



รายงานฉบับที่ วพ. 153 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง  
REPORT NO. RD 153 ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER

## แผนภูมิแก้ไขค่าแอมป์เนื่องจากอุณหภูมิของถนน

โดย

ประสิทธิ์ ภูประทุม  
แสงชัย เทพสิทธิหรรณ

**กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม**

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS,

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

# แผนภูมิแก้ไขค่าแอ่นตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน

โดย

ประสิทธิ์ ภูประทุม  
แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์

รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.153  
ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง  
กรมทางหลวง

รายงานฉบับนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

## คำนำ

การสำรวจวัดค่าแอนต์ตัวของถนน เพื่อนำมาประเมินสถานภาพและอายุบริการของถนน เป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับแวนตรงงานทาง โดยเฉพาะกรมทางหลวงซึ่งมีหน้าที่ให้บริการด้านคมนาคมทางบกของประเทศ เพราะค่าแอนต์ตัวของถนนจะทำให้วิศวกรที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องทราบถึงวิธีการบำรุงรักษาถนนที่ถูกต้องและประหยัด และสามารถตัดสินใจเสนอให้ทำการบูรณะหรือก่อสร้างถนนใหม่เมื่อพิจารณาแล้วเห็นว่าจะไม่เป็นการประหยัดหากยังคงทำการบำรุงรักษาตามปกติสืบไป อันจะส่งผลให้การวางแผนจัดทำงบประมาณประจำปีของกรมทางหลวงเป็นไปอย่างรวดเร็วและถูกต้อง เป็นผลดีต่อการพัฒนาและเศรษฐกิจของประเทศโดยรวม แต่เนื่องจากค่าแอนต์ตัวของถนนส่วนใหญ่ที่วัดได้ในสนาม มักจะมีความคลาดเคลื่อน อันสืบเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิของถนนที่เปลี่ยนแปลงตลอดวัน จึงส่งผลให้การประเมินสถานภาพและอายุบริการของถนนไม่แม่นยำตามที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงหวังว่าแผนภูมิแก้ไขค่าแอนต์ตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน ที่ได้จากการทดลองและวิจัยของรายงานฉบับนี้ คงจะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้แก้ไขค่าแอนต์ตัวของถนนที่วัดได้ในสนามให้ถูกต้องสืบไป

กม.จ

( นายสนั่น ศรีรุ่งโรจน์ )

อธิบดีกรมทางหลวง

## สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. การศึกษาและวิจัยในอดีต	3
3. วัตถุประสงค์	8
4. ขอบเขตของการวิจัย	9
5. เครื่องมือวัดค่าแอนต์ตัวของถนน ของกรมทางหลวง	9
5.1 เครื่องมือ Benkelman Beam	10
5.2 อุปกรณ์ประกอบสำหรับใช้ร่วมกับเครื่องมือ Benkelman Beam ในการวัดค่าแอนต์ตัวของถนน	10
6. การดำเนินการทดลอง	11
6.1 การเตรียมการทดลอง	11
6.2 หลักในการเลือก Test Section และกำหนดตำแหน่งของจุดทดลอง	12
6.3 วิธีการทดลอง	13
6.4 ข้อควรระวังในการทดลองวัดค่าแอนต์ตัวของถนนด้วย เครื่องมือ Benkelman Beam	14
7. การวิเคราะห์ข้อมูล	16
8. สรุป	20
9. เสนอแนะ	21
10. เอกสารอ้างอิง	23
สารบัญรูป	24
รูปที่ 1 ถึง 11	25
บทคัดย่อ	43
Abstract	44

## แผนภูมิแก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน

\* \* \* \* \*

### 1. บทนำ

ถนนทุกชนิดโดยทั่วไป ทั้งชนิดแบบพื้นทางอ่อน ( Flexible Pavement ) หรือชนิดพื้นทางแข็ง ( Rigid Pavement ) หรือชนิดพื้นทางกึ่งอ่อน - กึ่งแข็ง ( Semi - Rigid Pavement ) นั้น ส่วนใหญ่จะมีอายุบริการใกล้เคียงกับที่ออกแบบและก่อสร้างเอาไว้โดยวิศวกรที่มีความรู้และความรับผิดชอบ โดยอายุบริการของถนนดังกล่าวจะเป็นปฏิภาคผกผันกับกาลเวลาที่ผ่านไป กล่าวคือ เมื่อถนนเริ่มทำหน้าที่บริการรองรับการจราจรแล้ว อายุบริการที่เหลือจะหดสั้นลง อันมีสาเหตุเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของวัสดุโครงสร้างของตัวถนนเอง ส่วนจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุโครงสร้างของถนน ร่วมกับปริมาณ น้ำหนัก และลักษณะกระทำของการจราจรที่มีบนถนนเหล่านั้น รวมทั้งปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ด้วย

มีปัจจัยหนึ่งซึ่งวิศวกรผู้ทำหน้าที่ออกแบบ บำรุงรักษา หรือผู้ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับถนนเหล่านั้นสมควรจะทราบมากที่สุด ก็คือ คุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้างถนน ที่มีอิทธิพลเกี่ยวข้องกับสถานะภาพ หรือความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนเหล่านั้น กล่าวคือควรจะทราบว่า ขณะที่กำลังพิจารณาหรือประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนอยู่นั้น ถนนเหล่านั้นมีสถานะภาพของโครงสร้างเป็นอย่างไร เพราะสถานะภาพหรือความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านมาและอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยจะเป็นไปตามทฤษฎีว่าด้วยการแบกรับ การกระจายความเค้น ( Stress Distribution ) และความเครียด ( Strain ) ที่เกิดขึ้น ร่วมกับทฤษฎีว่าด้วยการเสื่อมสภาพ ( Fatigue ) ของวัสดุ

ดังนั้นจึงมีการศึกษา และจัดตั้ง ทฤษฎี หรือ กฎเกณฑ์ พร้อมกับแสวงหาเครื่องมือชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการสำรวจ ตรวจสอบ และประเมินสถานะภาพ หรือความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนเหล่านั้น เช่น การตรวจวัดค่า Bearing Capacity ของวัสดุโครงสร้างแต่ละชั้นด้วย Bearing Plate, Shear Auger, Dynamic Cone Penetrometer, CBR, ฯลฯ หรือการตรวจวัดค่า Elastic Modulus ของวัสดุโครงสร้างชั้นต่างๆ ด้วยการคำนวณจาก Surface Deflection ที่เกิดขึ้นจาก Static หรือ Dynamic Load ของเครื่องมือต่างๆ จากนั้นก็นำค่าเหล่านั้นมาคำนวณหาความ

แข็งแรงของโครงสร้างของถนนตามทฤษฎีต่างๆ ที่จัดตั้งขึ้นมา ซึ่งพอจะแบ่งกรรมวิธีและทฤษฎีเหล่านั้นออกได้เป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ.

#### 1.1 จากความหนาเทียบเท่า ( Equivalent Thickness Parameter )

วิธีนี้เป็นการวัดและรวมความหนาของชั้นโครงสร้างทางแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน เป็นความแข็งแรงรวมของโครงสร้างถนน โดยแต่ละชั้นของโครงสร้างจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของความแข็งแรง ( Layer Strength Coefficient ) ตามคุณภาพของวัสดุที่นำมาก่อสร้าง และตำแหน่งของชั้นวัสดุนั้นๆ วิธีนี้เป็นวิธีของ AASHO ( American Associate of State Highway Officials ) ใช้กำหนดความหนาของชั้นโครงสร้างทางที่ออกแบบบนความแข็งแรงของชั้นดินเดิม ( Subgrade ) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า Structural Number ( SN ) ( Ref. 1 ) และ TRRL ( Transport and Road Research Laboratory ) ( Ref. 2 ) ก็ได้นำมาประยุกต์รวมกับค่าความแข็งแรงของดินเดิม เพื่อกำหนดเป็นความแข็งแรงรวม เขียนเป็นสูตรในการคำนวณอย่างง่าย ๆ คือ.

$$SNC = 0.04 \sum a_i h_i + SN_{sg}$$

โดยที่

SNC = Modified Structural Number

$a_i$  = Material Layer Strength Coefficient of each Layer

$h_i$  = Layer Thickness mm. of each Layer

( Where  $h_i \leq 700$  mm. )

$SN_{sg}$  = Subgrade Contribution

$$= 3.51 \log_{10} CBR - 0.85 ( \log_{10} CBR )^2 - 1.43$$

CBR = in situ California Bearing Ratio of Subgrade in %

#### 1.2 จากค่าอ่อนตัวของผิวทาง ( Surface Deflection )

วิธีนี้เป็นการวัดการเปลี่ยนรูปของถนนแบบ Transient Deformation ภายใต้น้ำหนักหรือแรง คงที่จำนวนหนึ่งที่มากระทำ เป็นการวัดค่า Stiffness และผลรวมของ Vertical Strain ของโครงสร้างถนน เช่น การวัดค่าอ่อนตัวสูงสุดของถนนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักล้อที่หนัก 80 KN. ด้วยเครื่องมือ Bankelmann Beam หรือการใช้ Dynaflect Instrument วัดค่า Deflection Basin ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่กระทำบนโครงสร้างถนนเป็นต้น จากนั้นจึงนำค่าอ่อนตัวสูงสุด หรือค่า Deflection Basin เหล่านี้มาคำนวณหาความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนอีกครั้ง

### 1.3 สังเกตจากพฤติกรรมของถนน ( Performance Observing )

วิธีนี้เป็นการวัดโดยสรุปจากผลของการสังเกตพฤติกรรมของถนนที่เกิดขึ้นที่เป็นอยู่ หรือ ด้วยการใช้เครื่องมือชนิดต่างๆ มาวัดและตรวจสอบดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของถนนที่เกิดขึ้นทั้งที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และทั้งที่มองไม่เห็นภายหลังจากเปิดบริการจราจรแล้ว เช่นการวัดค่า Present Serviceability Index Rut Dupth Roughness Index Crackings ฯลฯ จากนั้นก็นำค่าต่างๆ เหล่านั้น มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณการจราจรที่กระทำบนถนนเหล่านั้น ก็จะทราบถึงสภาพของโครงสร้างของถนนในขณะนั้นๆ ได้รวมทั้งสามารถทราบถึงสาเหตุของการเกิดพฤติกรรมเหล่านั้นได้ด้วย

สำหรับรายงานการวิจัยฉบับนี้ ซึ่งเป็นการหาแผนภูมิสำหรับแก้ไขค่าแอมตัวของถนนเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Correction Chart) ของถนน จะกล่าวถึงเฉพาะการตรวจวัดสภาพภาพหรือความแข็งแรงของโครงสร้างของถนนโดยการวัดค่าแอมตัวของผิวทางด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแอมตัวที่วัดได้ ซึ่งก็เป็นวิธีหนึ่งตามข้อ 1.2 โดยจะเน้นหนักในเรื่องที่เกี่ยวกับอุณหภูมิของถนนซึ่งจะมีผลทำให้ ค่าแอมตัวของถนนที่วัดได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงตามทฤษฎี รวมทั้งวิธีแก้ไขความคลาดเคลื่อนเหล่านั้น ตลอดถึงข้อควรระมัดระวังในการวัดค่าแอมตัวของถนน เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดด้วย

## 2. การศึกษาและวิจัยในอดีต

เนื่องจากวัสดุที่มีสารบิทูเมน ( Bitumen ) หรือ แอสฟัลท์ ( Asphalt ) เป็นส่วนประกอบเช่น แอสฟัลท์ซีเมนต์ ( Asphalt Cement ) ในแอสฟัลท์ติกคอนกรีต ( Asphaltic Concrete ) ซึ่งนำมาก่อสร้างเป็นโครงสร้างของถนนนั้น ค่า Bearing Capacity ของแอสฟัลท์ติกคอนกรีตนี้จะเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของแอสฟัลท์ซีเมนต์ และ Mineral Matter เช่นหินย่อย ( Aggregate ) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยแอสฟัลท์ซีเมนต์จะทำหน้าที่เป็นตัวยึด ( Binder ) ยึด particles ต่างๆ ของ Aggregate เข้าด้วยกัน จึงทำให้ค่า Bearing Capacity ของวัสดุรวมมีค่าสูงขึ้น และเมื่อวัสดุรวมที่มีสารบิทูเมนเป็นส่วนผสมนี้ถูกกระทำโดยแรงหรือน้ำหนัก วัสดุแอสฟัลท์ซีเมนต์ ก็จะเคลื่อนไหว ( ไหล ) และดัดแปลงรูปร่างของตัวมันเองด้วยหลักทางกลศาสตร์ ( Mechanics ) ดังนั้น วัสดุแอสฟัลท์ซีเมนต์ จึงมีอิทธิพลสูงมากต่อค่า Bearing Capacity หรือค่า Stiffness ของวัสดุรวมเหล่านี้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 แม้ว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่มีอยู่โดยสัดส่วนแล้ว วัสดุแอสฟัลท์ซีเมนต์ จะมีปริมาณน้อยกว่า Aggregate มากก็ตาม

ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัววัสดุแอสฟัลท์ซีเมนต์เองก็มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เช่นค่า Viscosity, Penetration และค่า Stiffness ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงค่า Viscosity ของแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนรูปที่ 3 ก็เป็นการหาค่า Penetration Index ของแอสฟัลท์ซีเมนต์ โดยใช้ Nomograph ซึ่งเราจะพบว่า Penetration Index ของแอสฟัลท์ซีเมนต์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนรูปที่ 4 ก็เป็นการหาค่า Stiffness ของสารบิฐแมนโดย Nomograph ที่ Time Loading ต่างๆ ซึ่งจะพบว่าที่ Time Loading เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิสูงจะได้ค่า Stiffness ต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การศึกษาคุณสมบัติด้านฟิสิกส์ของ Asphalt Paving Mixture จึงมักกระทำโดยวัดค่าอุณหภูมิไปพร้อมๆ กับการวัดค่า Duration หรือ Deformation ที่มีหรือเกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักหรือแรง เพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของค่าอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการรับแรง ความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความสามารถในการรับแรงและความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างค่า Stiffness และค่าแอนตัวของถนนที่มีโครงสร้าง ( ทั้งหมดหรือบางส่วน ) เป็นวัสดุที่มีสารบิฐแมนเป็นส่วนประกอบ และในอดีตก็ได้มีวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยเกี่ยวกับเรื่องเหล่านี้เอาไว้มาก กล่าวคือ

ปีค.ศ. 1953 L.W. Niboer and C. Van De Poel ( Ref. 6 ) ได้ทำการศึกษาและวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแอนตัวของถนน ( Pavement Deflection ) และค่า Stiffness ของถนน พบว่า ค่าแอนตัวของถนนภายใต้แรงกระทำที่คงที่จำนวนหนึ่ง จะมีค่าผกผันกับค่า Stiffness ของถนน คือ

$$S = W / D$$

โดยที่

S = Stiffness รวมของโครงสร้างถนน, kip/ in.

