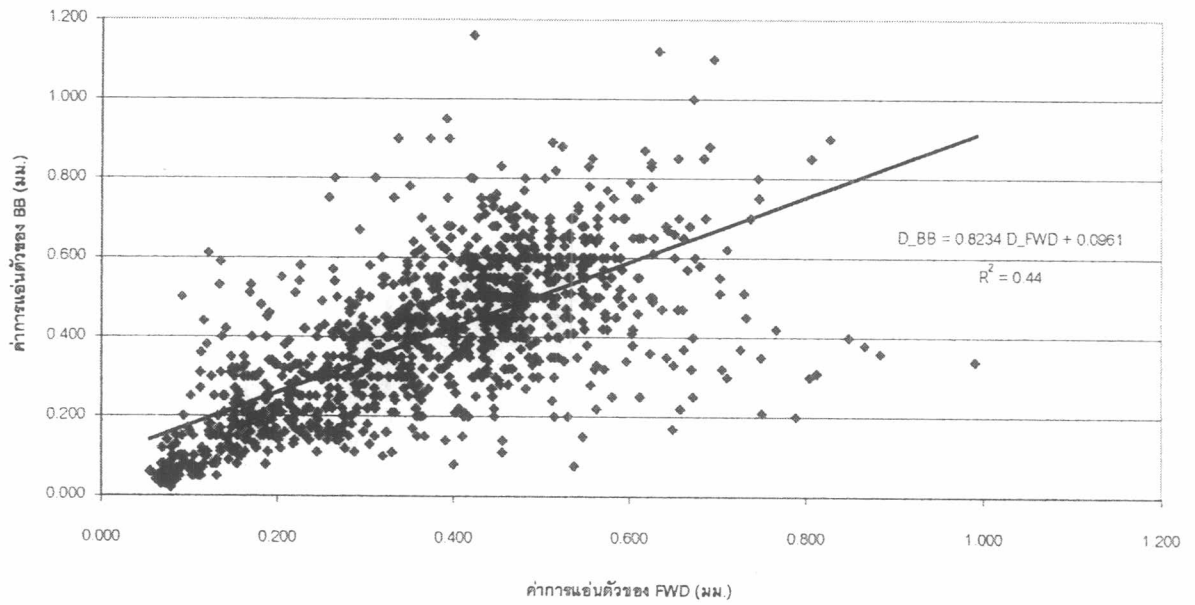
จากตารางพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 กลุ่มที่นำมาทดสอบ ค่าที่ได้เท่ากับ 0.859 แสดงว่าค่าการแอ่นตัวของทั้ง 2 วิธี มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงและไปในทิศทางเดียวกัน

และจากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน หรือค่าการแอ่นตัวที่ใช้ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาคือไปว่าวิธีการใดให้ค่าแตกต่างกันอย่างไร โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลต่าง  $\bar{d}$  พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.030 มีค่าเป็นบวก แสดงว่าวิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยมากกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer เนื่องจากเครื่อง Benkelman Beam จะพิจารณาจากชั้นผิวทางเป็นหลัก ในทางกลับกันเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะพิจารณาทั้งโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งจากการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธีดังกล่าว พบว่ามีค่าสอดคล้องกับการคำนวณในข้างต้น

#### การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของ BB และ FWD

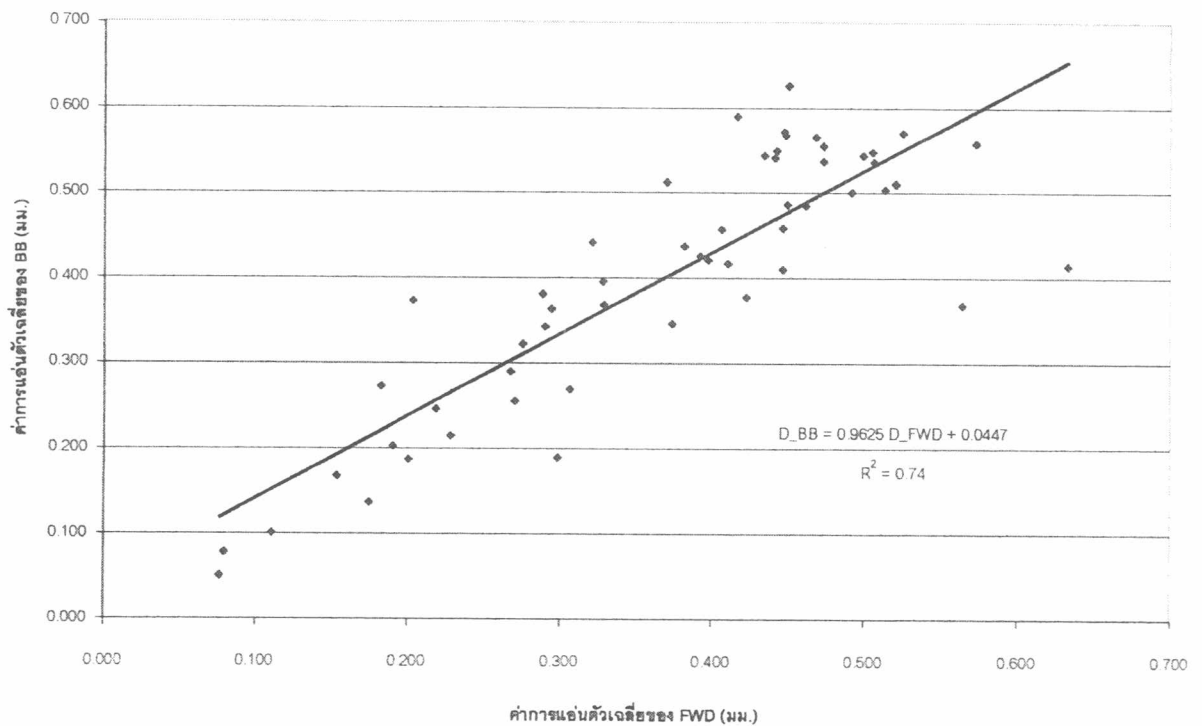
จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางทั้ง 2 วิธี ในทุกจุดทดสอบ นำมาหาความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ค่าการแอ่นตัวของ BB และ FWD ทุกจุดทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 1,101 จุดทดสอบ

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของ BB และ FWD ทุกจุดทดสอบ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของ BB และ FWD ทุกจุดทดสอบ

ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB และ FWD ทุกช่วงทดลอง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB และ FWD ทุกช่วงทดลอง

จากรูปที่ 4.5 พบว่าจากความสัมพันธ์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.44 ซึ่งมีค่าที่ต่ำไป ดังนั้น จึงนำค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยในทุกช่วงทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB และ FWD ในทุกช่วงทดลอง ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ในทุกช่วงทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$D_{BB} = 0.9625 D_{FWD} + 0.0447$$

เมื่อ  $D_{BB}$  = ค่าการแอ่นตัวของ BB ที่ได้จากความสัมพันธ์ (มม.)

$D_{FWD}$  = ค่าการแอ่นตัวของ FWD ที่ได้จากการทดสอบในสนาม (มม.)

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.74 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้

นอกจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงอย่างง่ายแล้ว ได้ศึกษาการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) โดยให้ตัวแปรตามคือค่าการแอ่นตัวของ BB และตัวแปรอิสระเป็นกลุ่มของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง รวมทั้งค่าการแอ่นตัวของ FWD โดยใช้วิธีการเลือกตัวแปรอิสระเพื่อให้ได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ซึ่งในการศึกษาจะใช้วิธี Stepwise Regression ซึ่งจะเป็นวิธีที่คัดเลือกตัวแปรเข้าไปทีละ 1 ตัวแปร โดยจะคัดเลือกจนกระทั่งไม่มีตัวแปรอิสระตัวใด สามารถเข้าไปและถูกคัดออกจากตัวแบบได้อีก โดยจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรอิสระที่สามารถเข้ามาในตัวแบบได้ คือ ค่าการแอ่นตัวของ FWD ( $D_{FWD}$ ) และค่าขนาดร่องล้อ (RD) โดยทราบได้จากการทดสอบสมมติฐานที่ใช้ คือ

$H_0$  : ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ( $\beta_i = 0$ )

$H_1$  : ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ( $\beta_i \neq 0$ )

โดยจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $t$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $t$  ที่เปิดได้จากตารางสถิติด้วยจำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ 51 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 ถ้าปฏิเสธสมมติฐานแสดงว่า ตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  นั้นควรอยู่ในตัวแบบ

ตารางที่ 4.8 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) โดยให้ตัวแปรอิสระเป็นกลุ่มของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง และค่าการแอ่นตัวของ FWD

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณของค่าการแอ่นตัว

Model	$\beta$	t	$t_{0.050(51)} = 1.677$
D_FWD	0.963	23.288	Reject
RD	9.406E-03	3.249	Reject

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  สำหรับตัวแปรอิสระ D\_FWD และ RD จึงสามารถนำไปใช้พยากรณ์ได้ โดยได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังนี้

$$D_{BB} = 0.963 D_{FWD} + 9.406E-03 RD$$

- เมื่อ
- D<sub>BB</sub> = ค่าการแอ่นตัวของ BB ที่ได้จากความสัมพันธ์ (มม.)
  - D<sub>FWD</sub> = ค่าการแอ่นตัวของ FWD ที่ได้จากการทดสอบในสนาม (มม.)
  - RD = ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ (มม.)

