

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

นางสาวศิริลักษณ์ จักรเพชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้พร้อมทั้งเอกสารประกอบที่เข้าด้วยกันในคลังปัญญา (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย



The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A STUDY OF TEMPERATURE AND HUMIDITY EFFECTS ON  
ASPHALTIC CONCRETE BEHAVIOUR

Miss Sirilak Jakpet

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต
โดย	นางสาวศิริลักษณ์ จักรเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

ศิริลักษณ์ จักรเพชร : การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมของวัสดุ  
แอสฟัลติกคอนกรีต. (A STUDY OF TEMPERATURE AND HUMIDITY EFFECTS ON  
ASPHALTIC CONCRETE BEHAVIOUR)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 100 หน้า.

การเสื่อมสภาพของผิวทางลาดยางก่อนเวลาอันควรนั้นอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมหรือสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น การที่ผิวทางเกิดแตกร้าวนั้นเนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำลงในฤดูหนาว หรือผิวทางเกิดการเยิ้มเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในฤดูร้อน ทำให้ผิวทางไม่สามารถทนทานต่อการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรจรต่อไปได้ ผิวทางในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่เป็นผิวทางลาดยาง การเสื่อมสภาพของผิวทางส่วนใหญ่จึงเกิดจากการแตกร้าวน และการเสื่อยรูอย่างถาวรอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญ แต่การออกแบบถนนลาดยางในปัจจุบันยังไม่ได้มีการคำนึงถึงปัจจัยหลักสองข้อนี้เท่าที่ควรเลย ยังคงใช้วิธีเดิมในการออกแบบอยู่คือการออกแบบเชิงประสบการณ์ อาจไม่ครอบคลุมเงื่อนไขและสภาพการใช้งานในปัจจุบันได้ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จึงต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงฐานข้อมูลเชิงพฤติกรรมของวัสดุผิวทาง และดำเนินการทดสอบหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทาง ให้ครอบคลุมถึงเงื่อนไขสภาพการใช้งานจริงในปัจจุบัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และชนิดของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง เพื่อไปผนวกกับวิธีการออกแบบเดิมที่มีอยู่ แล้วนำมาปรับปรุงความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ ตลอดจนค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุสำหรับใช้ในการออกแบบการใช้งานของผิวทางได้ ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเลือกศึกษาพฤติกรรมเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดแน่นแบบผสมร้อน ทำการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล และการศึกษาถึงอิทธิพลของเกรดแอสฟัลต์ AC 40/50 AC 60/70 และ AC80/100 ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา.....2556.....

# # 5270802021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: ASPHALTIC CONCRETE / MOISTURE DAMAGE / FATIGUE TEST

PERMANENT DEFORMATION / RESILIENT MODULUS / INDIRECT TENSILE TEST

SIRILAK JAKPET: A STUDY OF TEMPERATURE AND HUMIDITY EFFECTS ON  
ASPHALTIC CONCRETE BEHAVIOUR.

ADVISOR: ASSOC.PROF. SUCHED LIKITLURSUANG, Ph.D., 100 pp.

Premature deterioration of asphalt pavements is due to environmental or climate change such as, low temperature cracking and bleeding. This can cause pavements to become damaged from traffic loading. Asphaltic concrete is the main option to construct roads in Thailand. Most of the deterioration of asphalt pavements was caused by the changes in the temperature and moisture. Thus, this leads to rutting and permanent deformation of asphalt. In design, the empirical method is being used but effects due to climate change and weather is still not being considered. The database of material properties should be improved and testing under the condition of actual case such as temperature, moisture and materials parameter must be included. The main focus of this research was about the hot mixed asphalt pavements together with its deformation behavior. Marshall mixed design method was used with AC40/50, AC60/70 and AC80/100 binders.

Department:..... Civil Engineering .....

Student's Signature .....

Field of Study:..... Civil Engineering .....

Advisor's Signature.....