W = น.น. หรือแรงที่กระทำบนถนน, kip

D = ค่าแอนตัวของถนนที่เกิดขึ้น, in.

และในปีค.ศ. 1972 Marek, C.R. and Demsey , B.J. ( Ref. 7 ) ก็ได้ทำการศึกษาและวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ของวัสดุผสมและค่า Stiffness ของสารบิฐแมนที่มีอยู่ในวัสดุผสม พบว่าค่า Stiffness ของวัสดุที่มีสารบิฐแมนเป็นส่วนประกอบ เช่น Asphaltic Concrete จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาที่รองรับน้ำหนัก โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$S_{mix} = [ 1 + ( 2.5/n ) \times ( C_v / 1.0 )^n ] \times S_{bit}$$

โดยที่

$S_{mix}$  = Stiffness of Asphaltic Concrete Mixture (  $km/cm^2$  )

$S_{bit}$  = Stiffness of the bituminous binder at the design temperature and time of loading, determined from the nomograph but transferred to  $kg/cm^2$ .

$C_v$  = Volume concentration of Aggregate in the Mixture

=  $\frac{\text{Volume of Aggregate}}{\text{Volume of Aggregate and Bituminous Binder}}$

$N$  =  $0.83 \log 400,000$

$S_{bit}$

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ของวัสดุแอสฟัลท์นั้น ทางผู้ดำเนินการวิจัยก็ได้ทำการตรวจสอบอิทธิพลของอุณหภูมิที่จะมีต่อค่า Stability ของวัสดุที่มีสารบิทูเมนเป็นส่วนประกอบ เช่น Asphaltic Concrete โดยได้ทดลองนำเอาวัสดุ Asphaltic Concrete ที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติตามที่ปรากฏในตารางที่ 1 มาทดลองวัดค่า Marshall Stability ที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลอง ปรากฏว่าค่า Marshall Stability ที่วัดได้จะมีค่าผกผันกับค่าอุณหภูมิของแอสฟัลท์ติกคอนกรีต ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และเมื่อนำมา Plot Graph หาความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า เมื่อแอสฟัลท์ติกคอนกรีต มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่า Marshall Stability ของมันก็จะมีค่าลดต่ำลงซึ่งก็สอดคล้องกับที่ L.W. Niboer and C. Van De Poel ได้ทำการศึกษาและวิจัยเอาไว้ในอดีต จึงคุณลักษณะดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อค่าแอมตัวของผิวทางหรือของโครงสร้างถนนที่วัดได้เป็นอย่างมาก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาผสมทำแอสฟัลต์ติกคอนกรีต

( A ) Properties of Limestone Aggregate

Sieve Size	% passing sieve of	
	Wearing Course	Binder Course
1"	-	100
3/4"	100	98.4
1/2"	90.1	87.1
3/8"	78.2	73.1
#4	62.4	55.1
#8	40.0	35.0
#16	27.8	24.4
#30	16.9	14.6
#50	11.3	9.6
#100	7.6	6.0
#200	5.9	4.6
Sp. Gr.	= 2.671	
Bitumen Absorbtion	= 0.03 %	

( B ) Properties of Asphalt Cement

Sp. Gr.	= 1.02
Penetration Grade	= 60 - 70
Viscosity (25° C)	= 62 Centistroke.

**ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ**

( A ) of Wearing Course

	Temperature ( °C )				
	25	30	40	50	60
Bulk Density, cgs.	2.359	2.392	2.391	2.392	2.393
% AC / Wt. of Mix.	4.85	4.85	4.85	4.85	4.85
Eff. % AC / Wt.of Mix.	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57
VMA, %	14.7	14.8	14.8	14.8	14.7
Air Void, %	4.0	4.1	4.1	4.1	4.0
VFB	72.8	72.3	72.3	72.3	72.8
Flow, x 0.01"	17	16	15	12	11
Stability, lbs.	8,260	6,077	4,897	3,174,	2,537

( B ) of Binder Course

	Temperature ( °C )				
	25	30	40	50	60
Bulk Density, cgs.	2.395	2.392	2.391	2.392	2.393
% AC / Wt. of Mix.	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
Eff. % AC / Wt.of Mix.	4.42	4.42	4.42	4.42	4.42
VMA, %	14.5	14.6	14.6	14.6	14.6
Air Void, %	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2
VFB	71.7	71.2	71.2	71.2	71.2
Flow, x 0.01"	16	15	12	11	10
Stability, lbs.	8,004	5,947	4,523	2,974	2,435

ดังนั้นผู้ดำเนินการวิจัยจึงมีความเห็นว่า ควรจะมีการทดลองและวิเคราะห์หาผลสรุปให้ทราบว่า วัสดุที่มีสารบิซูเมนเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆ นั้นค่าแอนตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรับน้ำหนักหรือแรง ( ซึ่งคงที่ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร และในอัตราเท่าใด เพื่อนำมาแก้ไขค่าแอนตัวของถนนซึ่งวัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปเป็นค่าแอนตัวของถนนที่เราต้องการทราบ เช่น ค่าแอนตัวที่อุณหภูมิมาตรฐาน ( Standard Temperature ) ซึ่งใช้สำหรับคำนวณโครงสร้างของถนนในการออกแบบ หรือเพื่อนำค่าแอนตัวเหล่านั้นไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ในด้านการบำรุงรักษา และด้านอื่นๆ อีกต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแอนตัวของถนนอันเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนัก หรือแรงที่มากระทำบนถนนนั้น มีอยู่หลายประการ คือ.

- ก. ความแข็งแรงรวมของโครงสร้างถนน
- ข. คุณสมบัติและความหนาของชั้นวัสดุที่มีสารบิซูเมนเป็นส่วนผสม
- ค. อายุของชั้นวัสดุที่มีสารบิซูเมนเป็นส่วนผสม
- ง. คุณภาพของแอสฟัลท์ซีเมนต์ เช่น Penetration Grade, Viscosity, Stiffness ฯลฯ
- จ. อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของถนน
- ฉ. ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น ปริมาณน้ำในโครงสร้างชั้นต่างๆ ของถนน ฯลฯ

จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายประการดังกล่าวมาแล้ว จึงทำให้ค่าแอนตัวของถนนที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีน้ำหนัก หรือแรงมากกระทำ มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายหรือไวมาก หากมีปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นหากต้องการตรวจสอบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ( ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่ง ) ที่มีต่อค่าแอนตัวของถนนแล้ว จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จำต้องกำหนดหรือทำให้ปัจจัยอื่นๆ ( ที่มีอิทธิพลต่อค่าแอนตัว ) เป็นค่าคงที่ จากนั้นจึงนำค่าแอนตัวของถนนที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิเหล่านั้น โดยการนำมา plot ลงใน Graph แผ่นเดียวกัน เราก็จะได้แผนภูมิ หรือ Chart ของความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 ก. ถึง 6 ฉ. ซึ่งเป็น Temperature Correction Chart หรือแผนภูมิสำหรับแก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน ของประเทศอังกฤษ ที่ได้จัดทำไว้สำหรับถนนที่มีความหนาขนาดต่างๆ ของชั้นวัสดุบิซูเมน ( Ref. 8 )

### 3. วัตถุประสงค์

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์หรือแผนภูมิ ( Chart ) สำหรับใช้ในการแก้ไขค่าแอนตัวของถนนที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปเป็นค่าแอนตัวของถนนที่อุณหภูมิที่ต้องการทราบ หรือที่อุณหภูมิมาตรฐาน ( Standard Temperature ) ที่กำหนดไว้ โดยวิเคราะห์จากแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวของถนนที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ กับค่าอุณหภูมิเหล่านั้น

#### 4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ถนนทั้งหมดที่ทำการศึกษาวัดค่าแอมตัว สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นถนนลาดยาง ( Flexible Pavement ) ที่มีอายุบริการเฉลี่ยประมาณ 3 ปี โดยมีอายุบริการตามที่ออกแบบไว้ 7 ปี

4.2 ชั้นผิวทางของถนนทั้งหมดนี้ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่มีสารบิพูเมนเป็นส่วนประกอบคือ วัสดุแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ที่มีความหนาตั้งแต่ 5.0 ถึง 12.0 ซม.

4.3 ค่า Marshall Stability ( ที่อุณหภูมิ 60°C ) ของวัสดุแอสฟัลต์ติกคอนกรีตของชั้นผิวทางนี้ มีค่าประมาณ 2500 ปอนด์

4.4 โครงสร้างของถนนส่วนที่อยู่ใต้ชั้นผิวทางลงไป มีลักษณะดังนี้ คือ

4.4.1 ชั้นพื้นทาง ( Base Course ) เป็นวัสดุหินคลุกหนาประมาณ 15 ซม. โดยมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80%

4.4.2 ชั้นรองพื้นทาง ( Sub-Base Course ) เป็นวัสดุ Soil Aggregate หนา 15 ซม. มีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 25%

4.4.3 ชั้นดินเดิม หรือ Foundation มีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 4%

4.5 การวัดค่าแอมตัวของถนนสำหรับงานวิจัยนี้ กระทำโดยเครื่องมือ Benkelman Beam ตามวิธีการวัดของกรมทางหลวง โดยกระทำการวัดระหว่างเวลา 06.00 ถึง 18.00 น. ของแต่ละวัน

#### 5. เครื่องมือวัดค่าแอมตัวของถนนของกรมทางหลวง

ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าแอมตัวของถนนมีหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีข้อเด่นและข้อด้อยไม่เหมือนกัน ดังนั้น จุดประสงค์ของการใช้เครื่องมือแต่ละชนิดบางครั้งก็เหมือนกันและบางครั้งก็แตกต่างกัน

เครื่องมือชนิดหนึ่งซึ่งมีหลักการทำงานที่ง่าย มีความถูกต้องเที่ยงตรงพอเชื่อถือได้ ราคาไม่แพงเกินไป และกรรมวิธีในงานตรวจวัดก็ง่าย ก็คือเครื่องมือ Benkelman Beam ซึ่งก็เป็นเครื่องมือวัดค่าแอมตัวของถนนเพียงชนิดเดียวที่กรมทางหลวงมีอยู่ เพื่อใช้สำหรับวัดค่าแอมตัวของถนนสำหรับนำมาประยุกต์ให้เป็นประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม เช่น การประเมินสถานภาพของถนนหาอายุบริการที่เหลืออยู่ ปรับปรุงและบำรุงรักษาสภาพของถนน รวมทั้งการออกแบบโครงสร้างชั้นต่าง ๆ ของถนน ดังนั้น เพื่อให้ผลที่ได้รับจากการดำเนินการวิจัยครั้งนี้เป็นประโยชน์สอดคล้องกับเครื่องมือที่กรมทางหลวงมีและใช้อยู่ ทางผู้ดำเนินการวิจัยจึงจะใช้เฉพาะเครื่องมือ Benkelman Beam นี้ทำการวัดค่าแอมตัวของถนน เพื่อนำมาวิเคราะห์และจัดทำแผนภูมิ ( Chart ) ที่จะนำไปใช้แก้ไขค่าแอมตัวของถนนเนื่องจากอุณหภูมิ

5.1 เครื่องมือ Benkelman Beam เป็น Deflection Beam ที่ถูกพัฒนาการขึ้นโดย A.C. Benkelman ในประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อวัดค่าแอนตัวของผิวทางขณะที่ล้อรถวิ่งผ่าน ค่าแอนตัวของผิวทางที่เกิดขึ้น จะถูกวัดโดยปลายด้านหนึ่งของคานซึ่งตั้งอยู่กับจุดที่จะวัด โดยคานที่วางนี้จะหมุนรอบแกนคงที่ ไม่เคลื่อนไหว ดังแสดงรายละเอียดและส่วนประกอบต่าง ๆ และรูปร่างของเครื่องมือได้ในรูปที่ 7

5.2 อุปกรณ์ประกอบสำหรับใช้ร่วมกับเครื่องมือ Benkelman Beam ในการวัดค่าแอนตัวของถนน

5.2.1 รถบรรทุกชนิด 2 เพลา โดยล้อของเพลาหลังต้องเป็นล้อคู่ และมีน้ำหนักลงบนเพลาหลัง 18,000 ปอนด์ รายละเอียดดูในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดของรถบรรทุกน้ำหนักที่ใช้กับเครื่องมือ Benkelman Beam

Characteristic	Satisfactory Range
Rear axle load	18,000 lbs (8150 kg.) $\pm$ 10 %
Dual rear wheel load	9,000 lbs (4075 kg.) $\pm$ 10 %
Front axle load	6,600 - 9,400 lbs.
Wheel base	6.10 m.
Tyre size	10" x 20" - 12 ply
Tyre pressure	80 psi.
Minimum gap between walls of twin rear wheels	Not less than 2.0 - 3.0 cm.
Gap between contact area of twin rear wheels	9.0 - 14.0 cm.
Contact area of twin rear wheels	(16.0 - 18.0) x (21.0 - 25.0); cm x cm. ( ดูรูปที่ 11 ประกอบ )

5.2.2 เครื่องมือสำหรับวัดความดันภายในของยางล้อรถ ที่วัดได้อย่างต่ำ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอ่านได้ละเอียดถึง 1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

5.2.3 Steering Thermometer ที่วัดได้ 0 ถึง 100 °C และอ่านได้ละเอียด 1 °C

5.2.4 เหล็กตอกน้ำ ( Mandril ) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 มม. เพื่อตอกหรือเจาะถนนให้เป็นรูสำหรับกรอกน้ำลงไป

5.2.5 ฆ้อนสำหรับตอกเหล็กตอกน้ำ

5.2.6 น้ำสำหรับกรอกในรูที่เจาะ

5.2.7 Tape สำหรับวัดระยะทางยาวไม่น้อยกว่า 50 เมตร

5.2.8 สี สำหรับทาหรือพ่น เพื่อทำเครื่องหมายสำหรับจุดทดลอง

5.2.9 Traffic Sign ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกและความปลอดภัยสำหรับผู้ดำเนินการทดลอง เช่น สัญญาณไฟเตือน, ป้ายจราจร, กรวยสัญญาณ ฯลฯ

5.2.10 แบบฟอร์ม Benkelman Beam Data Sheet สำหรับบันทึกข้อมูลผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8

## 6. การดำเนินการทดลอง

เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่มีอิทธิพลต่อค่าแอมป์ของถนนที่เกิดขึ้น เพราะถูกกระทำโดยแรงหรือน้ำหนักที่คงที่ ดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2 ดังนั้น ในการดำเนินการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิของถนนที่มีค่าแอมป์ของถนนครั้งนี้ จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ( นอกจากค่าอุณหภูมิของถนน ) ให้มีค่าคงที่หรือค่าเท่ากันในขณะที่ทำการวัดค่าแอมป์ของถนนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งวิธีการควบคุมปัจจัยอื่นเหล่านั้น ทางผู้ดำเนินการวิจัยก็กระทำโดย ทำการทดลองวัดค่าแอมป์ของถนนบนถนนที่มีสภาพและสิ่งแวดล้อมของโครงสร้างเหมือนกัน หรือมีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้คือ

### 6.1 การเตรียมการทดลอง

ถนนที่จะนำมาใช้ทดลองวัดค่าแอมป์สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ทั้งหมดจะเป็นถนนลาดยาง ( Flexible Pavement ) ที่ออกแบบไว้สำหรับรองรับปริมาณการจราจรเป็นระยะเวลา 7 ปี และมีลักษณะของโครงสร้างตามที่กล่าวไว้ในข้อ 4.2 โดยจะคัดเลือกเอาเฉพาะถนนที่มีสภาพดีไม่มีรอยแตก มีร่องล้อไม่มากกว่า 5 มม. และมีอายุบริการผ่านมาแล้วประมาณ 3 - 4 ปี และจากการคัดเลือกถนนเพื่อนำมาทดลองตามหลักการข้างต้น ก็ได้ถนนดังกล่าวทั้งหมด 34 ช่วงทดลอง ( Test Section ) ความยาวช่วงทดลองช่วงละ 100 ม.