จากการพิจารณาหาสมการถดถอยที่เหมาะสมจากค่าการแอ่นตัวของผิวทางและคุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ศึกษา พบว่าค่าการแอ่นตัวของ BB นั้น จะมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ ค่าการแอ่นตัวของ FWD และค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ เนื่องจากการวัดค่าการแอ่นตัวของ BB นั้น จะมีผลโดยตรงกับค่าคุณสมบัติของชั้นผิวทางมากกว่าการวัดค่าการแอ่นตัวของ FWD ดังนั้นทำให้สมการถดถอยที่ได้จึงมีค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อร่วมด้วย ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดกันใจ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.972 ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบต่อไปได้ และมีค่าที่ดีกว่าสมการถดถอยแบบเส้นตรงอย่างง่ายในข้างต้น

#### 4.5 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ELMOD ทำให้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ได้ โดยหาออกมาเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งออกเป็น E1 E2 E3 และ E4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ที่ทดสอบ

Section Code	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)			
	ชั้นผิวทาง AC (E1)	ชั้น Base (E2)	ชั้น Subbase (E3)	ชั้น Subgrade (E4)
F1	2,910	239	125	220
F2	2,910	175	100	245
F3	2,002	340	229	251
F4	1,949	75	109	130
F5	2,000	133	101	94
F6	1,959	67	147	156
F7	1,477	70	298	392
F8	1,307	50	294	386
F9	2,445	136	234	174
F10	1,936	125	274	188
F11	2,949	314	156	134
F12	2,951	335	99	116
F13	1,946	122	137	59
F14	1,946	168	110	57
F15	1,940	375	260	217
F16	1,947	288	156	177
F17	2,710	137	100	72
F18	1,583	35	157	160
F19	1,416	53	32	54
F20	1,932	45	153	130
F21	1,369	81	193	191
F22	1,945	105	45	82
F23	1,983	132	33	182
F24	1,982	395	90	266
F25	1,940	385	23	166
F26	1,964	54	248	238
F27	1,958	184	215	197

จากผลการพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ที่ทดสอบ โดยพิจารณาแบ่งออกเป็น E1 E2 E3 และ E4 ของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้นผิวทาง AC (E1) ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 2,951 MPa ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1,307 MPa และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 2,050 MPa ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 59) ของช่วงทดลองมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้นผิวทาง AC (E1) เท่ากับ 2,000 MPa

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Base (E2) ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 395 MPa ค่าต่ำสุดเท่ากับ 35 MPa และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 250 MPa ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 67) ของช่วงทดลองมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Base (E2) อยู่ระหว่าง 150 ถึง 250 MPa

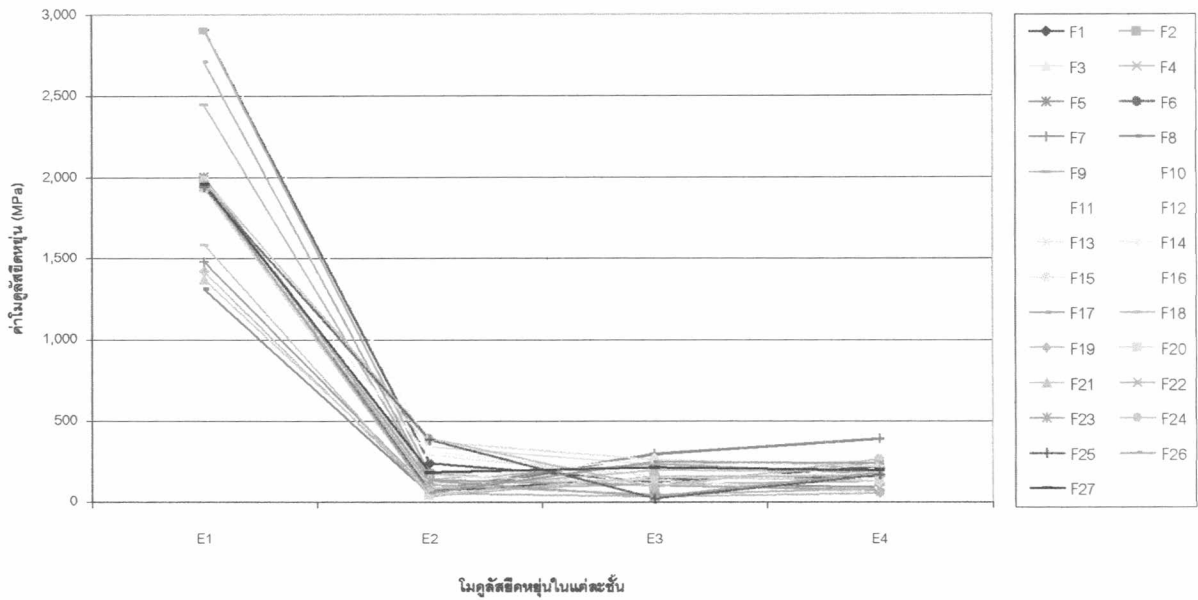
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Subbase (E3) ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 298 MPa ค่าต่ำสุดเท่ากับ 23 MPa และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 175 MPa ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 52) ของช่วงทดลองมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Subbase (E3) อยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 MPa

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Subgrade (E4) ที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 392 MPa ค่าต่ำสุดเท่ากับ 54 MPa และค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 150 MPa ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 (ร้อยละ 52) ของช่วงทดลองมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้น Subgrade (E4) อยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 Mpa

โดยในรูปที่ 4.7 สามารถสรุปเป็นกราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้น โดยพิจารณาแบ่งออกเป็น E1 E2 E3 และ E4 ของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น ทั้งหมด 27 ช่วงทดลอง



กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้น

#### 4.6 การออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทาง

จากการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer สามารถนำมาออกแบบหาค่าความหนาเสริมผิวทางได้ว่า ค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีนั้นมีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจะออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางทั้งสองวิธี ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยในการออกแบบจากเครื่อง Benkelman Beam จะใช้วิธีของ Standard Method DOH ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีของ California Method และการออกแบบจากเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะใช้โปรแกรม ELMOD มาใช้ในการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทาง ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดของค่าความหนาเสริมผิวทางในทุกระยะ 1 กิโลเมตรจากช่วงทดลองดังกล่าว แสดงในตารางที่ 4.10 ดังนี้

จากผลการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางทั้ง 2 วิธีของช่วงทดลอง ที่ใช้ในการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิ โดยเรียงจากค่ามากไปหาน้อยของเครื่อง Benkelman Beam ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 4.8 และสามารถนำมาสรุปค่าทางสถิติในเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 4.11 ดังต่อไปนี้

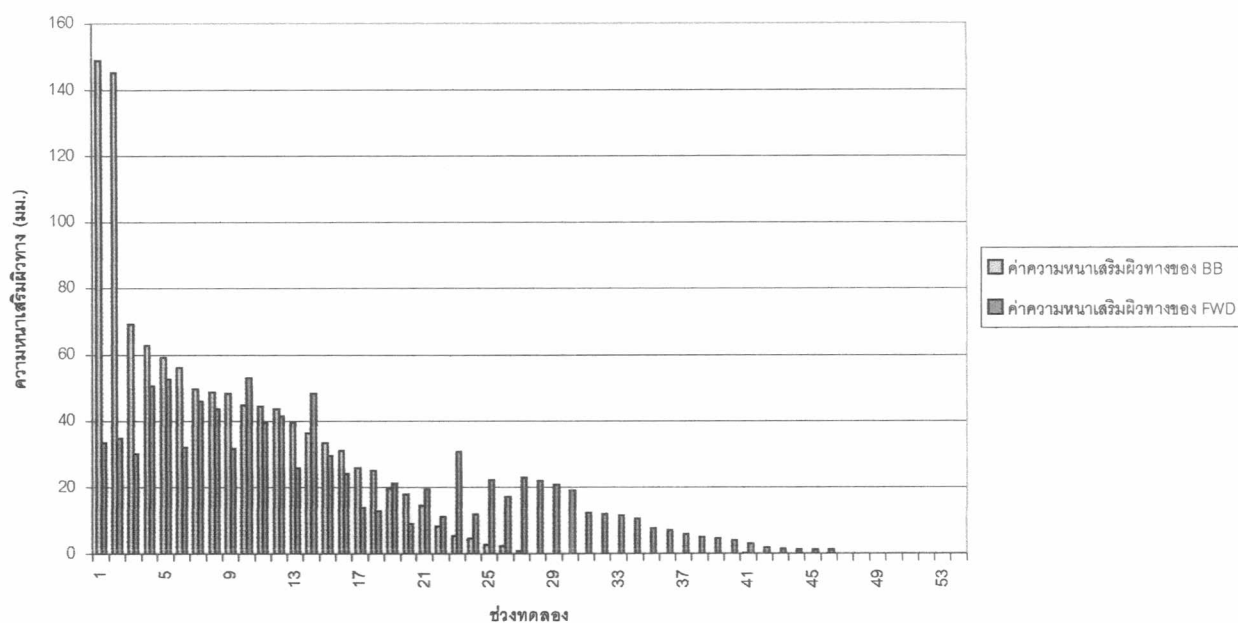
ตารางที่ 4.10 ค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการออกแบบของทั้ง 2 วิธี