Academic Year:..... 2013 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐุ์ ลิขิตเลอสรวง เป็นอย่างมาก ที่ให้การสั่งสอน แนะนำ และดูแลเป็นอย่างดี ท่านอาจารย์ทุกท่าน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ แก้ไขปัญหา และให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้บุคคลที่จะกล่าวถึงในพระคุณของท่านก็คือ บิดา มารดา และพี่น้องผู้ซึ่งเปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือ สนับสนุนทางด้านเงินทุน ค่าเล่าเรียน จนกระทั่งข้าพเจ้าประสบความสำเร็จจนบัดนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โครงสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแบบยืดหยุ่น.....	6
2.2 แอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อน.....	7
2.3 พฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	9
2.4 ความเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	10
2.5 ระบบซูเปอร์เพฟ.....	13
2.6 การทดสอบแอสฟัลติกคอนกรีต.....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3. การติดตั้งอุปกรณ์ภาคสนาม.....	31
3.1 พื้นที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวทาง.....	31
3.2 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทาง.....	34
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและผิวทาง.....	36
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างแบบถดถอย.....	42
บทที่ 4. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	45
4.1 ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	45
4.2 เครื่องบดอัดแอสฟัลติกคอนกรีตไจราทอวีในระบบซูเปอร์เพฟ.....	47

	หน้า
4.3 เงื่อนไขในการทดสอบ.....	50
4.4 การทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine AMSLER.....	51
4.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM).....	52
4.6 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	54
4.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม.....	55
4.8 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	56
4.9 การทดสอบความต้านทานความล้า.....	57
บทที่ 5. ผลการทดสอบ.....	59
5.1 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต .....	69
5.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม .....	65
5.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	67
5.4 การทดสอบความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	68
บทที่ 6. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	71
6.1 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	71
6.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม.....	73
6.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	74
6.4 การทดสอบความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	75
6.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต	75
6.6 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	เกรดสมรรถภาพของตัวเชื่อมประสานประเภทแอสฟัลต์..... 14
ตารางที่ 2.2	ตารางสมการความสัมพันธ์ของการล้าหรือแบบจำลองการล้า (fatigue model) ที่ถูกพัฒนาโดยองค์กรต่างๆ (pavement engineering, 2009)..... 26
ตารางที่ 3.1	ตารางพื้นที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวทาง ณ จังหวัดตัวแทนต่างๆ.. 31
ตารางที่ 3.2	ค่าอุณหภูมิวิกฤต และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนในแต่ละภาคในระยะเวลา 3 ปี (พ.ศ. 2534 – 2536)..... 37
ตารางที่ 3.3	อุณหภูมิของประเทศไทยเฉลี่ย 23 ปี (พ.ศ.2530- 2553)..... 38
ตารางที่ 3.4	ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยสำหรับอุณหภูมิผิวทางสูงสุด..... 43
ตารางที่ 3.5	การวิเคราะห์ถดถอยที่ระดับนัยสำคัญสำหรับอุณหภูมิผิวทางสูงสุด..... 43
ตารางที่ 3.6	ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยสำหรับอุณหภูมิผิวทางต่ำสุด..... 44
ตารางที่ 3.7	การวิเคราะห์ถดถอยที่ระดับนัยสำคัญสำหรับอุณหภูมิผิวทางต่ำสุด..... 44
ตารางที่ 4.1	ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล..... 47
ตารางที่ 4.2	ปริมาณชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม..... 47
ตารางที่ 4.3	ตารางสรุปการทดสอบและเงื่อนไขการทดสอบ..... 51
ตารางที่ 5.1	ตารางผลการทดสอบค่าการยุบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต..... 64
ตารางที่ 5.2	ตารางผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจากแช่น้ำอุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ..... 66
ตารางที่ 5.3	ตารางผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต โดยที่ไม่ได้แช่น้ำแต่ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ..... 66
ตารางที่ 5.4	ตารางผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจากแช่น้ำอุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 67