สำหรับกำหนดเวลาที่จะทำการวัดค่าอุณหภูมิของถนนในแต่ละวันทำการทดลองนั้น จะทำการวัดทุก ๆ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 06.00 ถึง 18.00 น. ของแต่ละวัน เพราะค่าอุณหภูมิของถนนจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ และเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละวันหรือของแต่ละฤดูกาลของปีต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นต้องวางแผนดำเนินการทดลองดังกล่าวตลอดทั้งปีด้วย

## 6.2 หลักในการเลือก Test Section และกำหนดตำแหน่งของจุดทดลอง

เนื่องจากการทดลองเพื่อจะวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมป์ตัวของถนน ซึ่งก่อสร้างด้วยวัสดุที่มีสารบิทูเมนเป็นส่วนประกอบ กับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของถนน ดังนั้น การคัดเลือก Test Section สำหรับนำมาทำการศึกษาค้นคว้าและทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและสมบูรณ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงผลกระทบในด้านต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของถนนที่จะมีต่อปริมาณและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแอมป์ตัวของชั้นวัสดุบิทูเมน หรือโครงสร้างของถนน ทางผู้ดำเนินการวิจัยจึงวางแผนหลักเกณฑ์ในการคัดเลือก Test Section เหล่านี้ดังนี้ คือ

6.2.1 เพื่อศึกษาถึงปริมาณและอัตราหรือแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าแอมป์ตัวของถนน อันสืบเนื่องมาจากอิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุ ( บางส่วนหรือทั้งหมดของโครงสร้างถนน ) ที่มีสารบิทูเมนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งในการศึกษาและวิจัยครั้งนี้ก็คือ ชั้นวัสดุ Asphaltic Concrete นั้นเอง การทดลองวัดค่าแอมป์ตัวของถนนที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงควรกระทำบนถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุดังกล่าวที่แตกต่างกัน และในการดำเนินการทดลองและวิจัยครั้งนี้ ชั้นวัสดุดังกล่าวจะมีความหนาตั้งแต่ 5.0 ถึง 12.0 ซม.

6.2.2 เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อน ( error ) อันจะเกิดจากกรรมวิธีและเทคนิคในการวัดและการอ่าน รวมทั้ง Human Error การวัดค่าแอมป์ตัวของถนนจึงทำการวัดอย่างน้อย 3 ครั้ง ( ในจุดที่แตกต่างกัน ) ต่อค่าอุณหภูมิของถนน 1 ค่า สำหรับถนนที่มีโครงสร้างเดียวกันหรือเหมือนกัน จากนั้นจึงนำค่าแอมป์ตัวเหล่านั้นมาเฉลี่ย เพื่อถือเป็นค่าแอมป์ตัวของถนนที่อุณหภูมินั้น ๆ สำหรับนำไปคำนวณหรือวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

6.2.3 เพื่อความมั่นใจว่าสภาพของโครงสร้างของถนน และสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างถนนของจุดทดลองทั้ง 3 จุด ( ตามข้อ 6.2.2 ) จะมีสภาพเดียวกันหรือเหมือนกัน ตำแหน่งของจุดทดลองทั้ง 3 จุดจึงไม่ควรอยู่ห่างกันมาก เพราะอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาของชั้นวัสดุแอสฟัลท์ติกคอนกรีต หรือของโครงสร้างซึ่งอยู่ใต้ชั้นวัสดุแอสฟัลท์ติกคอนกรีตขึ้นได้ สำหรับการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ระยะห่างระหว่างแต่ละจุดทดลองควรห่างกันประมาณ 20 เมตร

6.2.4 ตำแหน่งของจุดทดลองทั้งหมด ต้องอยู่ในบริเวณทางรถวิ่ง (Wheel Path) ในแนวขนานกับขอบทางด้านนอก ( ด้านที่อยู่ติดกับไหล่ทาง ) ส่วนระยะห่างจากขอบทางด้านนอก ( ในแนวตั้งฉากกับของถนน ) ก็ให้เปลี่ยนไปตามความกว้างของช่องจราจร ดังนี้

ความกว้างของช่องจราจร (ม.)	ระยะจากขอบทางด้านนอก (ซม.)
ไม่เกิน 2.70	45
" 3.00	60
" 3.30	75
" 3.60	90

### 6.3 วิธีการทดลอง

เมื่อประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องมือ Benkelman Beam เสร็จเรียบร้อยแล้ว ควรทำการตรวจสอบ ( Calibrate ) ความถูกต้องเที่ยงตรงของเครื่องมืออีกครั้งก่อนที่จะทำการ Lock ติดกับกรอบของเครื่องมือ เพื่อป้องกันความเสียหายอันอาจเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายเครื่องมือ จากนั้นก็นำเครื่องมือ Benkelman Beam ดังกล่าวไปยังจุดที่จะทำการทดลองซึ่งได้ทำเครื่องหมายไว้แล้วบนผิวถนน เพื่อดำเนินการทดลองวัดค่าแอนต์ตัวของถนนโดยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

6.3.1 นำรถบรรทุกน้ำหนักที่มีน้ำหนักลงบนเพลาลัง 18,000 ปอนด์ และมีความดันภายในล้อของล้อคู่หลัง 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เข้ามาจอดในแนวถนนที่จะทดลอง โดยให้กึ่งกลางช่องว่างของล้อคู่หน้าของเพลาลังอยู่ในแนวของจุดที่จะทำการวัด และจัดแนวเคลื่อนที่ของรถให้ขนานกับแนวของถนน ส่วนตำแหน่งของล้อคู่หลังจะอยู่ที่จุดที่จะทำการวัด

6.3.2 สอดคานของเครื่องมือ Benkelman Beam ผ่านระหว่างกลางของช่องว่างของล้อคู่หลัง โดยให้ปลายของคานวางอยู่บนจุดที่ต้องการวัดค่าแอนต์ตัว ถึงขั้นตอนนี้ กรอบของเครื่องมือ Benkelman Beam จะถูกวางบนถนน จากนั้นก็ปลดหนวดบังคับ Lock ออก ปลายอีกข้างหนึ่งของคานก็จะสัมผัสกับเดือยของ Dial Gauge สำหรับวัดค่าแอนต์ตัว เปิดสวิทช์ให้ Buzzer ทำงาน ตั้ง Dial Gauge ที่ขีดกำหนด อ่านค่า Dial Gauge เป็นค่าเริ่มต้น ( $D_0$ )

6.3.3 เคลื่อนรถบรรทุกน้ำหนักไปข้างหน้าอย่างช้าๆ ( Creep Speed ) ด้วยความเร็ว  $10 \pm 1$  วินาที ต่อระยะทาง 5.0 เมตร

6.3.4 เมื่อรถบรรทุกน้ำหนักเริ่มเคลื่อนที่ ปลายของคาน ( ที่วางบนจุดวัด ) ก็จะมีเคลื่อนไหว ซึ่งจะเป็นผลทำให้ Dial Gauge เริ่มเคลื่อนไหวด้วย เมื่อเข็มของ Dial Gauge ชี้ที่ค่ามากที่สุด ( $D_{max}$ ) แล้วก็จะเริ่มหยุดนิ่งอีกครั้ง เมื่อรถแล่นผ่านจุดวัดไปมากกว่า 5.0 เมตร ขึ้นไป และเมื่อเสร็จสิ้นถึงขั้นตอนนี้เราก็จะสามารถคำนวณค่าแอนต์ตัวต่างๆ ของถนนได้ดังนี้คือ

$$\text{ค่าอ่านตัวของถนน (D)} = 2(D_{\max} - D_0)$$

เมื่อค่า 2 คือค่า Beam Ratio ระหว่างจุดวัดถึงแกนกับแกนถึง Dial Gauge

6.3.5 การวัดอุณหภูมิของผิวถนน ( หรือของถนน ) ก็ทำได้ด้วยการตอกเหล็กนำ ( Mandrill ) ลงบนผิวถนนลึกลงไปประมาณ 3 - 4 ซม. จากนั้นก็เติมน้ำลงไปจนเต็ม ทิ้งไว้สักครู่ สอด Steering Thermometer ลงไปในน้ำ รอจนปรอทหยุดนิ่งประมาณ 1 นาที แล้วจึงอ่านค่าอุณหภูมิ ก็จะได้ค่าอุณหภูมิของถนนขณะนั้น

และการวัดอุณหภูมิของถนน และอุณหภูมิของอากาศก็ควรทำไม่น้อยกว่า 2 ครั้ง ทุกๆ ช่วงทางของการทดลอง คือควรวัดก่อนและหลังการทดลอง

6.3.6 การวัดความดันภายในของยางล้อรถ ควรจะทำการวัดทุกๆ 2 - 3 ชม. ระหว่างการทดลอง เพื่อปรับให้ความดันเป็น 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตลอดการทดลอง

6.3.7 ควรทำการบันทึกสภาพของผิวทาง สภาพข้างเคียงและรายละเอียดของโครงสร้างทางด้วย โดยการขุดดูความหนาของโครงสร้างชั้นต่างๆ ( ถ้าทำได้ ) และบันทึกชนิดของวัสดุเอาไว้ด้วย เพื่อใช้ข้อมูลเหล่านี้มาพิจารณาควบคู่กับผลการวัดค่าอ่านตัวของที่ทดลองได้

#### 6.4 ข้อควรระวังในการทดลองวัดค่าอ่านตัวของถนน

ในการปฏิบัติงานวัดค่าอ่านตัวของถนนในสนามนั้น ความผิดพลาดที่มักจะมีบ่อยๆ ในการตรวจวัดค่าอ่านตัวของถนนด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam พอดีจะจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

##### 6.4.1 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องมือ Benkelman Beam

เนื่องจากเครื่องมือ Benkelman Beam เป็น Deflection Beam มีองค์ประกอบของเครื่องมือและวิธีการทำงานอย่างง่าย ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงควรพยายามตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ โดยตรวจ Check Dial Gauge และ Pivot of Beam อยู่เสมอ เพื่อให้มีความถูกต้องคงที่ก่อนนำไปใช้ในการตรวจวัด ในกรณีที่เป็นต้องแยก Beam ออกจากกัน ในส่วนที่ผู้คนมักจะมองข้ามและละเลยก็คือ Locking Boots ซึ่งควรจะพยายามตรวจสอบและซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีเสมอด้วย กล่าวโดยสรุปแล้ว ความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องมือที่อยู่ในสภาพที่ดีและถูกต้องแล้ว จะมีน้อยมาก คือจะมีเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น

##### 6.4.2 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วัด

น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้สำหรับกระทำเพื่อให้ถนนเกิดการอ่านตัวในการทดลองแต่ละครั้งจะมีค่าเท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการทดลองวัดค่าอ่านตัวว่า ต้องการค่า

แอมป์ของถนนที่วัดได้ไปเปรียบเทียบหรือประยุกต์ใช้ประโยชน์กับกฎเกณฑ์ใดเช่น Criteria of Fatigue Curve ที่ได้มาจากการทดลองหา Curve เหล่านั้นด้วยน้ำหนักบรรทุกเท่าใด ยกตัวอย่างเช่น ในประเทศอังกฤษ ( Ref. 9 ) น้ำหนักบรรทุกที่ใช้จะมี น้ำหนักหลังที่เพลหลัง ( Rear Axial Load ) 6,350 กก. กล่าวคือจะมี น.น.ลงบนล้อหลัง ( Rear Wheel Load ) 3,175 กก. ส่วนของประเทศไทยจะใช้ Curve ดังกล่าวเหมือนกับประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศแคนาดา ( ของ CGRA ) ( Ref. 10 ) กล่าวคือ น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดลอง จะมีน้ำหนักลงบนเพลหลัง 8,150 กก. หรือมีน้ำหนักหลังที่ล้อหลัง 4,075 กก.

ดังนั้นระหว่างการทดลอง ถ้าน้ำหนักที่ลงบนล้อหลังผิดไปจากที่กำหนดไว้แล้ว ก็ควรนำค่าแอมป์ของถนนที่วัดได้ มาแก้ไขให้ถูกต้องเสียก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ โดยนำค่าแอมป์ที่วัดได้เหล่านั้นมาคูณด้วย \* น้ำหนักล้อมาตรฐานหารด้วยน้ำหนักล้อหลังของรถบรรทุกที่ใช้วัด \* และหากค่าน้ำหนักแท้จริงของล้อหลังของรถบรรทุกที่ใช้วัด มีค่าผิดไปจากน้ำหนักมาตรฐานเกินกว่าร้อยละ 10 แล้ว ก็ให้ปรับน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกน้ำหนักใหม่ให้ได้มาตรฐาน

#### 6.4.3 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของรถบรรทุกน้ำหนัก

ตามมาตรฐานที่กำหนด ความเร็วของรถบรรทุก น.น.ที่ใช้ในการวัดค่าแอมป์ของถนน จะต้องมีความเร็วประมาณ 5 เมตร ต่อ 10 วินาที (  $\pm 1$  วินาที ) หรือประมาณ 1.8 กม. ต่อชั่วโมง กล่าวคือควรจะมีความเร็วอยู่ระหว่าง 1.50 - 2.00 กม. ต่อ ชม.