Section Code	Sub-Section	ค่าความหนาเสริมผิวทาง BB (มม.)	ค่าความหนาเสริมผิวทาง FWD (มม.)	ผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทาง BB - FWD (มม.)
F1	1	0	7	-7
	2	0	12	-12
F2	1	2	17	-15
	2	3	22	-20
F3	1	0	0	0
	2	0	5	-5
F4	1	1	23	-22
	2	0	19	-19
F5	1	0	8	-8
	2	0	3	-3
F6	1	5	31	-25
	2	25	13	12
F7	1	0	0	0
	2	0	4	-4
F8	1	0	12	-12
	2	0	2	-2
F9	1	18	9	9
	2	0	4	-4
F10	1	4	12	-7
	2	8	11	-3
F11	1	0	1	-1
	2	49	46	3
F12	1	33	30	4
	2	0	22	-22
F13	1	0	1	-1
	2	0	1	-1
F14	1	0	21	-21
	2	0	0	0
F15	1	0	0	0
	2	0	0	0
F16	1	0	11	-11
	2	0	1	-1
F17	1	26	14	12
	2	31	24	7
F18	1	45	53	-8
	2	59	53	6
F19	1	36	48	-12
	2	40	26	14

ตารางที่ 4.10 ค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการออกแบบของทั้ง 2 วิธี (ต่อ)

Section Code	Sub-Section	ค่าความหนาเสริมผิวทาง BB (มม.)	ค่าความหนาเสริมผิวทาง FWD (มม.)	ผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทาง BB - FWD (มม.)
F20	1	63	51	12
	2	145	35	111
F21	1	49	44	5
	2	44	41	2
F22	1	149	33	115
	2	69	30	39
F23	1	20	21	-2
	2	14	19	-5
F24	1	0	0	0
	2	0	0	0
F25	1	0	6	-6
	2	0	0	0
F26	1	48	32	17
	2	44	40	5
F27	1	56	32	24
	2	0	11	-11

แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD

ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าความหนาเสริมผิวทาง

ค่าทางสถิติ	Benkelman Beam	Falling Weight Deflectometer
Max	149	53
Min	0	0
Range	149	53
Mean ( $\bar{x}$ )	20.11	17.80
Standard Deviation (SD)	32.80	16.24
Coefficient of Variation (C.V.)	1.631	0.912
Standard Error (SE)	4.464	2.210
Percentile 85	53.00	34.00

จากรูปที่ 4.8 ค่าความหนาเสริมผิวทางโดยส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการทดลองพบว่า ค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่าค่าการแอ่นตัวของ FWD เท่ากับร้อยละ 53 ของช่วงทดลองทั้งหมด ร้อยละ 32 เป็นค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD และอีกร้อยละ 15 เป็นค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB เท่ากับ FWD โดยจากการแยกพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่มพบว่ากลุ่มที่ค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD มีค่าเฉลี่ยความหนาเสริมผิวทางที่มากกว่าอยู่เท่ากับ 23 มม. และกลุ่มที่มีค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่า FWD มีค่าเฉลี่ยความหนาเสริมผิวทางที่น้อยกว่าเท่ากับ 9 มม.

และจากตารางที่ 4.11 พบว่าจากการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางจากทั้งสองวิธีจะให้ค่าความหนาเสริมผิวทางของค่าเฉลี่ยเลขคณิตที่ใกล้เคียงกัน โดยจะพบว่าค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam นั้นจะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าผิดพลาดมาตรฐาน มีค่ามากกว่าของเครื่อง Falling Weight Deflectometer นั้นหมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam มีค่าการกระจายและความผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer

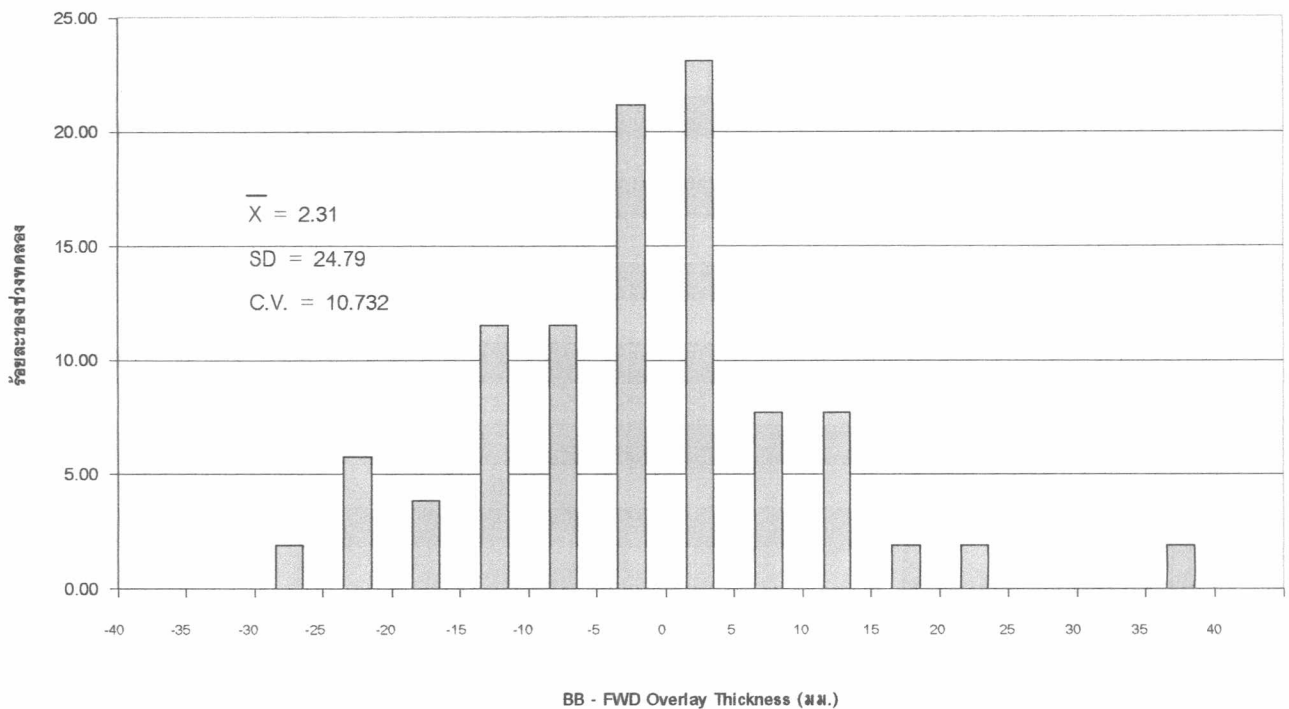
#### 4.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการออกแบบ

นำค่าความหนาเสริมผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการออกแบบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าความหนาเสริมผิวทาง แสดงถึงผลต่างของค่าความหนาเสริมผิวทางในข้างต้น โดยค่าผลต่างสามารถอธิบายได้โดย

$$\text{ปริมาณที่แตกต่าง} = \text{ค่าความหนาเสริมผิวทางจากวิธี BB} - \text{ค่าความหนาเสริมผิวทางจากวิธี FWD}$$

โดยในการเปรียบเทียบนี้แสดงเป็นแผนภูมิผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางของวิธี BB และ FWD โดยจะแสดงดังรูปที่ 4.9

แผนภูมิแสดงค่าความหนาเสริมผิวทาง BB - FWD



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จาก BB และ FWD

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตของผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD เท่ากับ 2.31 มม. ซึ่งหมายความว่าผลการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB นั้นให้ค่าเฉลี่ยที่มากกว่าเครื่อง FWD โดยประมาณ 2.31 มม.

