บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นนำมาออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ วิธี Benkelman Beam และวิธี Falling Weight Deflectometer โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบร่วมด้วย จากนั้นจึงนำค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการทดสอบและออกแบบ มาเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัว ค่าความหนาเสริมผิวทาง และคุณสมบัติต่าง ๆ โดยผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า

- จากการศึกษาวิธีการสำรวจในสนามและวิธีการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer นั้น โดยจะทดสอบด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer ก่อน แล้วจึงค่อยตามด้วยเครื่อง Benkelman Beam ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิในการทดสอบจะไม่ต่างกันหรือต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทดสอบติดต่อกันทันทีในจุดทดสอบเดียวกัน โดยได้แสดงการเปรียบเทียบในการทำงานได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer

Benkelman Beam	Falling Weight Deflectometer
1. สามารถทำงานได้เร็วและความแม่นยำขึ้นกับผู้ทดสอบในสนาม	1. สามารถทำงานได้เร็วและมีความแม่นยำสูงหากไม่เกิดการรบกวนในขณะทดสอบ
2. เครื่องมือไม่มีความซับซ้อนมากนัก	2. เครื่องมือมีความซับซ้อนใช้เทคโนโลยีชั้นสูง
3. เครื่องมือมีราคาถูก และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ	3. เครื่องมือมีราคาแพง และมีค่าบำรุงรักษาสูง
4. ผู้ทดสอบมีความปลอดภัยน้อยกว่า	4. ผู้ทดสอบมีความปลอดภัยมากกว่า

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากมีงบประมาณน้อยการใช้เครื่องมือง่าย ๆ อย่างเครื่องมือ Benkelman Beam จะมีความเหมาะสมมากและหากมีงบประมาณมากพอการใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer จะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการทำงานและข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางสามารถพัฒนาการออกแบบให้มีความมั่นคงแข็งแรงและรับน้ำหนักรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากขึ้นได้และทำให้อายุการใช้งานของทางเป็นไปตามที่ได้มีการออกแบบไว้

- ในการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางดังกล่าว จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า หากทดสอบวัดค่าการแอ่นตัวโดยวิธี Falling Weight Deflectometer จะได้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าผิดพลาดมาตรฐาน น้อยกว่าเครื่อง Benkelman Beam หรือสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนวิธีการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นมาเป็นวิธี Falling Weight Deflectometer จะส่งผลถึงการช่วยให้ค่าการแอ่นตัวของผิวทางมีการกระจายตัวน้อยลง

และในการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางดังกล่าว จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าหากออกแบบด้วยวิธี Falling Weight Deflectometer จะได้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าผิดพลาดมาตรฐาน น้อยกว่าเครื่อง Benkelman Beam หรือสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนวิธีการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นมาเป็นวิธี Falling Weight Deflectometer จะส่งผลถึงการช่วยให้ค่าความหนาเสริมผิวทางมีการกระจายตัวน้อยลง และช่วยให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ออกแบบน้อยลงโดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Elmod เพราะฉะนั้นทำให้ข้อมูลค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer เป็นข้อมูลที่มีคุณภาพที่ดีขึ้นและรวดเร็วมากขึ้น

- จากการพิจารณาคุณสมบัติและประเมินสภาพผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบภายในสนามที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งในการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าว พบว่า ค่าขนาดร่องล้อ ค่าร้อยละการแตกร้าว ค่าปริมาณการจราจร และค่าความหนาชั้นผิวทางจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดร่องล้อกับค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของผิวทาง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

เมื่อ RD = ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ (มม.)

Crack = ค่าร้อยละการแตกร้าว

AADT = ค่าปริมาณการจราจร (คัน/วัน)

AC = ค่าความหนาชั้นผิวทาง (มม.)

จากความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่าค่าร้อยละการแตกร้าวมีค่ามากกว่าค่าขนาดร่องล้อ แต่แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจากคุณสมบัติของผิวทางจะส่งผลถึงการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของผิวทางได้ โดยเปลี่ยนวิธีการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นมาเป็นวิธี Falling Weight Deflectometer จะช่วยให้การวัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางดีขึ้น เนื่องจากการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางด้วยเครื่อง Benkelman Beam ถ้าหากมีขนาดร่องล้อหรือการแตกร้าวที่ผิวทางจะมีผลโดยตรงมากกว่าการวัดด้วยเครื่อง Falling Wight Deflectometer

- จากการเปรียบเทียบผลการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer โดยในการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางดังกล่าว นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ Benkelman Beam และ Falling Wight Deflectometer สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$D_BB = 0.963\ D_FWD + 9.406E\text{-}03\ RD$$

เมื่อ D_BB = ค่าการแอ่นตัวของ BB ที่ได้จากความสัมพันธ์ (มม.)

D_FWD = ค่าการแอ่นตัวของ FWD ที่ได้จากการทดสอบในสนาม (มม.)

RD = ค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ (มม.)