ในปี ค.ศ. 1968 N.W. Lister and R. Jones ( Ref. 11 ) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วของรถบรรทุกน้ำหนัก ที่มีค่าแอมป์ของถนนที่วัดได้ พบว่า เมื่อความเร็วของรถบรรทุกน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้อัตราเพิ่มของการแบกรับของวัสดุที่อยู่ใต้รถบรรทุกมีค่าสูงขึ้น และจะมีผลทำให้ค่า Elastic Modulus ของวัสดุเหล่านั้นเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าแอมป์ของถนนที่วัดได้มีค่าต่ำลง โดยมีอัตราการเพิ่มหรือลด ( ของค่าแอมป์ ) ร้อยละ 5 เมื่อความเร็วของรถเปลี่ยนไปทุกๆ 1 กม./ชม.

#### 6.4.4 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความลาดชัน (Super Elevation) ของถนน

ความลาดชันของถนนที่ทำการวัดค่าแอมป์ จะมีผลทำให้ค่าแอมป์ของถนนที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากความลาดชันของถนนจะทำให้ น้ำหนัก หรือแรงที่ลงบนล้อหลังของรถบรรทุกน้ำหนักที่ใช้ในการวัดเปลี่ยนไป โดยจะมีอัตราการการเปลี่ยนแปลง ดังนี้คือ

Super Elevation	% Change in wheel loading
0 - 40 mm./m.	0.05% per mm./m.
More than 40 mm./m.	2.00% +0.1 for each mm./m.

ดังนั้นก่อนที่จะนำค่าแอนตัวที่วัดได้ในสนามมาวิเคราะห์ เราจึงจำเป็นต้องคำนวณแก้ไขน้ำหนัก ที่ลงบนล้อหลังของรถบรรทุกน้ำหนัก ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Super Elevation ที่มีอยู่เสียก่อนให้ถูกต้อง จากนั้นจึงนำค่าน้ำหนักที่ลงบนล้อหลัง ( ที่ได้แก้ไขแล้ว ) นี้ไปคำนวณหาค่าแอนตัวที่ถูกต้องตามข้อ 6.4.2 อีกครั้ง

## 7. การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโดยวิธีทางกลศาสตร์รวมกัน จะมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งๆ ที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ความแตกต่างของข้อมูลจะมีให้เห็นอยู่เสมอ ส่วนความแตกต่างเหล่านั้นจะมีค่ามากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทั้งทางด้านเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุเหล่านั้น รวมทั้งกรรมวิธีในการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเหล่านั้น ดังนั้น ก่อนจะนำข้อมูลทางวิศวกรรมเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลสรุปใดๆ ก็ตาม ผู้ทำการวิเคราะห์ควรจะพิจารณาถึงความเหมาะสมของข้อมูลเหล่านั้นว่า สมควรจะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานของการวิเคราะห์หรือไม่.

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมของค่าแอนตัวของถนนที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam ครั้งนี้ เพื่อจุดประสงค์ที่จะนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของถนนโดยการจัดทำเป็นรูปแบบของแผนภูมิ ( Chart ) ของความสัมพันธ์ดังกล่าว นั้น ทางผู้ดำเนินการวิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

7.1 นำค่าแอนตัวของถนนใน Test Section เดียวกันทั้ง 3 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกันประมาณ 20 เมตร ที่วัดได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อกำหนดเป็นค่าแอนตัวของถนนที่อุณหภูมิของถนนดังกล่าวของ Test Section นั้น ๆ พร้อมกับคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแอนตัวเฉลี่ย (ของทั้ง 3 จุด) นี้เอาไว้ด้วย เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาในแง่อื่นอีก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นข้อมูลค่าแอนตัวของถนนที่อุณหภูมิต่างๆ ของ Test Section หมายเลข 3

7.2 นำค่าแอนตัวเฉลี่ยของถนนที่คำนวณได้จากข้อ 7.1 และค่าอุณหภูมิของถนนขณะทำการวัดค่าแอนตัวเหล่านั้น ของแต่ละ Test Section มา plot ลงใน graph โดยใช้แกนนอนเป็นค่าอุณหภูมิ ( °C ) ของถนน และแกนตั้งเป็นค่าแอนตัวเฉลี่ย (mm.) ของถนน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าแอนตัวกับอุณหภูมิของถนนของ Test Section หมายเลข 3

ตารางที่ 4 ข้อมูลวัดค่าอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนน Test Section หมายเลข 3

Station No.1 : 114+920	Surface Depth : 5.0 cm.
Station No.2 : 114+940	Surface Width : 6.00 m.
Station No.3 : 114+960	Shoulder Width : 2.00 m.

Time	Temperature (°C)		Deflection (mm)				
	Air	Pave	1	2	3	Avg.	Est.
6.00	12	16	0.11	0.14	0.11	0.12	0.13
7.00	14	19	0.12	0.15	0.12	0.13	0.13
8.00	17	20	0.15	0.13	0.13	0.14	0.13
9.00	21	22	0.15	0.18	0.11	0.15	0.14
10.00	28	29	0.16	0.17	0.12	0.15	0.15
11.00	29	34	0.13	0.14	0.18	0.15	0.16
12.00	29	36	0.20	0.15	0.18	0.18	0.16
13.00	30	37	0.19	0.12	0.17	0.16	0.16
14.00	31	37	0.14	0.19	0.16	0.16	0.16
15.00	33	37	0.20	0.15	0.14	0.16	0.16
16.00	31	34	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
17.00	29	32	0.18	0.16	0.12	0.15	0.15
18.00	22	28	0.16	0.17	0.13	0.15	0.15
Avg.	25	29	0.16	0.16	0.15	0.16	
Max.	33	37	0.22	0.22	0.22	0.22	
Min.	12	16	0.11	0.12	0.11	0.12	
Range	21	21	0.11	0.10	0.11	0.10	

Regression Output:

Constant	0.09946	Y = Pavement Deflection
Std Err of Y Est	0.00571	X = Pavement Temperature
R Squared	0.86182	Est. = Deflection Estimated from
No. of Observations	12	Regressive Equation
Degrees of Freedom	10	
X Coefficient	0.00173	
Std Err of Coeff.	0.00022	

7.3 คำนวณหาสมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวและค่าอุณหภูมิของถนน (ของแต่ละ Test Section) ตามวิธี Regression Analysis และหาค่า Regression Correlation ( $R^2$ ) กับค่า Standard Error of Y Estimated เอาไว้ด้วย เพื่อประกอบการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป และรูปแบบของสมการส่วนใหญ่จะเป็นสมการเส้นตรง (Linear Equation) ในรูป

$$D = a + mt$$

โดยที่

$$D = \text{ค่าแอนตัวของถนน}$$

$$a = \text{ค่าคงที่, ซึ่งจะแสดงในทราบดีถึงความแข็งแรงรวมของโครงสร้างถนน}$$

$$m = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง (Slope) ของสมการ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีค่าแอนตัวของถนน}$$

7.4 การวิเคราะห์และจัดสร้างแผนภูมิสำหรับใช้แก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน (Temperature Corection Chart) นั้น ทางผู้ดำเนินการวิจัย ได้วิเคราะห์และจัดทำแผนภูมิดังกล่าวเป็นชุดๆ แยกตามความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารปิจูเมนเป็นส่วนประกอบ และมีอิทธิพลต่อค่าแอนตัวของถนนมาก โดยดำเนินการเป็นขั้นตอนดังนี้ คือ

7.4.1 นำค่า  $R^2$  ของแต่ละ Test Section ที่ได้จากข้อ 7.3 มาพิจารณาว่าสมควรที่จะนำ Regression Equation ที่ได้มาจากข้อ 7.3 สมการใดบ้างมาจัดทำเป็นแผนภูมิสำหรับใช้แก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนน หรือหลายๆ กับพิจารณาค่า  $m$  หาแต่ละสมการดังกล่าวพร้อมไปด้วย โดยมีหลักในการพิจารณาดังนี้คือ

7.4.2 เลือกสายทางที่มีค่า  $R^2$  ไม่ต่ำกว่า 0.5 มาพิจารณา เพราะสายทางใดที่มีค่า  $R^2$  ดังกล่าวก็แสดงว่าค่าแอนตัวกับค่าอุณหภูมิของถนนที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันพอใช้ได้ ส่วนสายทางใดที่มีค่า  $R^2$  ต่ำกว่านี้ก็แสดงว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าแอนตัวอันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของถนนไม่สัมพันธ์กัน อันอาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างกันในลักษณะของโครงสร้างของถนน หรืออาจจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าแอนตัวหรืออิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่ไม่เหมือนกันก็ได้

7.4.3 เลือกสายทางที่มีค่า  $m$  เป็นไปในทิศทางเดียวกับสายทางส่วนใหญ่และสอดคล้องกับทฤษฎีว่าด้วย Stiffness ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2 ส่วนสายทางใดที่มี  $m$  ขัดแย้งกับสายทางส่วนใหญ่ (ที่มีโครงสร้างและชั้นวัสดุปิจูเมนหนาเท่ากัน) แล้ว ก็แสดงว่าจำเป็นต้องมีความแตกต่างกันในด้านลักษณะของโครงสร้างหรือของชั้นวัสดุปิจูเมน เนื่องจากจุดแต่ละจุดที่เราทำการทดลองวัดค่าแอนตัวนั้นเราไม่ได้ชูดูความหนาและลักษณะโครงสร้างทุกจุด

7.4.4 ค่า  $a$  และ  $m$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวและอุณหภูมิของถนน ที่ได้จากการดำเนินการวิจัยครั้งนี้มีหลายค่า แม้ว่าถนนหรือ Test Section เหล่านั้นจะมีโครงสร้างเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าแอนตัวคงได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2 ดังนั้น เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการนำแผนภูมิเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทางผู้ดำเนินการวิจัย จึงแบ่งค่าเหล่านี้ออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามลักษณะโครงสร้างและความหนาของชั้นผิวทาง การแบ่งกลุ่มในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ จะได้กลุ่มโครงสร้างทางของถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุผิวเมน 3 กลุ่มเพื่อนำมาเขียนเป็นแผนภูมิคือ กลุ่มของโครงสร้างถนนที่มีความหนาของชั้นผิวเมน 5.0 8.0 และ 8.5 - 12.5 ซม. โดยนำแต่ละกลุ่มมาจัดทำแผนภูมิของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวและอุณหภูมิของถนนที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ในแผนภูมิเดียวกัน ดังแสดงในรูป คือ

รูปที่ 10 ก เป็นแผนภูมิของถนนที่มีชั้นผิวทางหนา 5.0 ซม.

รูปที่ 10 ข เป็นแผนภูมิของถนนที่มีชั้นผิวทางหนา 8.0 ซม.

รูปที่ 10 ค เป็นแผนภูมิของถนนที่มีชั้นผิวทางหนา 8.5 - 12.0 ซม.

7.5 สำหรับภาววิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรง ( รวม ) ของโครงสร้างของถนนที่ใช้ทดลอง เพื่อจัดทำแผนภูมิแก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิของถนนในครั้งนี้นั้น ก็กระทำโดยการนำแผนภูมิทั้ง 3 รูป ที่จัดทำขึ้นตามข้อ 7.4.4 มาวิเคราะห์ความแข็งแรง ( รวม ) ของโครงสร้างของถนนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 1.1 ซึ่งกำหนดค่าความแข็งแรง ( รวม ) ของโครงสร้างของถนนเป็นค่า Modified Structural Number ( SNC ) โดยค่า SNC นี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณภาพและความหนาของชั้นวัสดุชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้าง

แต่ในการดำเนินการทดลองและวิจัยครั้งนี้ เราทำการทดลองวัดค่าแอนตัวของถนนบนถนนที่มีโครงสร้างที่อยู่ได้ชั้นผิวทางลงไปเหมือนกัน ( ตามที่กล่าวไว้ในข้อ 4.4 ) ดังนั้น SNC จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าความหนาของชั้นผิวทางหรือวัสดุผิวเมน นั่นเอง

เพราะฉะนั้น ค่า SNC ของรูปที่ 10 ก จะน้อยกว่าของรูปที่ 10 ข และจะน้อยกว่าของรูปที่ 10 ค ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นผิวทางของรูปที่ 10 ก น้อยกว่าของรูปที่ 10 ข และน้อยกว่าของรูปที่ 10 ค ตามลำดับนั่นเอง

## 8. สรุป

จากผลการดำเนินการทดลองและวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ ( Coefficient ) หรือจัดทำแผนภูมิ ( Chart ) สำหรับใช้ในการแก้ไขค่าแอนตัว เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิของถนนในครั้งนี้พบว่า

8.1 เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และเหมาะแก่การนำแผนภูมิดังกล่าว ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ควรจะแบ่งการทดลองและจัดทำแผนภูมิเหล่านั้นออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามความหนาของชั้นผิวทาง ( หรือชั้นวัสดุบิตูเมน ) ที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างของถนนเหล่านั้น

8.2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน ถนนที่มีความแข็งแรง ( รวม ) ของโครงสร้างมากกว่า จะมีค่าแอนตัวต่ำกว่าถนนที่มีความแข็งแรง ( รวม ) ของโครงสร้างน้อยกว่า

ตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 10 °C ค่าแอนตัวของถนนในรูปที่ 10 ข จะต่ำกว่าในรูปที่ 10 ก และค่าแอนตัวของถนนในรูปที่ 10 ค จะต่ำกว่าในรูปที่ 10 ข เนื่องจากโครงสร้างของถนนในรูป 10 ก มีความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างถนนในรูปที่ 10 ข และ 10 ค ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 7.5

8.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแอนตัว เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิของถนน ( ของแต่ละเส้นทาง ) จะคงที่ คือ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนอัตราของการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ของถนนแต่ละสายทางจะไม่เท่ากัน โดยจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

8.3.1 สำหรับถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุบิตูเมนเท่ากัน ถนนที่มีโครงสร้าง ( รวม ) แข็งแรงกว่า จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่าถนนที่มีโครงสร้าง ( รวม ) อ่อนแอกว่า

8.3.2 สำหรับถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุบิตูเมนไม่เท่ากัน ถนนที่มีชั้นวัสดุบิตูเมนหนากว่า จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุบิตูเมนบางกว่า