นอกจากการวิเคราะห์ในข้างต้นแล้ว ได้ศึกษาการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับ 2 กลุ่มตัวอย่าง กรณีกลุ่มตัวอย่างมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้กลุ่มตัวอย่างเดียวกันทดสอบสองครั้ง เป็นการทดสอบความแตกต่างเป็นคู่ ๆ คือการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งการทดสอบสมมติฐานทางสถิติสำหรับการทดสอบแบบจับคู่ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$H_0 : \text{ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรไม่แตกต่างกัน } (\mu_d = 0)$$

$$H_1 : \text{ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรแตกต่างกัน } (\mu_d \neq 0)$$

โดยจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $t$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $t$  ที่เปิดได้จากตารางสถิติด้วยจำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ 53 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 ถ้าปฏิเสธสมมติฐานแสดงว่า ค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรนั้นแตกต่างกัน หรือค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธีแตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาต่อไปว่าวิธีการใดให้ค่าแตกต่างกันอย่างไร โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลต่าง  $\bar{d}$  ดังตารางที่ 4.12 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.12 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ของค่าความหนาเสริมผิวทาง

Paired Test	Correlation	$\bar{d}$	$t$	$t_{0.050(53)} = 1.676$
O_BB - O_FWD	0.681	2.31	0.686	Accept

เมื่อ O\_BB = ค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB (มม.)

O\_FWD = ค่าความหนาเสริมผิวทางของ FWD (มม.)

จากตารางพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 กลุ่มที่นำมาทดสอบ ค่าที่ได้เท่ากับ 0.681 แสดงว่าค่าความหนาเสริมผิวทางของทั้ง 2 วิธี มีความสัมพันธ์ในระดับปานกลางและไปในทิศทางเดียวกัน

และจากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากรไม่แตกต่างกัน หรือค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 แต่จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของผลต่าง  $d$  พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.31 มีค่าเป็นบวก แสดงว่าวิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าความหนาเสริมผิวทางเฉลี่ยมากกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer อยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธีดังกล่าว พบว่ามีค่าสอดคล้องกับการคำนวณในช่วงต้น

#### 4.8 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับหลายกลุ่มตัวอย่าง

หลังจากผ่านขั้นตอนการออกแบบเสริมผิวทางแบบยึดหยุ่นทั้งวิธี Benkelman Beam และวิธี Falling Weight Deflectometer แล้ว จะทำให้ทราบว่าแต่ละช่วงทดลองมีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางเป็นปริมาณเท่าไร ในขั้นตอนนี้จะนำค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางดังกล่าวมาเลือกใช้ในการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับหลายกลุ่มตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way Analysis of Variances) ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้กลุ่มตัวอย่างเดียวกันทดสอบสองครั้ง เป็นการแบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 2 ประเภทคือ กลุ่มของวิธีที่ใช้ในการศึกษา และกลุ่มที่จำแนกตามคุณสมบัติของช่วงทดลอง (Test Section) ซึ่ง Test Section ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ T4 T6 T9 T10 T11 และ T12

ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบสำหรับแต่ละค่าจะทำที่ 6 Test Section รวมทั้งหมด 54 ช่วงทดลองในแต่ละวิธี ซึ่งแสดงการทดสอบสำหรับแต่ละค่าได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบและออกแบบสำหรับแต่ละค่า

วิธีการทดสอบ	Test Section					
	T4	T6	T9	T10	T11	T12
ทดสอบโดยวิธี BB	8 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	8 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	26 ช่วงทดลอง
ทดสอบโดยวิธี FWD	8 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	8 ช่วงทดลอง	4 ช่วงทดลอง	26 ช่วงทดลอง

โดยการกำหนดสมมติฐานทางสถิติสำหรับการทดสอบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง เป็นการทดสอบผลกระทบของแต่ละปัจจัย สามารถกำหนดได้ดังนี้

- สำหรับตัวแปรด้านแถว คือ วิธีที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจำแนกได้ 2 วิธี  
 $H_0$  : ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้ในแต่ละวิธี ไม่แตกต่างกัน  
 $H_1$  : ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้ในแต่ละวิธี แตกต่างกัน
- สำหรับตัวแปรด้านคอลัมน์ คือ Test Section ซึ่งจำแนกได้ 6 กลุ่ม  
 $H_0$  : ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่จำแนกโดย Test Section ไม่แตกต่างกัน  
 $H_1$  : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทาง แตกต่างกัน

โดยจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $F$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $F$  ที่เปิดได้จากตารางสถิติด้วยจำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ (1,96) และ (5,96) ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.050 ถ้าปฏิเสธสมมติฐานแสดงว่า มีอย่างน้อย 2 กลุ่มประชากรที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.14 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง เป็นการทดสอบผลกระทบของแต่ละปัจจัย โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.14 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางของค่าการแอ่นตัว

Variable	df	F	$F_{0.050 (df,96)}$	$H_0$
METHOD	1	9.709	3.95	Reject
TEST SECTION	5	7.238	2.32	Reject

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ทั้งสองปัจจัยแสดงว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้ในแต่ละวิธี และจำแนกโดย Test Section แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธีในตอนต้น พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบในข้างต้น คือสำหรับค่าการแอ่นตัวพบว่าการใช้เครื่องมือและ Test Section ที่แตกต่างกันในการทดสอบ จะมีผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวของถนน



ตารางที่ 4.15 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง เป็นการทดสอบผลกระทบของแต่ละปัจจัย โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.15 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางของค่าความหนาเสริมผิวทาง

Variable	df	F	F <sub>0.050 (df,96)</sub>	H <sub>0</sub>
METHOD	1	0.131	3.95	Accept
TEST SECTION	5	3.859	2.32	Reject

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ยอมรับสมมติฐาน H<sub>0</sub> ของปัจจัยที่ 1 แสดงว่าค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้ในแต่ละวิธี ไม่แตกต่างกัน และปฏิเสธสมมติฐาน H<sub>0</sub> ของปัจจัยที่ 2 แสดงว่าค่าความหนาเสริมผิวทางที่จำแนกโดย Test Section แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) โดยทดสอบจากค่าเฉลี่ยของค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากทั้ง 2 วิธีในตอนต้น พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบในข้างต้น คือสำหรับค่าความหนาเสริมผิวทางพบว่าการใช้วิธีที่แตกต่างกันในการออกแบบ จะไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนาเสริมผิวทางของถนน แต่การจำแนกคุณสมบัติออกเป็นกลุ่ม Test Section มีผลกระทบต่อความหนาเสริมผิวทางของถนน

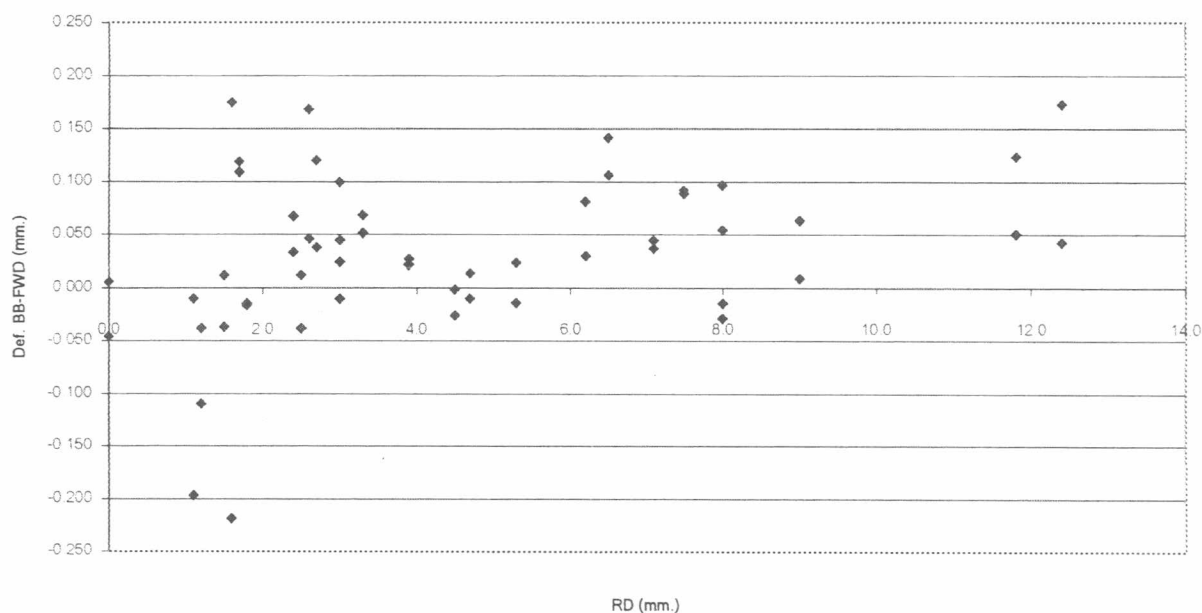
#### 4.9 การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ

##### 4.9.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาจากขนาดร่องล้อ

###### - ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

นำค่าการแอ่นตัวของผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าการแอ่นตัวในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากขนาดร่องล้อแสดงดังรูปที่ 4.10

Def. BB-FWD

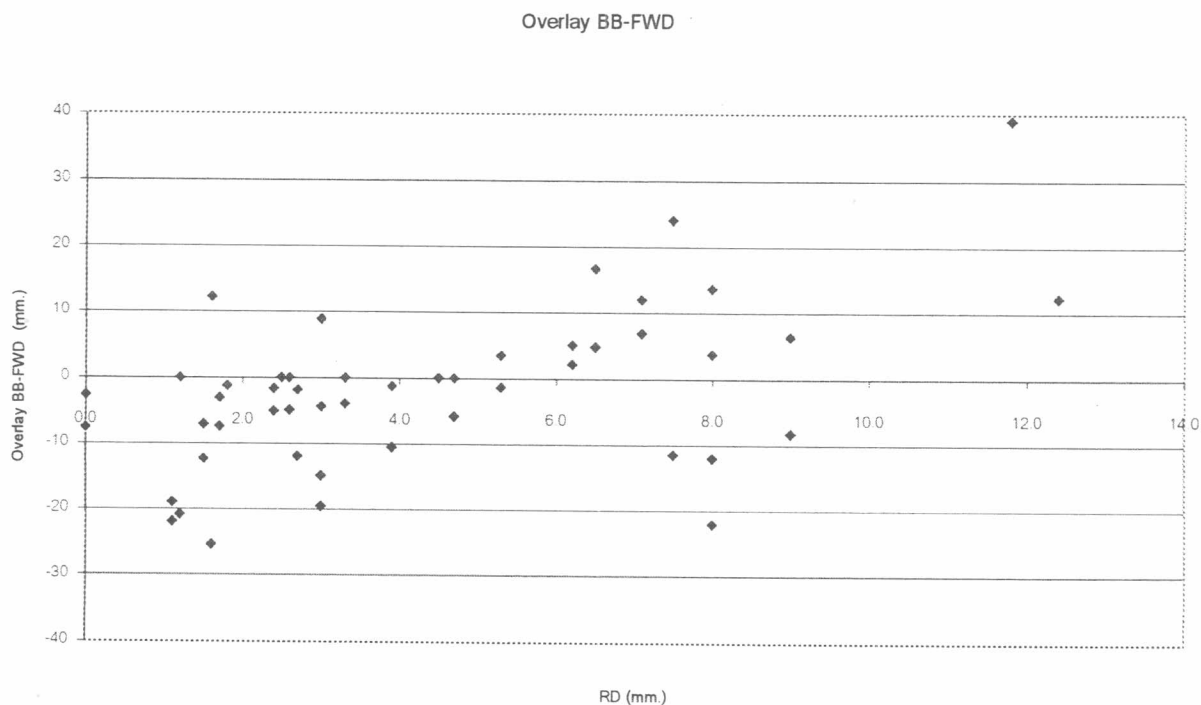


#### รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากขนาดร่องล้อ

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB-FWD กับค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อน้อยกว่า 9.0 มม. แต่ถ้าค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ FWD มากกว่า BB ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อมีค่าน้อยกว่า 8.0 มม.

#### - ค่าความหนาเสริมผิวทาง

นำค่าความหนาเสริมผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าความหนาเสริมผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าความหนาเสริมผิวทางในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากขนาดร่องล้อแสดงดังรูปที่ 4.11



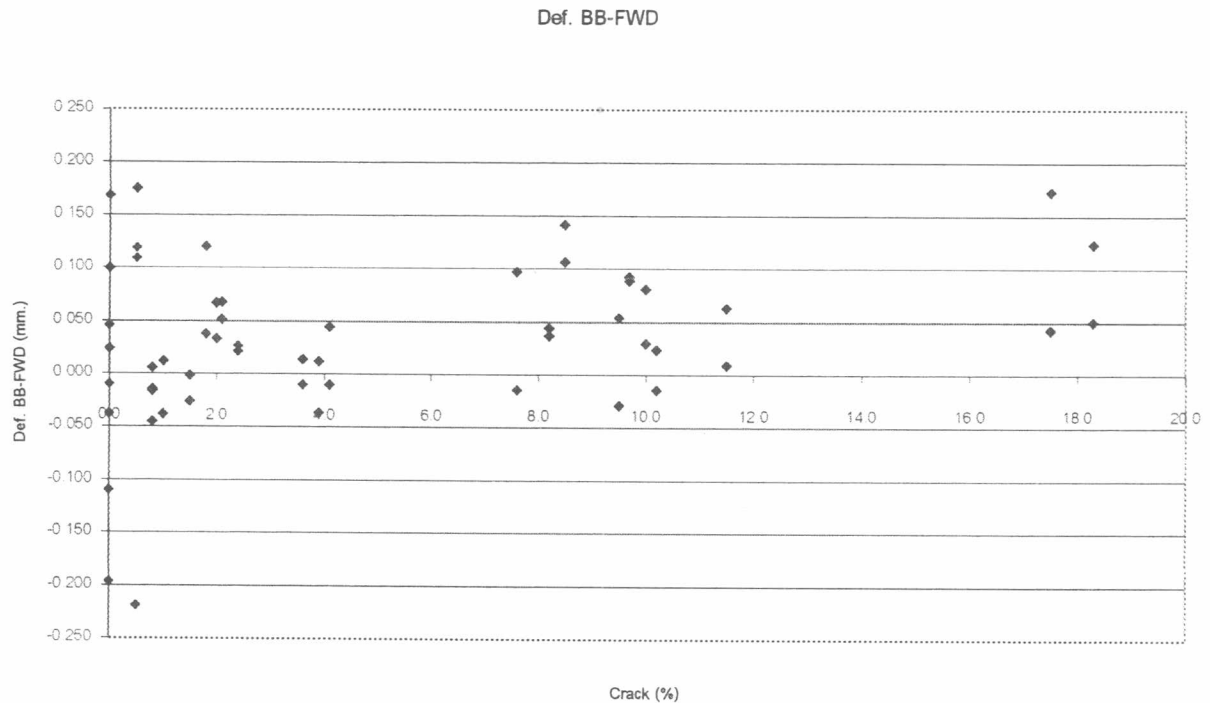
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากขนาดร่องล้อ

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB-FWD กับค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อน้อยกว่า 9.0 มม. แต่ถ้าค่าการแอ่นตัวของ FWD มากกว่า BB ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อนี้น้อยกว่า 9.0 มม. ด้วยเช่นกัน

#### 4.9.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาจากการแตกร้าว

##### - ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

นำค่าการแอ่นตัวของผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าการแอ่นตัวในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากการแตกร้าวแสดงดังรูปที่ 4.12