ซึ่งจากการพิจารณาหาสมการถดถอยที่เหมาะสมจากค่าการแอ่นตัวของผิวทางและคุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ศึกษา พบว่าค่าการแอ่นตัวของ Benkelman Beam นั้น จะมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ ค่าการแอ่นตัวของ Falling Weight Deflectometer และค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อ เนื่องจากการวัดค่าการแอ่นตัวของ Benkelman Beam นั้น จะมีผลโดยตรงกับค่าคุณสมบัติของชั้นผิวทางมากกว่าการวัดค่าการแอ่นตัวของ Falling Weight Deflectometer ดังนั้นทำให้สมการถดถอยที่ได้จึงมีค่าเฉลี่ยขนาดร่องล้อร่วมด้วย และจากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) พบว่าให้ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam มากกว่าค่าที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติในเบื้องต้น ซึ่งพบว่ามีถึงร้อยละ 70 ของช่วงทดลองที่ใช้ใน

การทดสอบที่มีค่าการแอ่นตัวของเครื่อง Benkelman Beam มากกว่าเครื่อง Falling Weight Deflectometer

- ในการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางดังกล่าว จากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired Difference Tests) พบว่าค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง Benkelman Beam ไม่แตกต่างกันกับค่าที่ได้จากเครื่อง Falling Weight Deflectometer แต่จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของผลต่าง $\bar{d}$ พบว่ามีค่าเป็นบวก แสดงว่าวิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าความหนาเสริมผิวทางมากกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer อยู่เพียงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติในเบื้องต้นอีกด้วย

- จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยพิจารณาคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบพบว่ากลุ่มที่มีค่าสภาพความเสียหายของผิวทางสูง ค่าการแอ่นตัววิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยมากกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer เนื่องจากเครื่อง Benkelman Beam จะพิจารณาจากชั้นผิวทางเป็นหลัก ในทางกลับกันเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะพิจารณาทั้งโครงสร้างชั้นทาง และกลุ่มที่มีค่าสภาพความเสียหายของผิวทางต่ำค่าความหนาเสริมผิวทางวิธีของ Benkelman Beam ให้ค่าความหนาเสริมผิวทางน้อยกว่าวิธีของ Falling Weight Deflectometer เนื่องจากถ้าสภาพความเสียหายของผิวทางต่ำ เครื่อง Benkelman Beam จะพิจารณาจากชั้นผิวทางเป็นหลักจะให้ค่าความหนาเสริมผิวทางน้อยกว่า ในทางกลับกันเครื่อง Falling Weight Deflectometer จะพิจารณาทั้งโครงสร้างชั้นทางจึงให้ค่าความหนาเสริมผิวทางมากกว่า และจากผลการพิจารณาค่าความหนาผิวทาง AC และความหนาทั้งหมด ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางที่ใช้ทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกัน ไม่ว่าผิวทางจะมีความหนามากหรือน้อย ดังนั้นแสดงว่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทาง แต่สภาพความเสียหายของผิวทางจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางมากกว่า

- จากการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis) โดยทำการแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB มากกว่า FWD และอีกกลุ่มหนึ่งคือกลุ่มที่มีค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางของ BB น้อยกว่า FWD การวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัวคือ ขนาดร่องล้อ (RD) ร้อยละการแตกร้าว (Crack) และค่าความหนาของชั้นทางทั้งหมด (Total) เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าตัวแปรขนาดร่อง

ล้อจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด และตัวแปรค่าความหนาชั้นทางทั้งหมดจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มน้อยที่สุด โดยมีสมการในการแบ่งกลุ่ม 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 โดยจากการวิเคราะห์ในช่วงทดลองที่ทำการทดสอบพบว่าพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 80.5 ดังนั้นเราสามารถนำสมการทั้ง 2 สมการที่วิเคราะห์มาจำแนกกลุ่มได้

- จากการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทางพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทางคือ ขนาดร่องล้อ (RD) ร้อยละการแตกร้าว (Crack) และปริมาณการจราจร (AADT) เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าตัวแปรขนาดร่องล้อจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด และตัวแปรปริมาณการจราจรจะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มน้อยที่สุด โดยมีสมการในการแบ่งกลุ่ม ดังนี้

$$D_1 = -5.183 + 1.125\,RD - 0.162\,Crack + 1.105E\text{-}04\,AADT$$

$$D_2 = -1.936 + 0.792\,RD - 0.374\,Crack + 1.073E\text{-}04\,AADT$$

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 สามารถที่จะนำมาแทนค่าลงในสมการจำแนกกลุ่มเช่นเดียวกับการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัว โดยจากการวิเคราะห์ในช่วงทดลองที่ทำการทดสอบพบว่าพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 84.8 ดังนั้นเราสามารถนำสมการทั้ง 2 สมการที่วิเคราะห์มาจำแนกกลุ่มได้ เพื่อเป็นการตรวจสอบข้อมูลค่าการแอ่นตัวและผลการออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทางที่มี หรือเพื่อเป็นการพิจารณาตัดสินใจในการเลือกใช้เครื่องมือในการทดสอบต่อไปได้

เพราะฉะนั้นสำหรับผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ใช้ในการศึกษา หากเปลี่ยนวิธีการออกแบบเสริมผิวทางจากวิธี Benkelman Beam มาเป็นวิธี Falling Weight Deflectometer จะช่วยให้ได้ข้อมูลค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางมีการกระจายตัว และค่าผิดพลาดมาตรฐานน้อยลง ทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่าข้อมูลที่ได้จากวิธี Benkelman Beam ก็เป็นการชี้ให้เห็นได้ว่าวิธีการออกแบบเสริมผิวทางควรมีการปรับเปลี่ยนเพื่อพัฒนาคุณภาพของข้อมูลให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อให้ถนนมีคุณภาพที่ดีขึ้น ลดการเสียหาย ช่วยประหยัดงบประมาณในการดูแลซ่อมแซมถนนของประเทศลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาต่อไปในอนาคตสำหรับการเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer นี้ ตามความคิดเห็นของผู้วิจัยควรได้มีการพิจารณาและศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การเปรียบเทียบกับการนำไปใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการควบคุมคุณภาพและสมรรถนะของถนนให้ตรงกับที่ใช้งานจริง
- การเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นของผิวทางทั้งก่อนและหลังจากเสริมผิวทางไปแล้ว โดยติดตามดูผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
- หากมีความเป็นไปได้ ควรมีการทดสอบเปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากวิธีการออกแบบที่แตกต่างกันด้วยวิธีการทดสอบอื่นๆ