ตารางที่ 5.5	ตารางผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจาก แช่น้ำอุณหภูมิ 10 และ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	70
ตารางที่ 6.1	ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	73
ตารางที่ 6.2	เปรียบเทียบค่า Retaining Strength Index (RSI) ระหว่างแช่น้ำกับไม่แช่น้ำ	73
ตารางที่ 6.3	ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต ภายหลังจากแช่น้ำอุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของงานวิจัยนี้กับ งานวิจัยอื่น.....	74

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยรายปีของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494-2551.....	2
รูปที่ 1.2	อุณหภูมิเฉลี่ยของโลก ตั้งแต่ พ.ศ.2423- 2552 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย พ.ศ. 2444-2543.....	2
รูปที่ 2.1	โครงสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแบบยึดหยุ่น.....	6
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อน.....	8
รูปที่ 2.3	การเกิดการเยิ้ม น้ำของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต.....	12
รูปที่ 2.4	การแตกร้าวของแอสฟัลติกคอนกรีตเนื่องจากความล้า.....	12
รูปที่ 2.5	การเกิดการหลุดตัวเป็นร่องล้อของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	12
รูปที่ 2.6	การแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ.....	13
รูปที่ 2.7	ลักษณะรูปแบบการให้แรงกระทำซ้ำแบบ haversine loading.....	18
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรกับจำนวนครั้งของ แรงกระทำ.....	19
รูปที่ 2.9	ความหมายของค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	20
รูปที่ 2.10	ลักษณะการให้แรงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างและลักษณะการวิบัติ จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	21
รูปที่ 2.11	แสดงลักษณะการกระจายของ Tensile stress และ Compression Stress ในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test.....	22
รูปที่ 2.12	ลักษณะความสัมพันธ์ของแรง (load) และ การเสียรูป (deformation) กับ เวลาของการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	24
รูปที่ 3.1	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัด พะเยา.....	32
รูปที่ 3.2	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัด ปทุมธานี.....	32

รูปที่ 3.4	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัด อ่างทอง.....	33
รูปที่ 3.5	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัด สงขลา.....	34
รูปที่ 3.6	แสดงตัวอย่างลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและอากาศ.....	35
รูปที่ 3.7	อุปกรณ์ภายในตู้เก็บข้อมูล.....	35
รูปที่ 3.8	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2534.....	39
รูปที่ 3.9	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2534.....	39
รูปที่ 3.10	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2534.....	39
รูปที่ 3.11	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2534.....	39
รูปที่ 3.12	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2535.....	40
รูปที่ 3.13	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2535.....	40
รูปที่ 3.14	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2535.....	40
รูปที่ 3.15	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2535.....	40
รูปที่ 3.16	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2536.....	41
รูปที่ 3.17	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2536.....	41
รูปที่ 3.18	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2536.....	41
รูปที่ 3.19	แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2536.....	41
รูปที่ 4.1	แสดงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 65 มม.....	45
รูปที่ 4.2	แสดงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 150 มม.....	46
รูปที่ 4.3	เครื่องบดอัดไจราทอรีในระบบชูปเปอร์เพฟ.....	48
รูปที่ 4.4	รูปแบบการบดอัดด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรี.....	49
รูปที่ 4.5	เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine AMSLER.....	52
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและความถี่ในการให้แรงของเครื่องทดสอบ UTM	53
รูปที่ 4.7	เครื่องทดสอบ universal testing machine ที่อยู่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	53
รูปที่ 4.8	แสดงการติดตั้งตัวอย่างเพื่อการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้าง	54

รูปที่ 4.9	การติดตั้งตัวอย่างเพื่อให้ในการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม...	55
รูปที่ 4.10	การติดตั้งตัวอย่างเพื่อให้ในการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	56
รูปที่ 4.11	แสดงรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์.....	57
รูปที่ 5.1	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50.....	60
รูปที่ 5.2	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70.....	60
รูปที่ 5.3	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 .....	61
รูปที่ 5.4	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	61
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	62
รูปที่ 5.6	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	62
รูปที่ 5.7	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	63
รูปที่ 5.8	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	63