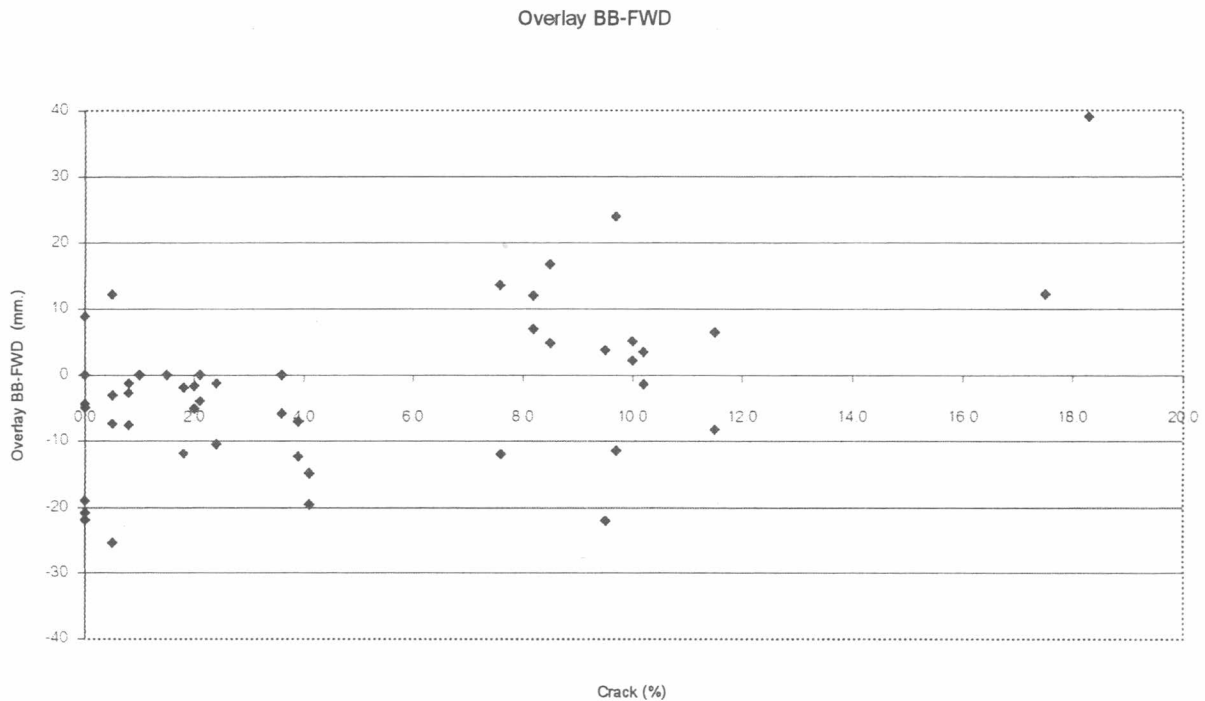


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากการแตกร้าว

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB-FWD กับค่าร้อยละการแตกร้าวในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าร้อยละการแตกร้าวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.0 ถึง 11.5 แต่ถ้าค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ FWD มากกว่า BB ค่าร้อยละการแตกร้าวมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10.2

#### - ค่าความหนาเสริมผิวทาง

นำค่าความหนาเสริมผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าความหนาเสริมผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าความหนาเสริมผิวทางในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากการแตกร้าวแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากการแตกร้าว

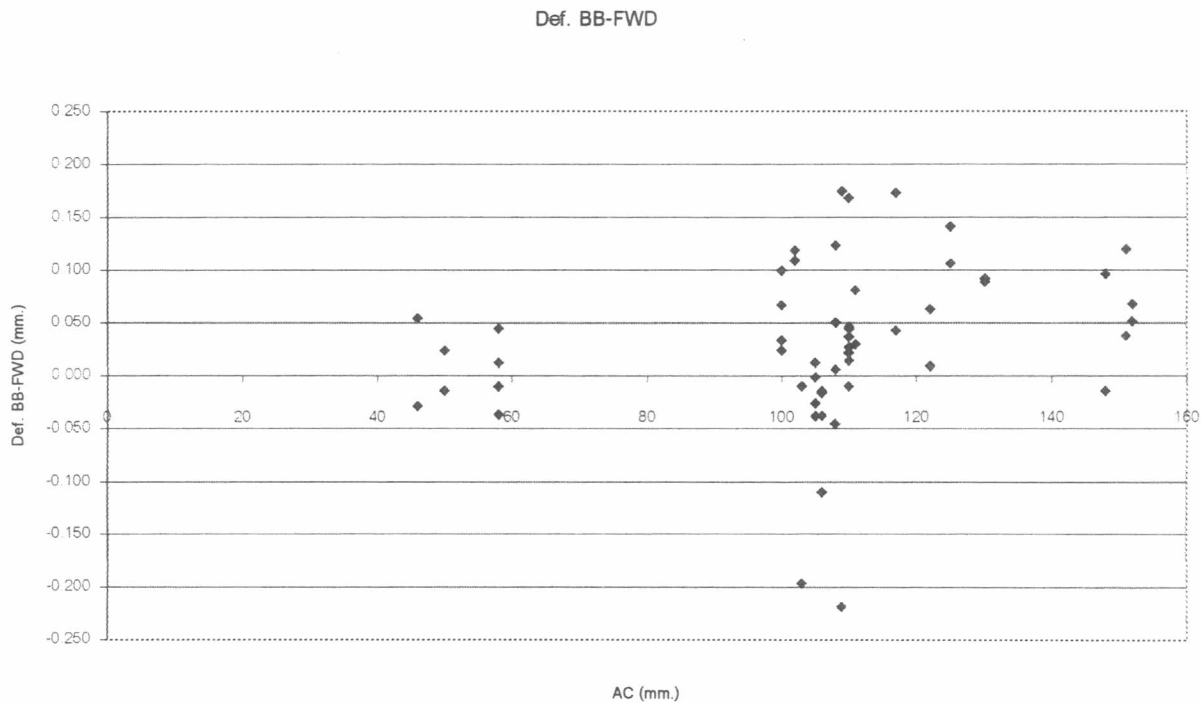
จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB-FWD กับค่าร้อยละการแตกร้าวในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าร้อยละการแตกร้าวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.0 ถึง 11.5 แต่ถ้าค่าความหนาเสริมผิวทางของ FWD มากกว่า BB ค่าร้อยละการแตกร้าวมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 11.5 ด้วยเช่นกัน

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนใหญ่ของผลต่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB และ FWD จากทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 9.0 มม. และค่าร้อยละการแตกร้าวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.0 ถึง 11.5

#### 4.9.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาจากความหนาผิวทาง AC

- ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

นำค่าการแอ่นตัวของผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าการแอ่นตัวในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากความหนาผิวทาง AC แสดงดังรูปที่ 4.14



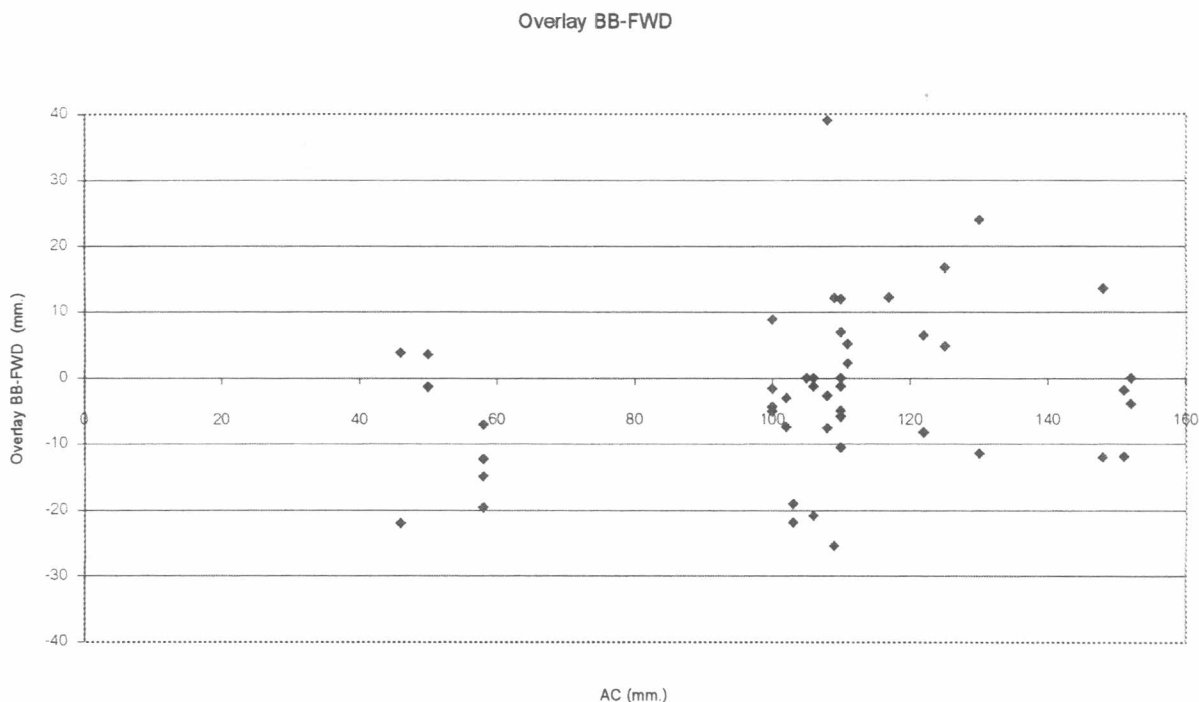
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากความหนา AC

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB - FWD กับค่าความหนาผิวทาง AC ในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าความหนาผิวทาง AC อยู่ระหว่าง 100 ถึง 130 มม. แต่ถ้าค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ FWD มากกว่า BB ค่าความหนาผิวทาง AC มีค่าน้อยกว่า 110 มม.