8.4 สำหรับช่วงของอุณหภูมิ ( Temperature Range ) ของแผนภูมิแก้ไขค่าแอนตัว เนื่องจากอุณหภูมิของถนนนั้นมีค่าไม่คงที่ โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะความแข็งแรงหรือ Stiffness ของโครงสร้างของถนน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิด ( Type ) และความหนาของชั้นวัสดุบิตูเมนที่มีอยู่ ดังนั้นการกำหนดค่า Temperature Range ที่ถูกต้อง ควรทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นเสียก่อนว่า มีผลกระทบหรือมีอิทธิพลต่อค่าแอนตัวของถนนมากน้อยเพียงไร เช่น ค่า Softening Point of Asphalt Cement เป็นต้น สำหรับการดำเนินการทดลองและวิจัยครั้งนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาเรื่องดังกล่าวไว้ การกำหนดค่า Temperature Range ที่ถูกต้อง จึงยังไม่สามารถกระทำได้ แต่จากข้อมูลการวัดค่าแอนตัว และอุณหภูมิของถนนในการทดลองครั้งนี้ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้ คือ 16 °C ซึ่งเป็นการวัดจาก Test Section No. 3 เมื่อเวลา 6.00 น. ของวันที่ 5 มกราคม พ.ศ.2538

( อยู่ในช่วงฤดูหนาว ) และค่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ คือ  $48^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นการวัดจาก Test Section No. 13 เมื่อเวลา 14.00 น. ของวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ.2538 ( อยู่ในช่วงฤดูร้อน ) ดังนั้น ค่าช่วงอุณหภูมิ (Temperature Range) ที่แผนภูมิทั้ง 3 อัน ซึ่งจัดทำได้ในครั้งนี้ ก็สมควรจะครอบคลุมอุณหภูมิทั้ง 2 ค่าดังกล่าว คือ ควรจะอยู่ระหว่าง  $15 - 50^{\circ}\text{C}$

## 9. เสนอแนะ

9.1 การนำแผนภูมิแก้ไขค่าแอนตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ( Temperature Correction Chart ) ของถนนไปใช้เพื่อแก้ไขค่าแอนตัวของถนนซึ่งวัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปเป็นค่าแอนตัวของถนนที่อุณหภูมิที่ต้องการทราบนั้น ควรเลือกใช้แผนภูมิที่ถูกต้องและเหมาะสม สอดคล้องกับความหนาของชั้นผิวทางหรือชั้นวัสดุบิตูเมนที่ระบุไว้ในแผนภูมิตานั้น

9.2 เพื่อประโยชน์ในการนำประกอบการศึกษาข้อมูลค่าแอนตัวของถนนที่วัดได้ ( ในสนาม ) ผู้ทำการสำรวจและวัดค่าแอนตัว ควรจะทำการบันทึกสภาพของผิวทาง สภาพและลักษณะของโครงสร้างทาง และรายละเอียดเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในบริเวณพื้นที่ของถนน หรือ Test Section ที่ทำการสำรวจ ส่วนพื้นที่บริเวณนอกจุดสำรวจ รายละเอียดอาจน้อยลงก็ได้

9.3 ในระหว่างทำการสำรวจและวัดค่าแอนตัวของถนนที่มีความหนาของชั้นวัสดุบิตูเมนตั้งแต่ 17.5 ซม. ขึ้นไปนั้น หากถนนเหล่านั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( Temperature Gradient ) มากกว่า  $2.5^{\circ}\text{C}$  ต่อชั่วโมง ขึ้นไปแล้ว ก็ควรจะหยุดทำการสำรวจวัดค่าแอนตัวของถนนเหล่านี้ไว้ชั่วคราว เพราะการที่ถนนเหล่านั้นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลงอย่างรวดเร็วในอัตราดังกล่าว จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่า Stiffness ของชั้นวัสดุบิตูเมนของถนน ( ซึ่งหนามาก ) เหล่านี้ยังเกิดไม่สมบูรณ์ และมีผลกับค่าแอนตัวอย่างเต็มที่ตามที่ควรจะเป็น ดังนั้นค่าแอนตัวที่วัดได้ของถนน จึงจะมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

9.4 ผู้ซึ่งมีหน้าที่เกี่ยวข้องและทำการสำรวจวัดค่าแอนตัวของถนนควรตระหนักและระมัดระวัง ความคลาดเคลื่อนของค่าแอนตัวของถนนที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิของถนนที่วัดได้ เพราะกรรมวิธีในการวัดอุณหภูมิ หรือ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ รวมทั้งจำนวนครั้งในการวัดอุณหภูมิที่ไม่พอเพียงด้วย

9.5 ในการพิจารณาจำนวนครั้งหรือความถี่ - ห่าง ( Frequency ) ของการวัดอุณหภูมิของถนนนั้น ควรพิจารณาตามสภาพของอากาศกระแสลมที่พัดผ่าน ความชื้นในอากาศ ระดับโล่งแจ้ง ( Degree of Exposure ) ของถนน รวมทั้งชนิดและสีของผิวถนนด้วย กล่าวคือ

9.5.1 ในวันที่มีอากาศร้อน หรือในวันที่กระแสลมพัดผ่านบริเวณนั้นเป็นลมเย็น ซึ่งจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของถนนในบริเวณนั้นมีอัตราของการเปลี่ยนแปลงสูง ดังนั้นควรจะทำให้การวัดอุณหภูมิให้บ่อยขึ้น โดยช่วงระยะเวลาของการวัดแต่ละครั้งไม่ควรจะห่างกันเกินกว่า 20 นาทีต่อครั้ง แต่สำหรับสภาพอากาศที่มีเมฆหมอกปกคลุมแล้ว ช่วงระยะเวลาของการวัดอุณหภูมิแต่ละครั้งควรจะทำประมาณ 30, 40 ถึง 60 นาทีต่อครั้ง

9.5.2 ระดับโล่งแจ้งของถนน จะมีผลทำให้อุณหภูมิของถนนมีความแตกต่างกันมากระหว่างบริเวณที่ถูกแดดกับบริเวณที่อยู่ใต้ร่มเงา และระหว่างบริเวณที่กระแสลมร้อนกับบริเวณที่กระแสลมเย็นพัดผ่าน ดังนั้นการวัดอุณหภูมิของถนนจึงควรกระทำทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพดังกล่าว

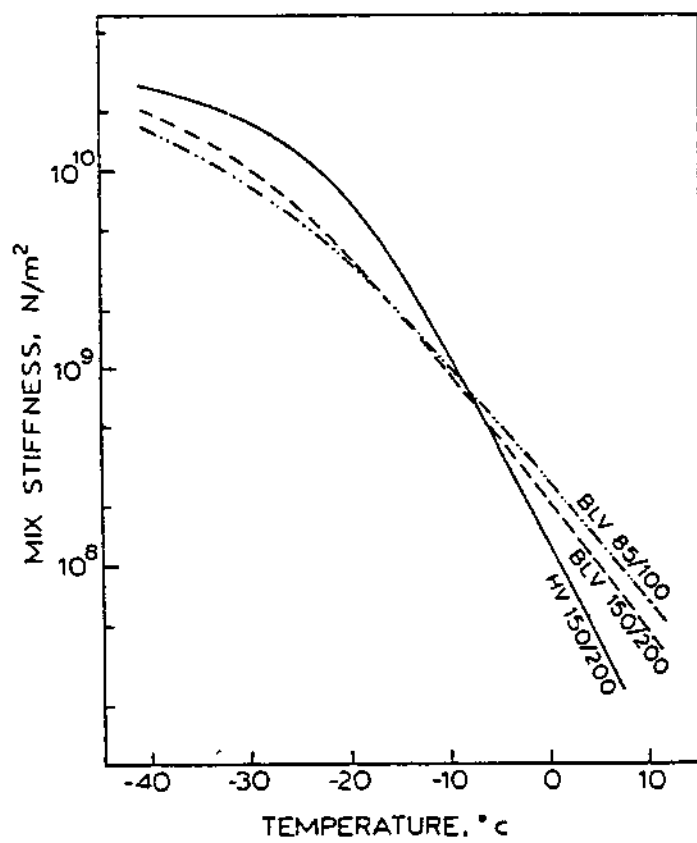
9.5.3 ส่วนชนิด ( Type ) และสี ( Color ) ของผิวทางนั้นก็จะมีผลกับค่าอุณหภูมิของถนน เพราะอิทธิพลของความสามารถในการดูดซับ หรือสะท้อนความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรทำการวัดอุณหภูมิทุกครั้งที่มีความแตกต่างของชนิด หรือ สีของผิวทาง ซึ่งทั้งนี้และทั้งนั้น ระยะห่างของการวัดอุณหภูมิของถนนแต่ละครั้งจะต้องไม่ห่างกันเกินกว่า 60 นาทีต่อครั้ง

## 10. เอกสารอ้างอิง

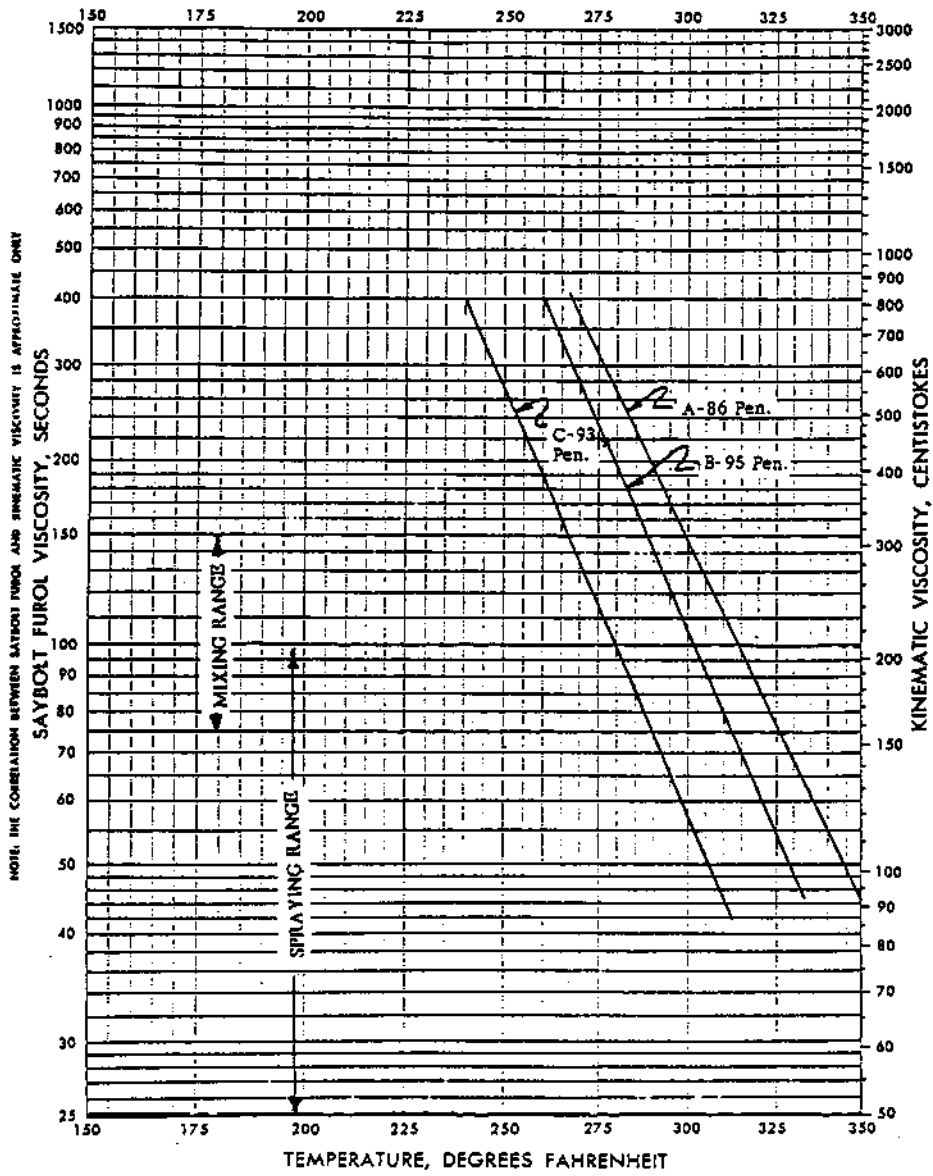
1. American Associate of State Highway Officials, " AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structure ", 341 National Press Building, Washington D.C., 2004, 1972.
2. Hodges, J.W., J.Rolt, and T.E. Jones, (1975), " The Kenya Road Transport Cost Study Research on Road Deterioration ", Laboratory Report 673., Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
3. American Society for Testing and Materials, ASTM No. 628, " Low Temperature Properties of Bituminous Materials and Compacted Bituminous Paving Mixtures ", ASTM Special Technical Publication by C.R. Marek, Vulcan Materials Company, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa. 19103, 1976.
4. Highway Research Board; HRB. Bull. No. 54, " Temperature in Bituminous Mixture ", 1959 Conference.
5. Federal Aviation Associate; FAA., " Pavement and Surface for Highway and Airport ", Michel Sargious, Applied Science Published, Ltd. London, 1975.
6. L.W. Niboer and C.Van DePoel, " A Study of Vibration Phenomina in Asphaltic Road Construction ", Proceeding, The Association of Asphalt Paving Technologied, Vol. 22, pp. 197 - 237, 1953.
7. Marek, C.R. and Damsey, B.J. " A Model Utilizing Climate Factors for Determining Stress and Deflections in Flexible Pavement System " Proct; 3Rd, International Conference on the Structure Design of Asphalt Pavement, London, Sept. 1972, pp. 101 - 114.
8. Transport and Road Research Laboratory; TRRL. No. 833., " Prediction of Pavement Performance and the Design of Overlays " by C.K. Kenedy and N.W. Lister, 1978.
9. Transport and Road Research Laboratory; TRRL. No. 834, " Pavement Deflection; Equipment for Measurement in The United Kingdom " C.K. Kenedy, P. Fevre and C.S. Clarke, 1978.
10. " A Guide for The Structural Design of Flexible and Rigid Pavements in Canada " Canada Good Roads Association, (CGRA.), 270 Maclaren Street, Ottawa 4, Canada, Sept. 1965.
11. Lister N.W. and R. Jones, " The Behavior of Flexible Pavements under Moving Wheel Loads " Proc. 2nd Int. Conf. Struct. Des. Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, USA., 1967. Ann Arbor 1968 (The University of Michigan) pp. 1021 - 1035.