รูปที่ 5.9	ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ .....	64
รูปที่ 5.10	ลักษณะตัวอย่างเมื่อเกิดการวิบัติแบบการยุบตัวถาวร.....	65
รูปที่ 5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึงกับจำนวนครั้งที่กระทำในการทดสอบความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 10 °C.....	68
รูปที่ 5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึง กับจำนวนครั้งที่กระทำในการทดสอบความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 25 °C.....	69
รูปที่ 6.1	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรงกระทำของการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตแบบแห้งและการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้น 40°C ....	72
รูปที่ 6.2	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรงกระทำของการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตแบบแห้งและการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้น 50°C ....	72

## บทที่ 1

### บทนำ

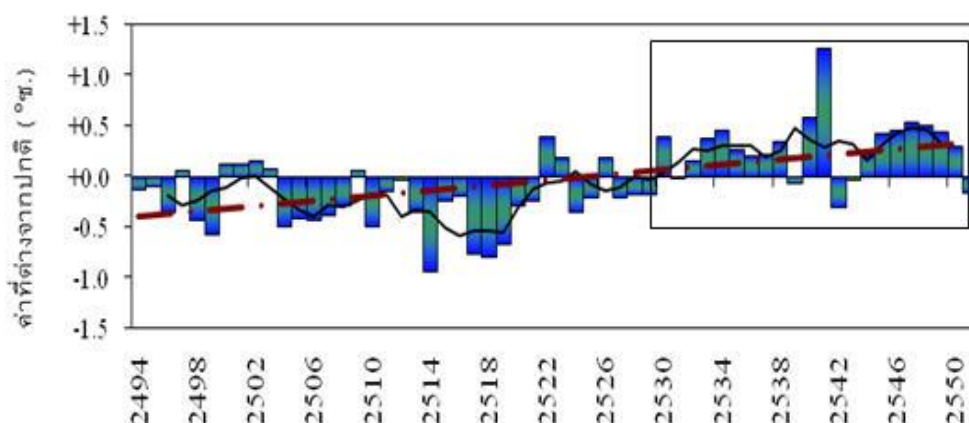
#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเสื่อมสภาพของผิวทางลาดยางก่อนเวลาอันควรนั้นอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน สาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ผิวทางเกิดการชำรุดเสียหายได้ง่ายคือ เกิดจากสภาวะแวดล้อมหรือสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น การที่ผิวทางเกิดแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำลงในฤดูหนาว (low temperature cracking) หรือผิวทางเกิดการเยิ้ม (bleeding) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในฤดูร้อน ความเสียหายเหล่านี้เองที่เป็นสาเหตุทำให้ผิวทางไม่สามารถทนทานต่อการรับน้ำหนักบรรทุกจราจรต่อไปได้

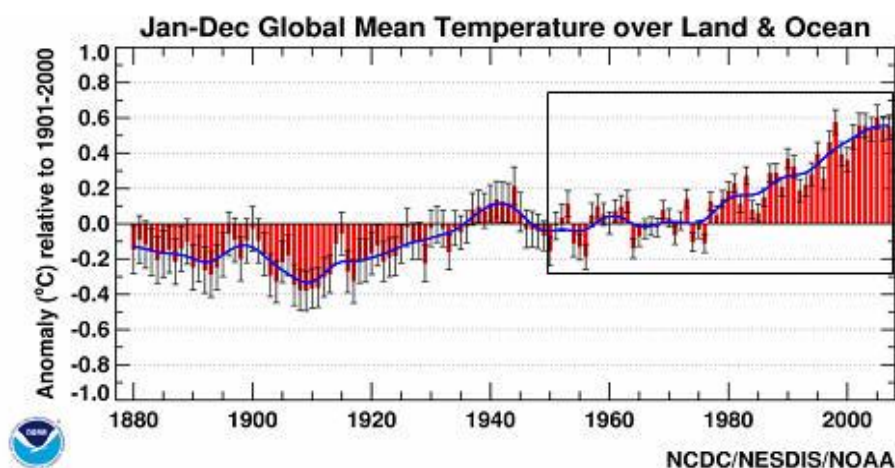
ผิวทางในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นผิวทางลาดยางแบบยืดหยุ่น (flexible pavement) การเสื่อมสภาพของผิวทางส่วนใหญ่จึงเกิดจากการแตกร้าว และการเสียรูปอย่างถาวร อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญ แต่การออกแบบถนนลาดยางในปัจจุบันยังไม่ได้มีการคำนึงถึงปัจจัยหลักสองข้อนี้เท่าที่ควรเลย ประกอบกับการที่ประเทศไทยมีหลายภูมิภาค และแต่ละภูมิภาคจะมีสภาพภูมิประเทศต่างกันไป เช่น บางส่วนเป็นภูเขา บางส่วนติดกับทะเล จึงทำให้ได้รับอิทธิพลจากความร้อน ความชื้นและกระแสลมที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาพบว่าสภาพภูมิอากาศของโลกเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าค่าเฉลี่ยปกตินับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 เป็นต้นมา และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในประเทศไทยและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกยังเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ 1.2