- ค่าความหนาเสริมผิวทาง

นำค่าความหนาเสริมผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าความหนาเสริมผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าความหนาเสริมผิวทางในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผล

ต่างค่าความหนาเสริมผิวทางของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากความหนาผิวทาง AC แสดง  
 ดังรูปที่ 4.15



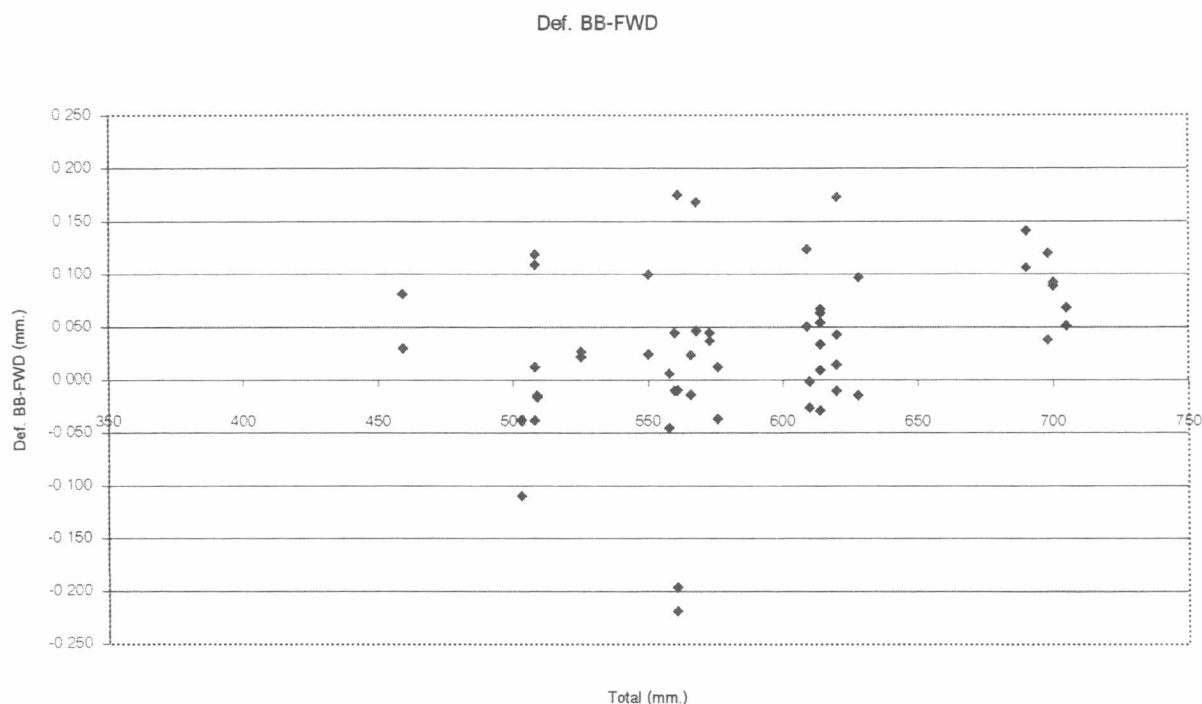
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากความหนา AC

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB - FWD กับค่าความหนาผิวทาง AC ในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าความหนาผิวทาง AC อยู่ระหว่าง 100 ถึง 130 มม.

#### 4.9.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาจากความหนาผิวทางทั้งหมด

##### - ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

นำค่าการแอ่นตัวของผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าการแอ่นตัวในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากความหนาผิวทางทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.16



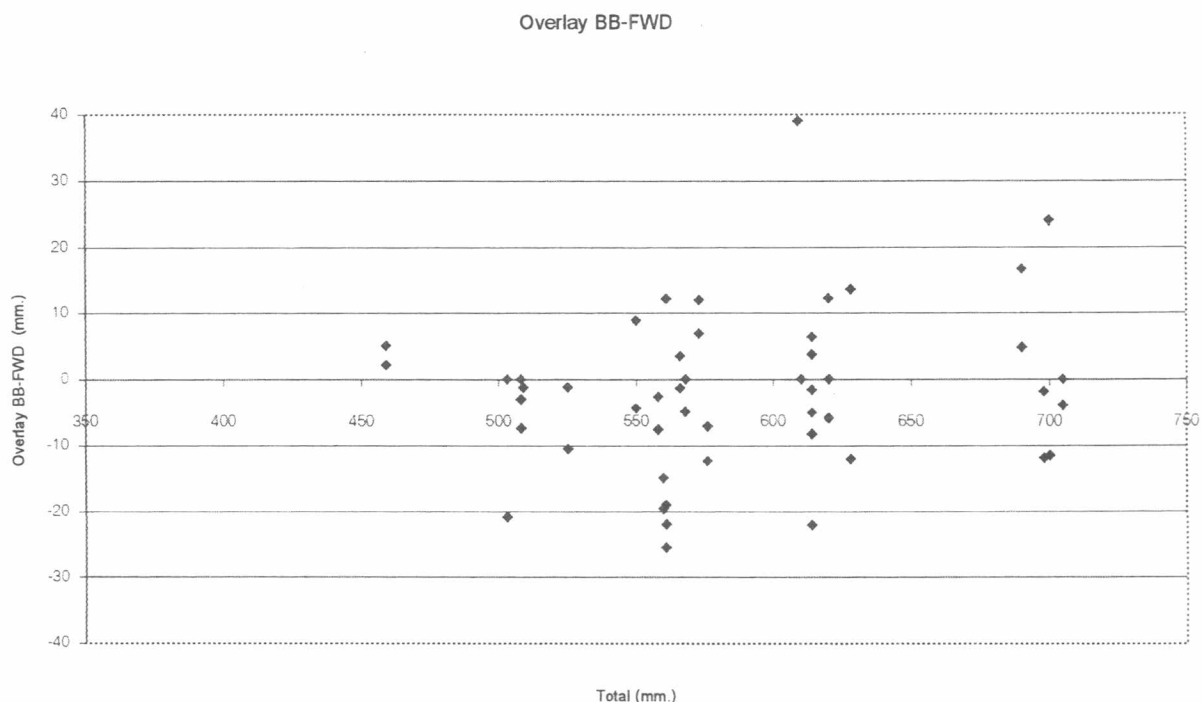
**รูปที่ 4.16** ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากความหนาทั้งหมด

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB - FWD กับค่าความหนาผิวทางทั้งหมดในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าความหนาผิวทางทั้งหมดอยู่ระหว่าง 500 ถึง 625 มม. แต่ถ้าค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ FWD มากกว่า BB ค่าความหนาผิวทางทั้งหมดมีค่าระหว่าง 500 ถึง 625 มม. ด้วยเช่นกัน

- ค่าความหนาเสริมผิวทาง

นำค่าความหนาเสริมผิวทางของแต่ละช่วงทดลองจากการทดสอบในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบของค่าความหนาเสริมผิวทาง จะได้แสดงถึงผลต่างของค่าความหนาเสริมผิวทางในข้างต้น โดยในการเปรียบเทียบนี้ สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางของวิธี BB และ FWD โดยพิจารณาจากความหนาผิวทางทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.17





รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากความหนาทั้งหมด

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB - FWD กับค่าความหนาผิวทางทั้งหมดในทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่มีค่าความหนาผิวทางทั้งหมดอยู่ระหว่าง 500 ถึง 625 มม.

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนใหญ่ของค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB และ FWD จากทุกช่วงทดลอง พบว่าค่าความหนาผิวทาง AC อยู่ระหว่าง 100 ถึง 130 มม. และค่าความหนาผิวทางทั้งหมดอยู่ระหว่าง 500 ถึง 625 มม.

จากผลการพิจารณาพบว่ากลุ่มที่มีค่าสภาพความเสียหายของผิวทางสูง ค่าการแอ่นตัววิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยมากกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer เนื่องจากเครื่อง Benkelman Beam จะพิจารณาจากชั้นผิวทางเป็นหลัก ในทางกลับกันเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะพิจารณาทั้งโครงสร้างชั้นทาง และกลุ่มที่มีค่าสภาพความเสียหายของผิวทางต่ำ ค่าความหนาเสริมผิวทางวิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าความหนาเสริมผิวทางน้อยกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer เนื่องจากถ้าสภาพความเสียหายของผิวทางต่ำ เครื่อง Benkelman Beam จะพิจารณาจากชั้นผิวทางเป็นหลักจะให้ค่าความหนาเสริมผิวทางน้อย

กว่า ในทางกลับกันเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะพิจารณาทั้งโครงสร้างชั้นทางจึงให้ค่าความหนาเสริมผิวทางมากกว่า

และจากผลการพิจารณาค่าความหนาผิวทาง AC และความหนาทั้งหมด ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่ใช้ทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกัน ไม่ว่าผิวทางจะมีความหนามากหรือน้อย ดังนั้นแสดงว่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทาง แต่สภาพความเสียหายของผิวทางจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางมากกว่า