## สารบัญรูป

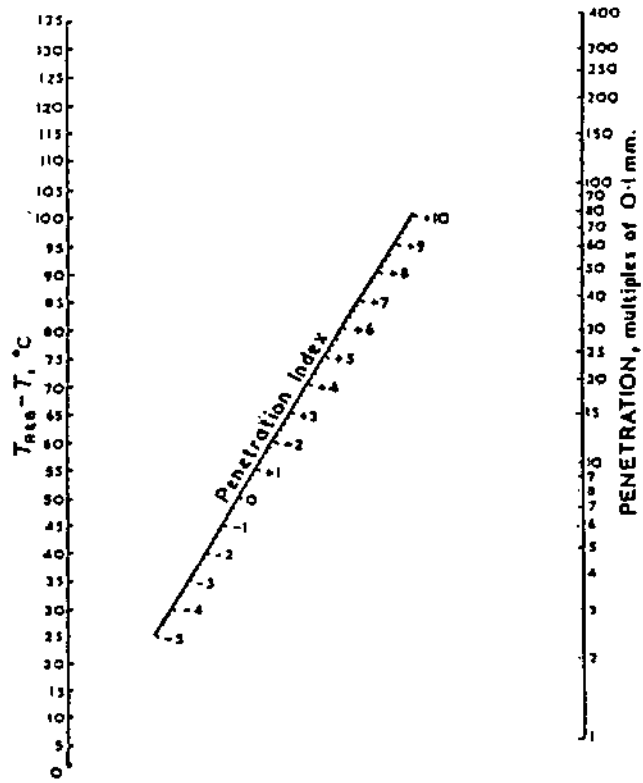
		หน้า
รูปที่ 1	การเปรียบเทียบสถิติเนสของวัสดุปิทูเมนแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ	25
รูปที่ 2	แสดงค่า Viscosity ของแอสฟัลท์ที่อุณหภูมิต่างๆ	26
รูปที่ 3	Nomograph สำหรับหาค่า Penetration Index ของแอสฟัลท์	27
รูปที่ 4	Nomograph สำหรับหาค่าสถิติเนสของสารปิทูเมน	28
รูปที่ 5	แสดงค่า Stability ของแอสฟัลท์ติกคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	29
รูปที่ 6ก ถึง รูปที่ 6ข	แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่ ที่ก่อสร้างด้วยวัสดุปิทูเมน ซึ่งมีความหนาต่างๆ กัน ของ United Kingdom	30
รูปที่ 7	แสดงรูปร่างและส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือ Benkelman Beam	36
รูปที่ 8	แบบฟอร์มที่ใช้บันทึกผลการทดลองการวัดค่าแอนตัวด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam ของกรมทางหลวง	37
รูปที่ 9	แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนน Test Section หมายเลข 3	38
รูปที่ 10 ก	แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุปิทูเมนหนา 5.0 ซม.	39
รูปที่ 10 ข	แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุปิทูเมนหนา 8.0 ซม.	40
รูปที่ 10 ค	แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุปิทูเมน หนา 8.5 - 12.0 ซม.	41
รูปที่ 11	แสดงขนาดและรูปร่างสัมผัสนกถนนของยางคู่หลังของรถบรรทุกน้ำหนัก ที่ใช้ สำหรับการทดลองวัดค่าแอนตัวด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam	42



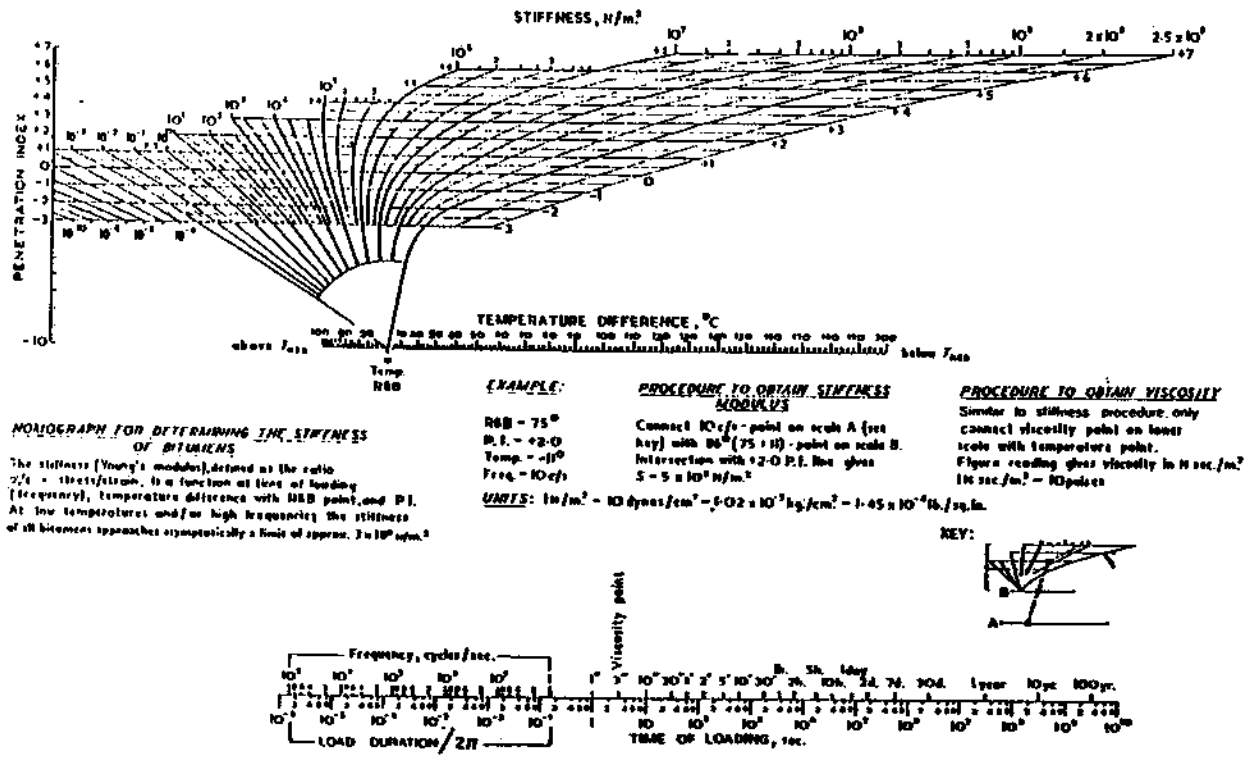
รูปที่ 1 การเปรียบเทียบสติฟเนสของวัสดุบิวเมนแต่ละชนิด  
ที่อุณหภูมิต่างๆ (Ref.3)



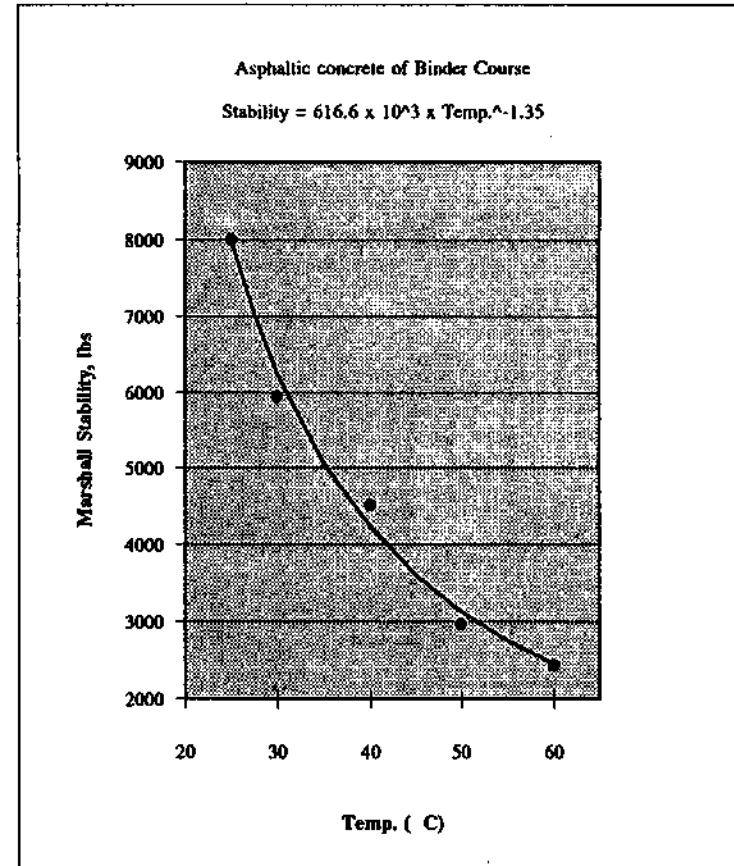
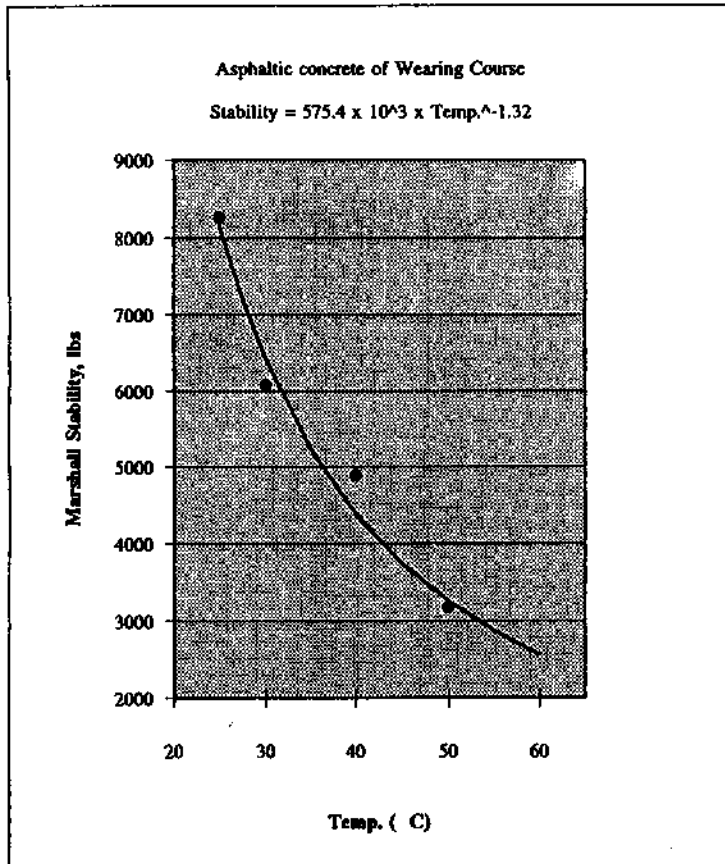
รูปที่ 2 แสดงค่า Viscosity ของแอสฟัลท์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Ref.4)



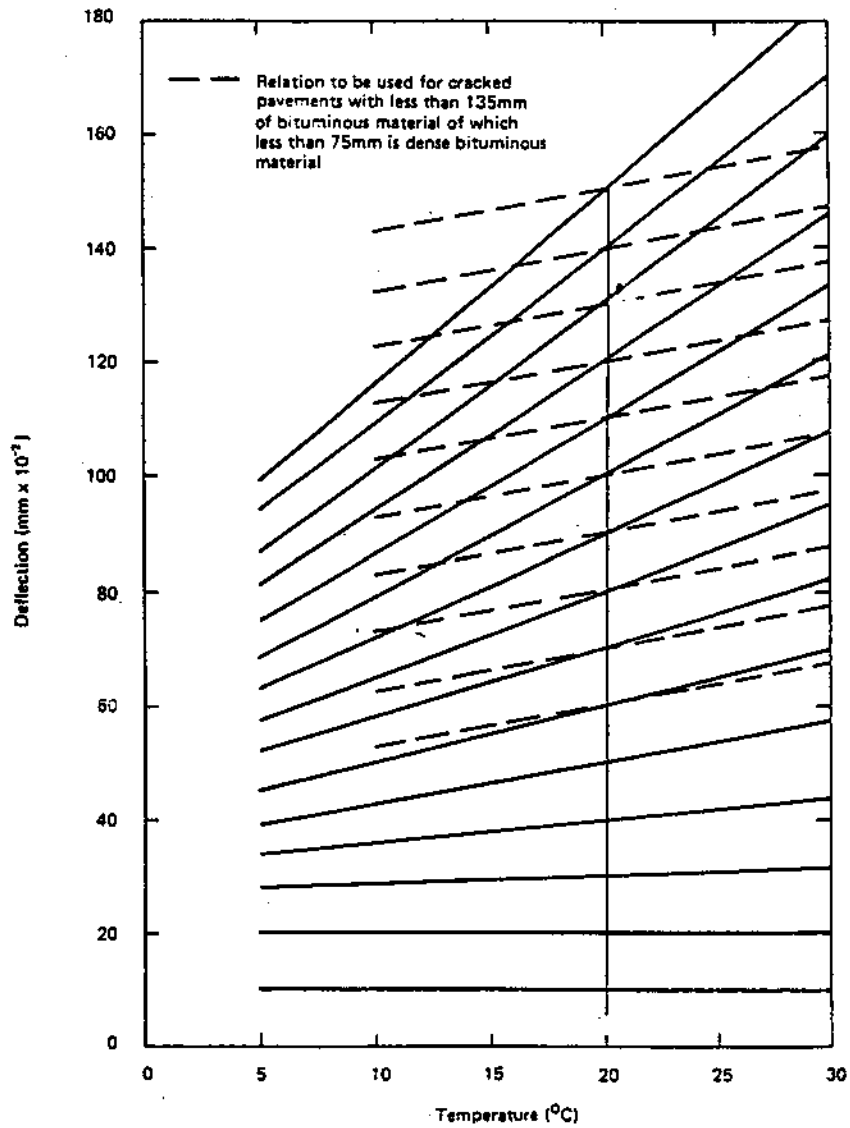
รูปที่ 3 Nomgraph สำหรับหาค่า Penetration Index ของแอสฟัลท์ (Ref.5)



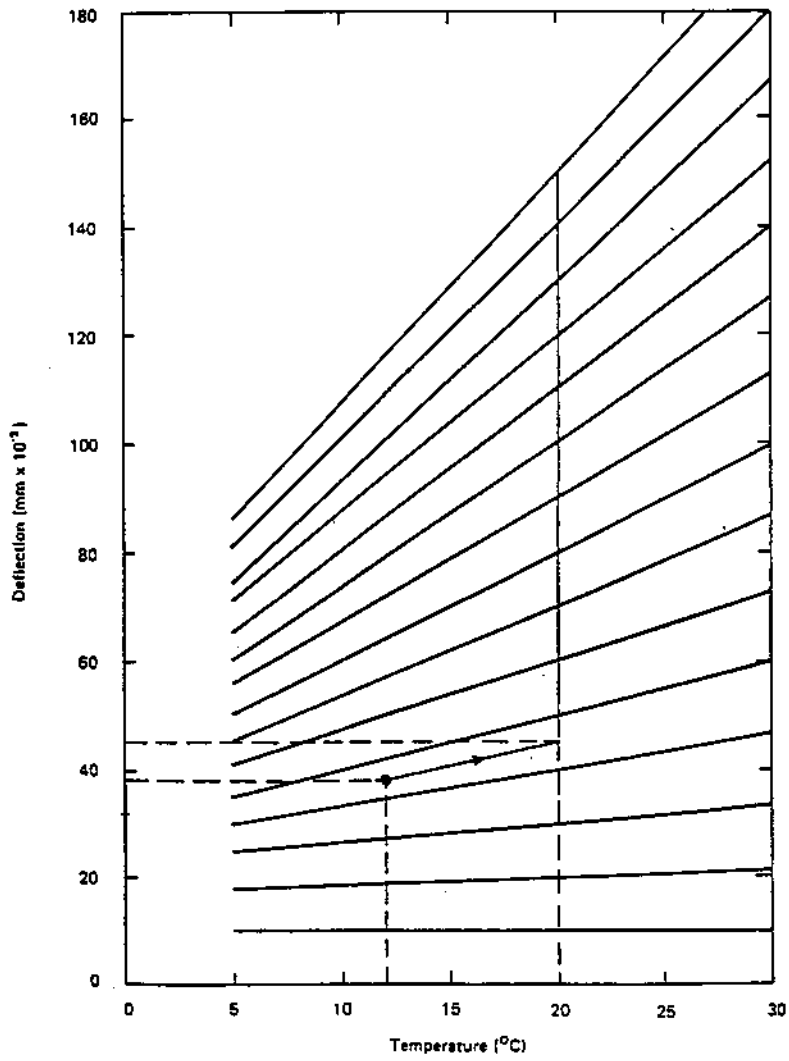
รูปที่ 4 Nomograph สำหรับหาค่าสติฟเนสของสารบิทูเมน (Ref.5)