ถนนของประเทศไทยในปัจจุบันที่ยังคงใช้วิธีเดิมในการออกแบบอยู่คือการออกแบบเชิงประสบการณ์ (empirical design) อาจไม่ครอบคลุมเงื่อนไขและสภาพการใช้งานในปัจจุบันได้ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น ความร้อนของผิวทางที่เพิ่มสูงขึ้นในแต่ละปี โดยสูงขึ้นจนกระทั่งมากกว่า  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในตอนกลางวันของเดือนเมษายนในบางจังหวัด (รายงานวิจัยกรมทางหลวง, 2539) หรือปริมาณความเข้มข้นของน้ำฝนรายชั่วโมงที่เพิ่มขึ้นในฤดูฝน



รูปที่ 1.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยรายปีของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494-2551  
(กรมอุตุนิยมวิทยา, 2552)



รูปที่ 1.2 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลก ตั้งแต่ พ.ศ.2423- 2552 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย พ.ศ. 2444- 2543  
([www.metoffice.gov.uk](http://www.metoffice.gov.uk))

เมื่อปริมาณน้ำฝนและความชื้นที่ขังอยู่บนผิวทางสูงขึ้น ทางเลือกที่จะหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าว นั่นคือ การพัฒนาและปรับปรุงฐานข้อมูลเชิงพฤติกรรมของวัสดุผิวทาง และดำเนินการทดสอบหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทาง ให้ครอบคลุมถึงเงื่อนไขสภาพการใช้งานจริงในปัจจุบัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และชนิดของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง จากนั้นนำฐานข้อมูลดังกล่าวไป



ผนวกกับวิธีการออกแบบเดิมที่มีอยู่ เพื่อที่จะปรับปรุงความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ ตลอดจนค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุสำหรับใช้ในการออกแบบการใช้งานของผิวทาง

ดังนั้นการศึกษาหาพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นจริงของแต่ละพื้นที่ อาจนำไปสู่การออกแบบผิวทางที่เหมาะสมตามพื้นที่แต่ละภูมิภาคของประเทศไทยได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางตามเกรดแอสฟัลต์ชนิดต่างๆ และพฤติกรรมการเสียหายของผิวทางที่ขึ้นกับปัจจัยอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการของเกรดแอสฟัลต์ AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของผิวทางให้ครอบคลุมหลายพื้นที่ในประเทศไทย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะความเสียหายที่เกิดกับผิวทางแบบยืดหยุ่น โดยอาศัยกระบวนการวิจัย 3 ส่วน คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การเก็บข้อมูลอากาศกรมอุตุนิยมวิทยา และทดสอบภาคสนามซึ่งเป็นการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทาง

1.3.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเลือกศึกษาพฤติกรรมเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีต ชนิดแน่นแบบผสมร้อน ทำการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานงานทางที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทย และการศึกษาถึงอิทธิผลของเกรดแอสฟัลต์ที่ใช้เป็นวัตถุประสงค์เชื่อมประสานอีกด้วย โดยจะทำการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Permanent Deformation Test)
- 2) การทดสอบหาค่าแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Static Indirect Tensile Test)
- 3) การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวด้วยวิธีแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)
- 4) การทดสอบการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Fatigue Test)

1.3.2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศและความชื้นจากกรมอุตุนิยมวิทยาย้อนหลังตั้งตั้งแต่ปี 2534 ถึงปัจจุบัน

1.3.3 ภาคสนามจะใช้อุปกรณ์การตรวจวัดแบบอัตโนมัติ เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในชั้นผิวทางให้ครอบคลุมสภาพภูมิอากาศทั่วประเทศไทยโดยทำการติดตั้งในจังหวัดตัวแทน คือ ปทุมธานี อ่างทอง สกลนคร สงขลา และพะเยา

#### 1.4 วิธีที่จะดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบภาคสนาม และการสรุปผลการทดสอบ ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล เป็นการค้นคว้าเก็บข้อมูลถึงงานวิจัยที่ผ่านมา และขั้นตอนการปฏิบัติงานทดสอบเพื่อช่วยในการวางแผนงานทดสอบ และวางโครงร่างวิทยานิพนธ์

2) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดสอบวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งประกอบไปด้วย การใช้ตัวเชื่อมประสานเกรด AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 โดยนำมาทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติด้านความแข็งแรง และการทดสอบเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างผิวทาง

3) การทดสอบภาคสนาม เป็นการนำเอาเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทาง อุณหภูมิอากาศ และค่าความชื้นไปติดตั้งยังจังหวัดปทุมธานี อ่างทอง สกลนคร พะเยา และสงขลา เพื่อหาค่าอุณหภูมิผิวทาง อุณหภูมิอากาศ และค่าความชื้นที่เกิดขึ้นจริง ในแต่ละภูมิภาคต่างๆ เพื่อนำมาเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบผิวทางโดยใช้ระบบซูเปอร์เพพ

4) การสรุปผลการทดสอบ เป็นการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมาถึงความถูกต้องและความเป็นไปได้ของข้อมูลกับผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีการพัฒนาแนวทางการวิจัยต่อไปได้ในอนาคต

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบความสัมพันธ์ของสภาพอากาศกับอุณหภูมิและความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสียหายของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตในประเทศไทย

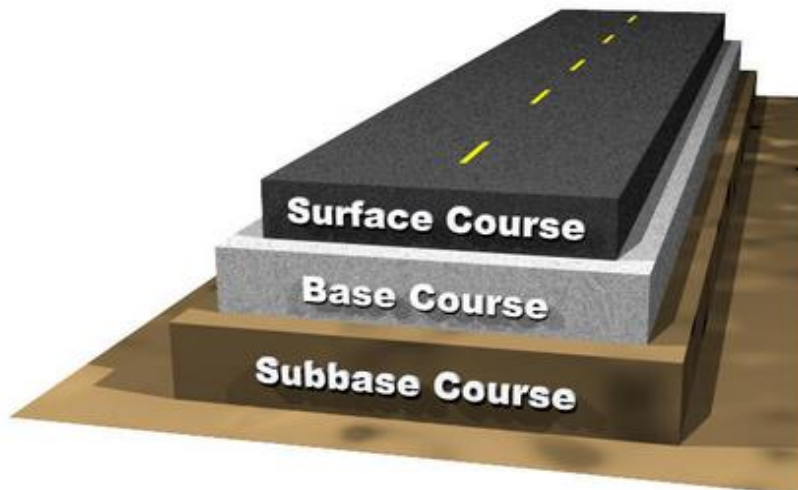
1.5.2 ทราบถึงคุณหม้ออกแบบค่าสูงและค่าต่ำของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตจากจังหวัดที่เป็นตัวแทนทั่วทุกภาคของประเทศไทย เพื่อเป็นตัวอย่งนำร่องในการออกแบบถนนลาดยางต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement Structure)