#### 4.10 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis)

Discriminant Analysis หรือการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม เป็นเทคนิคที่ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลซึ่งใช้หลักเกณฑ์ของ การวิเคราะห์ความถดถอยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยที่ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม โดยทำการแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD และอีกกลุ่มหนึ่งคือกลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่า FWD ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงปริมาณต่าง ๆ ที่ได้ทำการเก็บรวบรวมมาจากการทดสอบภายในสนาม ดังนั้น วัตถุประสงค์คือการศึกษาว่าตัวแปรหรือปัจจัยใดบ้างที่เป็นปัจจัยสำคัญทำให้อยู่ต่างกลุ่มกัน แล้วนำตัวแปรเหล่านี้มาศึกษาหาความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปเชิงเส้น หลังจากนั้นจึงนำสมการเชิงเส้นมาประมาณว่าควรอยู่กลุ่มใด โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

##### 4.10.1 การวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

โดยพิจารณาหรือกำหนดตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะมีผลหรืออิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่ม ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัวคือ ขนาดร่องล้อ (RD) รอยละการแตกร้าว (Crack) และค่าความหนาของชั้นทางทั้งหมด (Total) โดยใช้ F-test ในการพิจารณา ซึ่งจะเป็นการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระในกลุ่มที่ 1 เท่ากับกลุ่มที่ 2 หรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐาน ได้ดังนี้คือ

$H_0$  : ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 เท่ากับค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 2

$H_1$  : ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 ไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 2

ตารางที่ 4.16 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการแอ่นตัว

Variable	Correlation	F	F <sub>0.050 (1,52)</sub>	H <sub>0</sub>
RD	0.877	6.109	4.032	Reject
Crack	0.748	4.454	4.032	Reject
Total	0.716	4.074	4.032	Reject

จากตารางพบว่าค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F ที่เปิดได้จากตาราง จะปฏิเสธสมมติฐาน H<sub>0</sub> คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของกลุ่มที่ 1 ต่างจากของกลุ่มที่ 2 ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มต่อไป และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าตัวแปรขนาดร่องล้อจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด และตัวแปรค่าความหนาชั้นทางทั้งหมดจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มน้อยที่สุด

ต่อไปเป็นการสร้างเกณฑ์หรือสร้างสมการจำแนกกลุ่ม โดยการสร้างสมการเชิงเส้นที่เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแบ่งกลุ่ม (D) กับตัวแปรอิสระหรือประมาณค่า  $\beta$  ที่ทำให้ร้อยละการจัดกลุ่มผิดน้อยที่สุด สำหรับฟังก์ชันการจำแนกกลุ่มจะอยู่ในรูปเชิงเส้น โดยจากการวิเคราะห์ได้ผลดังตารางดังนี้

ตารางที่ 4.17 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในการจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัว

Variable	Deflection	
	D_BB > D_FWD	D_BB < D_FWD
RD	-0.932	-1.211
Crack	0.302	0.354
Total	0.164	0.157
(Constant)	-47.994	-43.397

จากตารางพบว่ากลุ่มที่ 1 กลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวของ BB มากกว่า FWD และกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวของ BB น้อยกว่า FWD มีสมการในการแบ่งกลุ่ม ดังนี้

$$D_1 = -47.994 - 0.932 RD + 0.302 Crack + 0.164 Total$$

$$D_2 = -43.397 - 1.211 RD + 0.354 Crack + 0.157 Total$$

- เมื่อ  $D_1$  คือ ค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1  
 $D_2$  คือ ค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2  
 RD คือ ขนาดร่องล้อ (มม.)  
 Crack คือ ร้อยละการแตกร้าว  
 Total คือ ค่าความหนาของชั้นทางทั้งหมด (มม.)

ถ้าทราบตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัว สามารถที่จะนำมาแทนค่าลงในสมการจำแนกกลุ่ม ถ้าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1 มากกว่าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2 ช่วงทดลองดังกล่าวก็จะอยู่ในกลุ่มที่ 1 คือค่าการแอ่นตัวของ BB มากกว่า FWD ในทางกลับกัน ถ้าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1 น้อยกว่าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2 ช่วงทดลองดังกล่าวก็จะอยู่ในกลุ่มที่ 2 คือค่าการแอ่นตัวของ BB น้อยกว่า FWD โดยจากการวิเคราะห์ในช่วงทดลองที่ทำการทดสอบพบว่าเกณฑ์หรือฟังก์ชันจำแนกกลุ่มที่ได้มา นำมาพยากรณ์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพบว่าพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 80.5 ดังนั้นเราสามารถนำสมการทั้ง 2 สมการที่วิเคราะห์มาจำแนกกลุ่มได้

#### 4.10.2 การวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทาง

โดยพิจารณาหรือกำหนดตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะมีผลหรืออิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่ม ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทางคือ ขนาดร่องล้อ (RD) ร้อยละการแตกร้าว (Crack) และปริมาณการจราจร (AADT) โดยใช้ F-test ในการพิจารณา ซึ่งจะเป็นการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระในกลุ่มที่ 1 เท่ากับกลุ่มที่ 2 หรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐาน ได้ดังนี้คือ

$$H_0 : \text{ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 เท่ากับค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 2}$$

$$H_1 : \text{ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 ไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 2}$$

ตารางที่ 4.18 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาเสริมผิวทาง

Variable	Correlation	F	F <sub>0.050 (1,52)</sub>	H <sub>0</sub>
RD	0.977	10.150	4.064	Reject
Crack	0.976	31.454	4.064	Reject
AADT	0.555	31.347	4.064	Reject

จากตารางพบว่าค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F ที่เปิดได้จากตาราง จะปฏิเสธสมมติฐาน H<sub>0</sub> คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของกลุ่มที่ 1 ต่างจากของกลุ่มที่ 2 ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มต่อไป และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าตัวแปรขนาดรองก็จะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด และตัวแปรปริมาณการจราจรจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มน้อยที่สุด

ต่อไปเป็นการสร้างเกณฑ์หรือสร้างสมการจำแนกกลุ่ม โดยการสร้างสมการเชิงเส้นที่เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแบ่งกลุ่ม (D) กับตัวแปรอิสระหรือประมาณค่า  $\beta$  ที่ทำให้ร้อยละการจัดกลุ่มผิดน้อยที่สุด สำหรับฟังก์ชันการจำแนกกลุ่มจะอยู่ในรูปเชิงเส้น โดยจากการวิเคราะห์ได้ผลดังตารางดังนี้

ตารางที่ 4.19 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในการจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทาง

Variable	Overlay	
	O_BB > O_FWD	O_BB < O_FWD
RD	1.125	0.792
Crack	-0.162	-0.374
AADT	1.105E-04	1.073E-04
(Constant)	-5.183	-1.936

จากตารางพบว่ากลุ่มที่ 1 กลุ่มที่มีค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD และกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มีค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่า FWD มีสมการในการแบ่งกลุ่มดังนี้

$$D_1 = -5.183 + 1.125 RD - 0.162 Crack + 1.105E-04 AADT$$

$$D_2 = -1.936 + 0.792 RD - 0.374 Crack + 1.073E-04 AADT$$

- เมื่อ  $D_1$  คือ ค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1  
 $D_2$  คือ ค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2  
 RD คือ ขนาดร่องล้อ (มม.)  
 Crack คือ ร้อยละการแตกร้าว  
 AADT คือ ปริมาณการจราจร (คันต่อวัน)

ถ้าทราบตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัว สามารถที่จะนำมาแทนค่าลงในสมการจำแนกกลุ่ม ถ้าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1 มากกว่าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2 ช่วงทดลองดังกล่าวก็จะอยู่ในกลุ่มที่ 1 คือค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD ในทางกลับกันถ้าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 1 น้อยกว่าค่าประมาณของฟังก์ชันในการแบ่งกลุ่มที่ 2 ช่วงทดลองดังกล่าวก็จะอยู่ในกลุ่มที่ 2 คือค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่า FWD โดยจากการวิเคราะห์ในช่วงทดลองที่ทำการทดสอบพบว่าเกณฑ์หรือฟังก์ชันจำแนกกลุ่มที่ได้มา นำมาพยากรณ์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพบว่าพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 84.8 ดังนั้นเราสามารถนำสมการทั้ง 2 สมการที่วิเคราะห์มาจำแนกกลุ่มได้

ดังนั้นเมื่อทราบสภาพความเสียหายและข้อมูลคุณสมบัติต่าง ๆ ของผิวทางแล้ว สามารถนำมาวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้ดังวิธีการข้างต้น เพื่อทราบได้ว่าค่าการแอ่นตัวหรือค่าความหนาเสริมผิวทางจากเครื่องมือและวิธีการออกแบบชนิดใดให้ค่าที่มากกว่า เพื่อเป็นการตรวจสอบข้อมูลค่าการแอ่นตัวและผลการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางที่มี หรือเพื่อเป็นการพิจารณาตัดสินใจในการเลือกใช้เครื่องมือในการทดสอบต่อไปได้