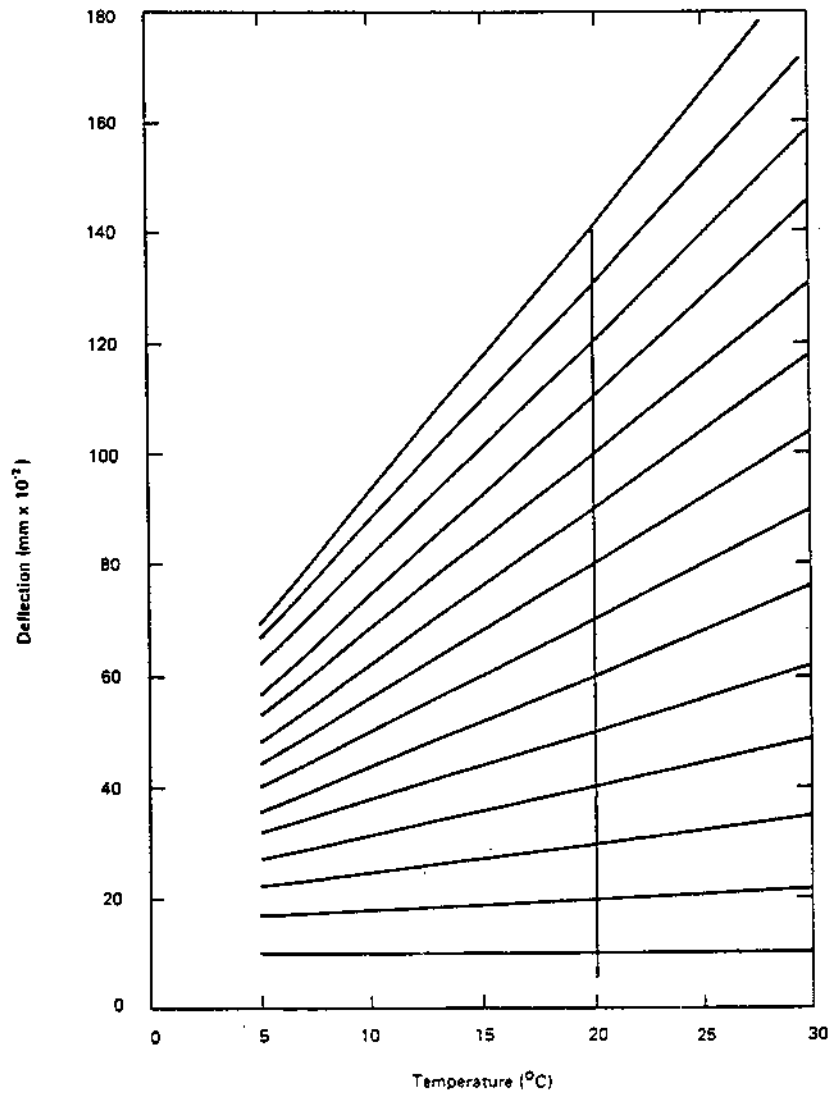
รูปที่ 5 แสดงค่า Stability ของแอสฟัลท์ติกคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ



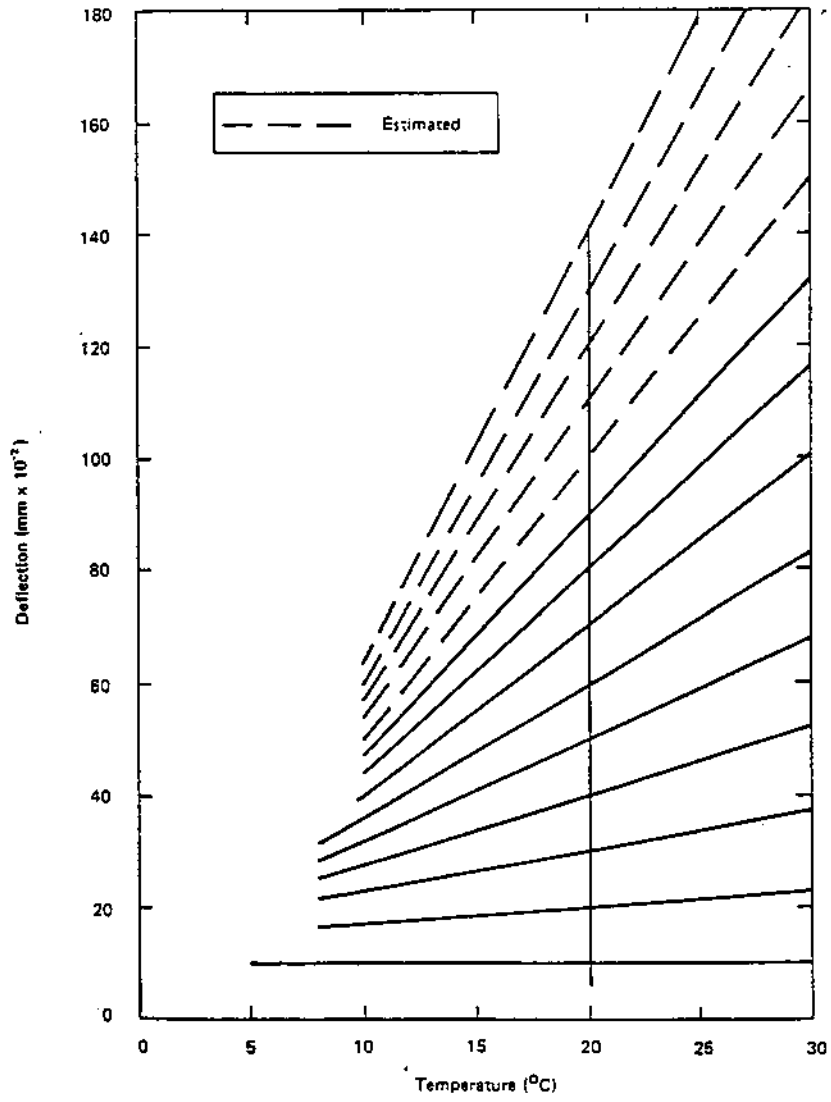
รูปที่ 8ก แสดงค่าแอมพลิจูดที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุบิตูเมนบางกว่า 135 มม. โดยมีชั้นวัสดุบิตูเมนแน่น บางกว่า 75 มม. (Ref.8)



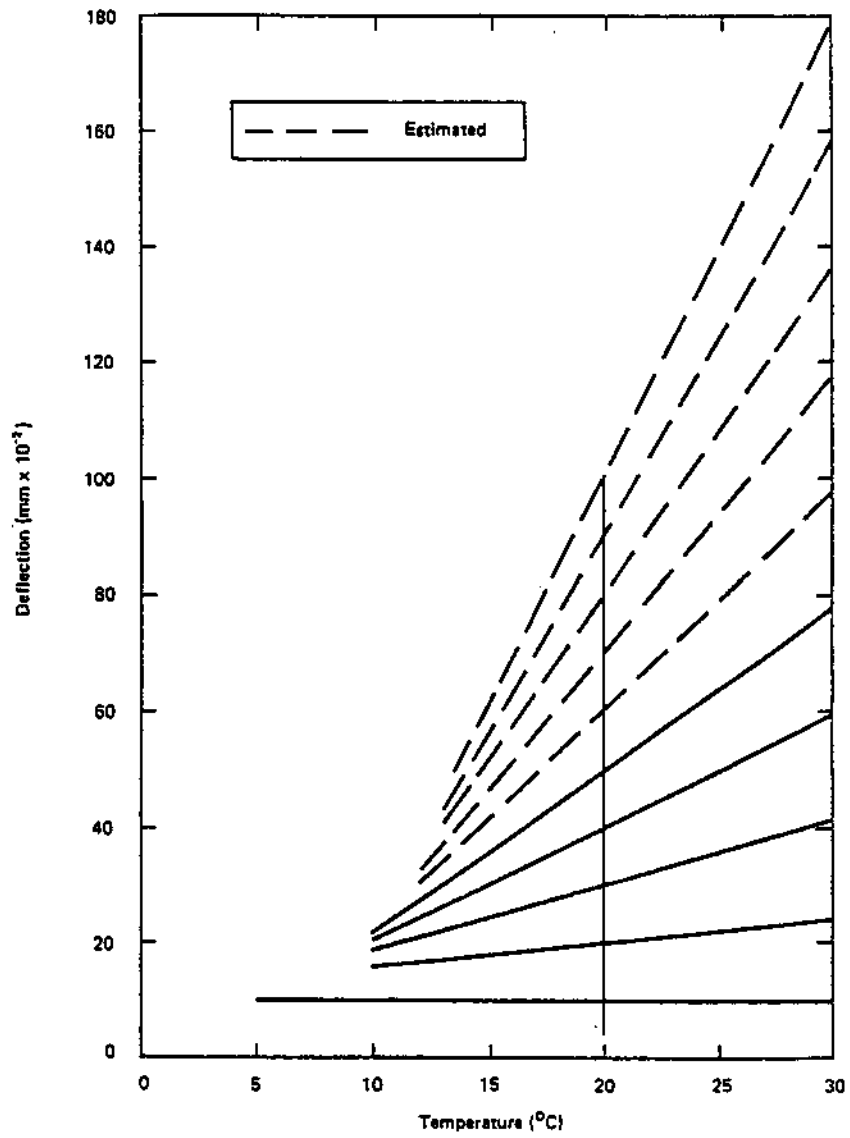
รูปที่ 6ข แสดงค่าอันตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุบิตูเมนหนา 135 - 195 มม. โดยมีชั้นวัสดุบิตูเมนแน่น บางกว่า 75 มม. (Ref.8)



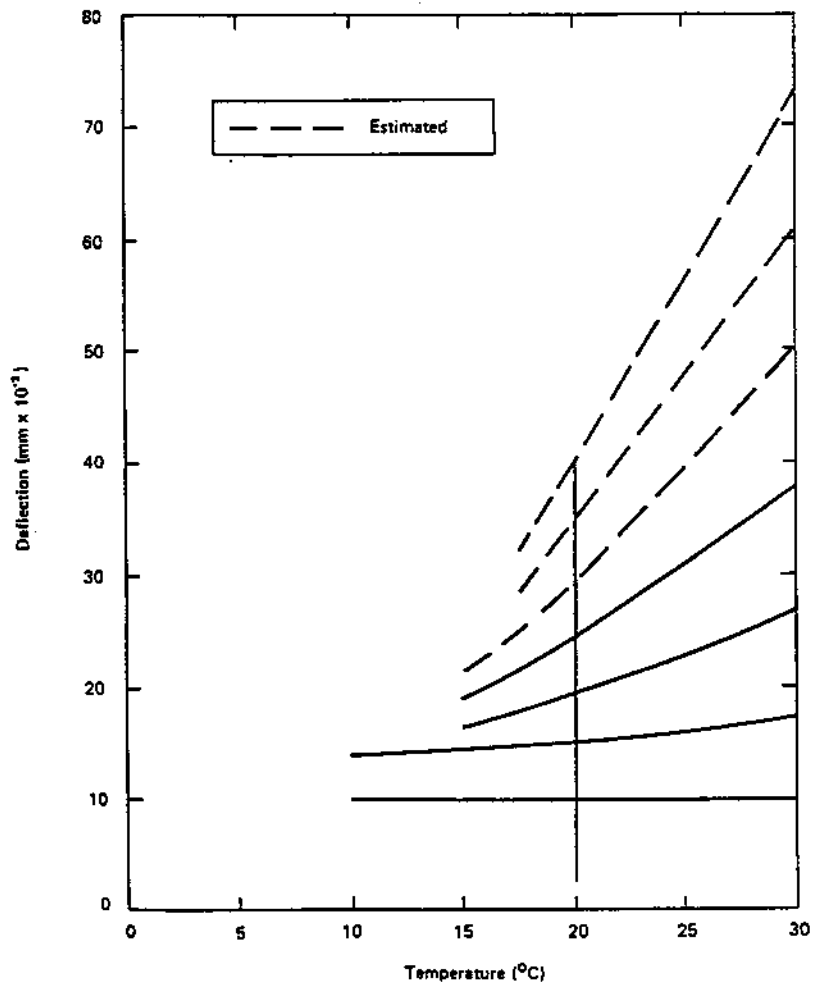
รูปที่ 6ค แสดงค่าแฉับตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุบิตูเมนหนา 75 - 195 มม. โดยมีชั้นวัสดุบิตูเมนแน่น หนากว่า 75 มม. (Ref.8)



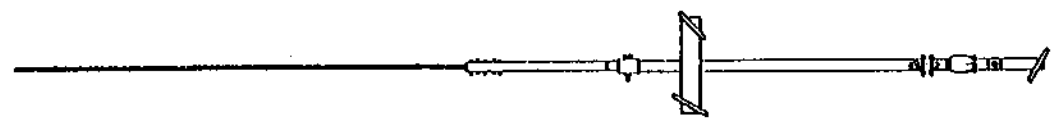
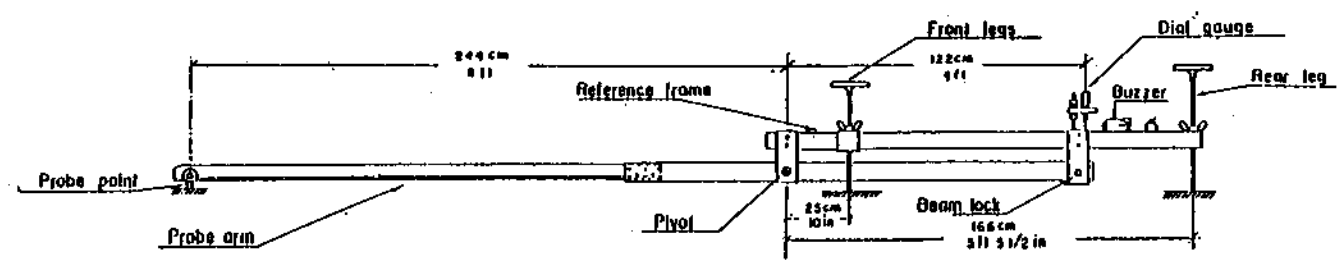
รูปที่ 6ง แสดงค่าอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุบิตูเมน  
หนา 195 - 274 มม. (Ref.8)