ผิวทางที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทยที่มักพบเห็นโดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีตและผิวทางแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยผิวทางชนิดแรกนั้นมีความนิยมใช้ในการก่อสร้างในประเทศไทยอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและมีความสะดวกในการก่อสร้างในพื้นที่ต่างๆ มากกว่า แต่ผิวทางชนิดที่สองที่ถึงจะมีความทนทาน แต่มีราคาแพงมากกว่า

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งโครงสร้างของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตนั้น เป็นลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะสามารถคืนตัวได้หลังจากที่มีการยุบตัวเมื่อรถแล่นผ่านไป แล้วมีลักษณะการถ่ายน้ำหนักลงไปเป็นชั้นๆ โดยชั้นบนสุดจะต้องเป็นชั้นที่รับน้ำหนักมากที่สุด แล้วถ่ายลงยังชั้นล่างต่อไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแบบยืดหยุ่น

โครงสร้างของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตมาตรฐานกรมทางหลวงประเทศไทยโดยทั่วไปจะยึดหลักการสำคัญในการก่อสร้างคือจะต้องมีความหนา รวมถึงความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน มีความสามารถป้องกันความชื้นที่จะซึมผ่านเข้าสู่โครงสร้างผิวทาง มีความเรียบเพียงพอ

และสามารถต่อต้านการสิ้นเปลือง การเบน หรือการสึกกร่อนเนื่องจากธรรมชาติได้ (การออกแบบผิวทาง, 2548)

โครงสร้างของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตส่วนใหญ่ในประเทศไทยประกอบไปด้วย

#### 2.1.1 ชั้นผิวทาง (Surface Course)

เป็นชั้นบนสุดของถนน ทำหน้าที่รับน้ำหนักที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะที่แล่นผ่านไปมา เป็นชั้นหลักที่ทำหน้าที่ลดและกระจายหน่วยแรงจากล้อรถ ชั้นนี้จะชั้นที่เป็นผิวทาง แอสฟัลติกคอนกรีต (hot mix asphalt) มีความหนาประมาณ 4 ถึง 10 ซม. ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและสภาพแวดล้อม

#### 2.1.2 ชั้นพื้นทาง (Base Course)

ชั้นพื้นทางเป็นชั้นรองรับอยู่ใต้ชั้นผิวทาง ทำหน้าที่ลดและกระจายหน่วยแรงจากล้อรถเช่นกัน ประกอบด้วยหินคลุก (crushed rock) หรือวัสดุที่มีคุณภาพดีเท่าหินคลุก โดยทั่วไปมีความหนาประมาณ 15 ถึง 30 ซม.

#### 2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course)

เป็นชั้นรองรับอยู่ใต้ชั้นพื้นทาง มีความเรียบสม่ำเสมอ ทำหน้าที่เป็นชั้นกรองระหว่างชั้นพื้นทางกับชั้นคันทาง ช่วยกระจายหน่วยแรงจากล้อยานพาหนะ ระบายน้ำ ป้องกันน้ำขังดินใต้ผิวทาง ส่วนวัสดุที่ใช้จะมีคุณภาพดีสูงกว่าชั้นพื้นทาง เช่น ดินลูกรังหรือกรวด (aggregate subbase) เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย โดยทั่วไปมีความหนาประมาณ 15 ถึง 30 ซม.