รูปที่ ๘๑ แสดงค่าแฉ่งตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุปิทูแมน  
หนา 275 - 324 มม. (Ref.8)

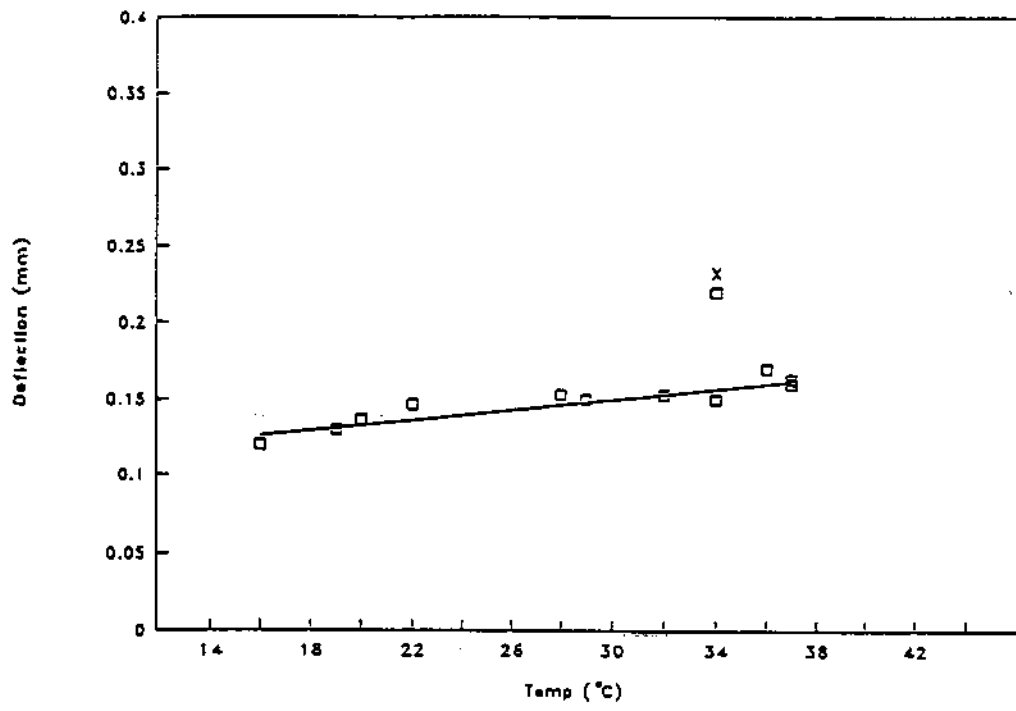


รูปที่ 6จ แสดงค่าแฉับตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนนที่มีชั้นวัสดุผิวเมน  
หนากว่า 324 มม. (Ref.8)

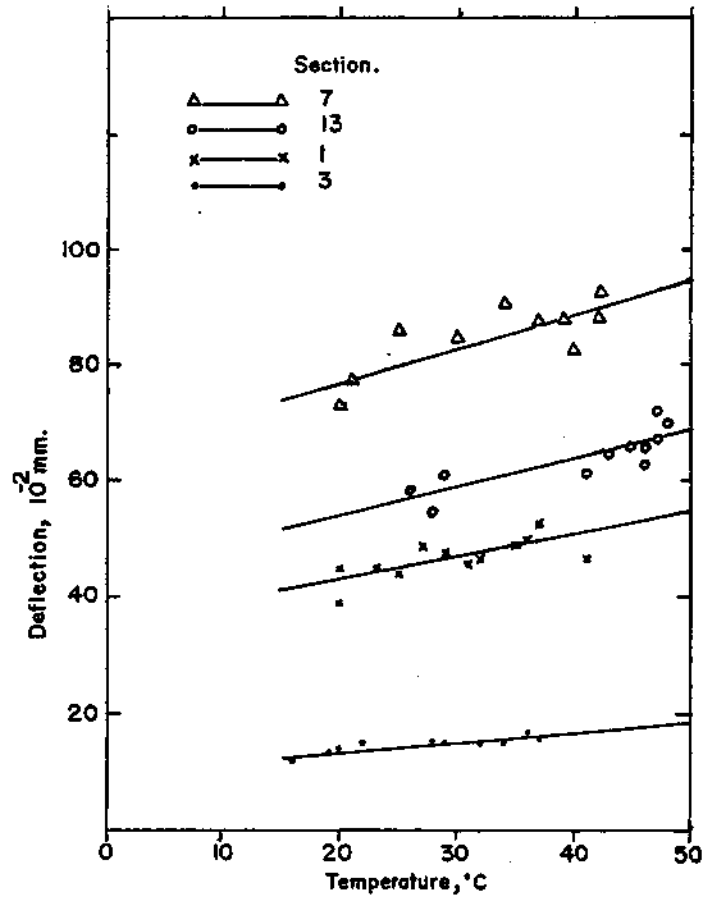


รูปที่ 7 แสดงรูปร่างและส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือ Benkelman Beam

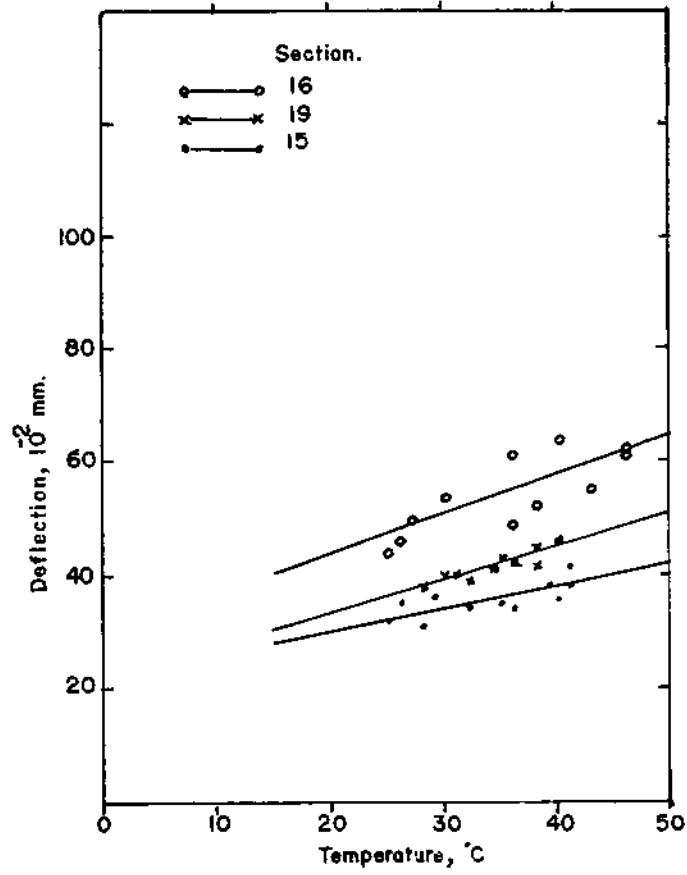




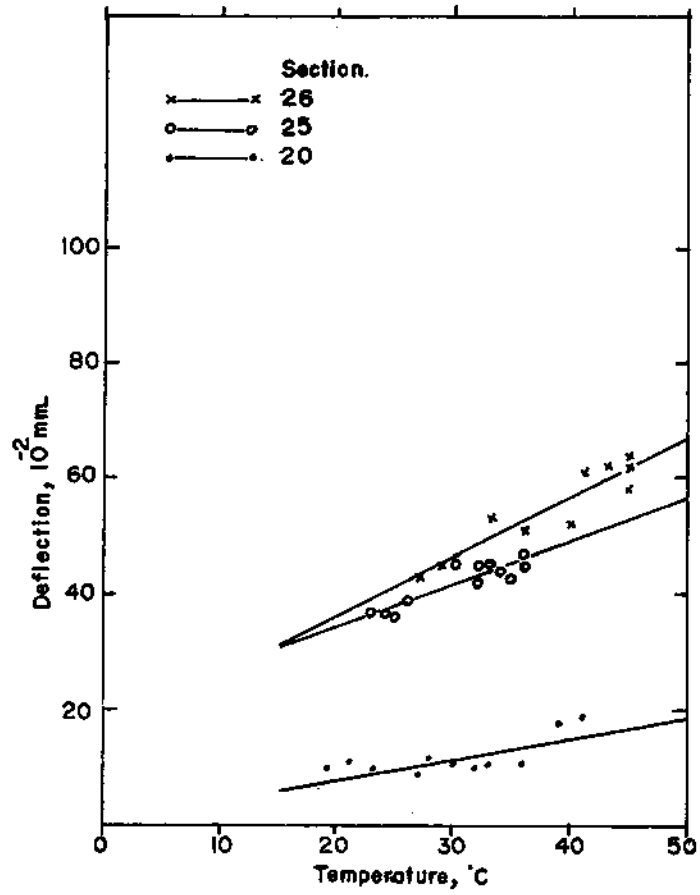
รูปที่ 9 แสดงค่าแอนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของถนน Test Section หมายเลข 3



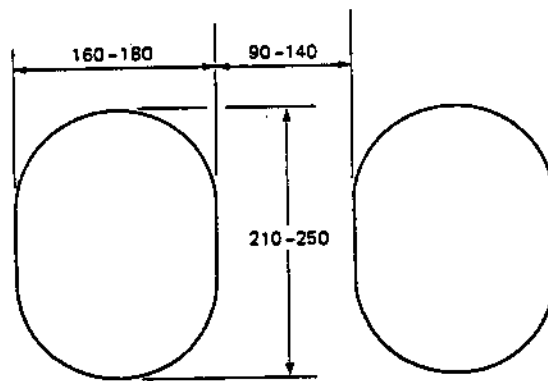
รูปที่ 10 ก แสดงค่าแอมป์ตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนน  
ที่มีชั้นวัสดุบิตูเมนหนา 5.0 ซม.



รูปที่ 10 ข แสดงค่าแฉับตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนน  
ที่มีชั้นวัสดุผิวเมนหนา 8.0 ซม.



รูปที่ 10 ค แสดงค่าอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของถนน  
ที่มีชั้นวัสดุผิวหนา 8.5 - 12.0 ซม.



รูปที่ 11 แสดงขนาดและรูปร่างสัมพัทธ์พื้นถนนของยางคู่หลัง  
ของรถบรรทุกน้ำหนักที่ใช้ สำหรับการทดลองวัดค่าแอนตัว  
ด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam (Ref.9)

**รายงานฉบับที่ :** วพ. 153 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

**ผู้เขียน :** ประสิทธิ์ ภูประทุม, แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์

**เรื่อง :** แผนภูมิแก้ไขค่าอ่อนตัวเนื่องจากอุณหภูมิถนน

**บทคัดย่อ :** ความคลาดเคลื่อนที่สำคัญประการหนึ่งของการวัดค่าอ่อนตัว ที่มักจะเกิดขึ้นควบคู่กับการวัดค่าอ่อนตัวของถนนด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam ก็คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของถนน การแก้ไขผิดพลาดดังกล่าว ทำให้โดยการทดลองและวิจัยเพื่อศึกษาให้ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอ่อนตัวของถนน เพื่อนำไปแก้ไขความคลาดเคลื่อนดังกล่าว และเพื่อความสะดวกและประโยชน์สูงสุดต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ จึงควรจัดทำเป็นแผนภูมิ (Chart) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและค่าอ่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของถนน ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า “แผนภูมิสำหรับแก้ไขค่าอ่อนตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Correction Chart for Pavement Deflection) ของถนน” ในการทดลองและวิจัยครั้งนี้ ก็ได้ทำการศึกษา ทดลอง และจัดทำแผนภูมิดังกล่าวขึ้น ตามความหนาของชั้นผิวทางของถนน ซึ่งก่อสร้างด้วยวัสดุบิตูเมน (Bituminous Materials) ที่มีความหนา 5.0, 8.0 และ 8.5-12.0 ซม. รวมทั้งหมด 3 ชุดด้วยกัน เพื่อใช้สำหรับนำไปแก้ไขความคลาดเคลื่อนของค่าอ่อนตัวที่วัดได้เนื่องจากอุณหภูมิของถนน ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยสืบไป

**ศัพท์เฉพาะเรื่อง :** สารบิตูเมน, วัสดุบิตูเมน, สติฟเนส, ค่าอ่อนตัวของถนน, อุณหภูมิของถนน

ทล. วพ./ค/2539/ท.

ISSN 0125-8044

- Report No.** : RD 153 Road Research and Development Center, Department of Highways.
- Author** : Prasit Phupratum, Sangchai Tepsittrakorn.
- Title** : Temperature Correction Chart of Pavement Deflection.
- Abstract** : One of the essential error in measuring pavement deflection is caused by the temperature changing of pavement. To avoided this error, we need to studies the influence of pavement temperature on the pavement deflection during testing proude and find out their correlation. And for the most convenience in field practice, we set up the correlative chart between the pavement deflection and pavement temperature for correct the deflection error caused by temperature of pavement, called "Temperature Correction Chart of Pavement Deflection" This report, we test and study about their correlation and set up into 3 groups of "Temperature Correction Chart" of pavement containing 5.0 cm. and 8.5 cm. and 8.5-12.0 cm. of bituminous material layers for correction the deflection error of pavement caused by remperature in Thailand.
- Keywords** : Bitumen, Bituminous Materials, Stiffness, pavement Deflection, Pavement Temperature.

**DH RD/S/1996/T**  
**ISSN 0125-8044**

**คณะกรรมการบริหาร  
ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง**

1. รองอธิบดีฝ่ายวิชาการ	ประธานกรรมการ
2. ผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ	กรรมการ
3. ผู้อำนวยการสำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง	กรรมการ
4. ผู้อำนวยการกองบำรุง	กรรมการ
5. ผู้อำนวยการกองวิศวกรรมจราจร	กรรมการ
6. ผู้อำนวยการสำนักเครื่องกลและสื่อสาร	กรรมการ
7. นายสุนทร กังวานพณิชย์	กรรมการ
8. นายอร่าม ก้อนสมบัติ	กรรมการ
9. นายธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์	กรรมการและเลขานุการ