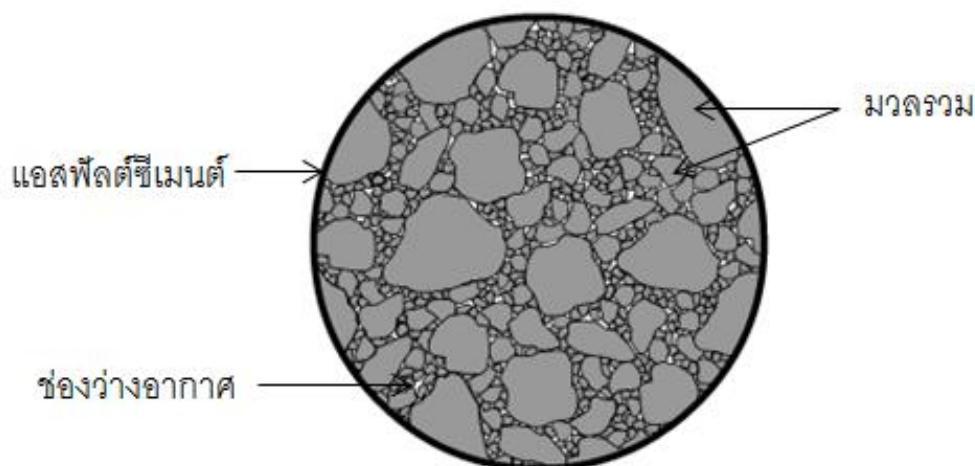
#### 2.1.4 ชั้นคันทาง (Compacted Subgrade)

เป็นส่วนบนสุดของชั้นดินเดิม ใช้วัสดุธรรมชาติที่คัดเลือกจากท้องถิ่นหรือบริเวณอื่น มาบดอัดให้แน่นตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 15 ถึง 45 ซม.

## 2.2 แอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อน

การผลิตแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อนจะผลิตโดยการให้ความร้อนสูงกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จนเป็นของเหลว แล้วนำมาผสมกับมวลรวมที่อุณหภูมิสูงในเครื่องผสม จากนั้นจึงนำไปปูเป็นผิวทางของถนนในขณะที่ส่วนผสมยังคงมีความร้อน บดทับให้แน่นและเรียบสม่ำเสมอ โดยส่วนใหญ่จะเพื่อนำมาใช้ในการปูลาดและบดอัดถนนที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่น ซึ่งการออกแบบแอสฟัลติกคอนกรีตผสมร้อนสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ในงานวิจัยในห้องปฏิบัติการฉบับนี้เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีมาร์แชลล์ (marshall method) ซึ่งเป็นวิธีการที่

ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยข้อดีของการออกแบบโดยวิธีนี้คือ สามารถเลือกใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดอย่างแท้จริงในส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีตได้ แอสฟัลติกคอนกรีตนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ มวลรวม และช่องว่างอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อน (hot mix asphaltic concrete)

### 2.2.1 ส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดผสมร้อน

#### 1) แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

ในขบวนการกลั่นน้ำมันดิบหรือการกลั่นแยกส่วนปิโตรเลียม นั้นจะมีผลิตภัณฑ์ออกมาหลายชนิดด้วยกันอันได้แก่ ก๊าซชนิดต่างๆ น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันโซล่า น้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน พาราฟิน และแอสฟัลต์ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ระเหยในขั้นตอนการกลั่นแยกส่วนนี้ แอสฟัลต์ที่ได้มานี้เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยปิทุเมนเป็นส่วนใหญ่ และเป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 มีสีน้ำตาลแก้มถึงสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แอสฟัลต์ซีเมนต์ยังมีคุณสมบัติในการยึดเกาะ กันน้ำซึมผ่าน ทนทานต่อการทำปฏิกิริยาของ กรด ด่าง และเกลือได้เป็นอย่างดี แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิปกติจะมีสถานะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง แต่จะมีสถานะเป็นของเหลวเมื่อมีอุณหภูมิสูง ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานวัสดุมวลรวมให้ติดกัน ชนิดของแอสฟัลต์โดยทั่วไปจะสามารถจำแนกได้โดยการวัดค่าการทดสอบการเจาะลึก (penetration) ค่าความหนืด (viscosity) และค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus)

## 2) มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมที่มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีตนั้น จะต้องมีคุณสมบัติคือ มีลักษณะคล้ายลูกบาศก์ มีขนาดคละดี มีความแข็งแรง ทนทาน มีผิวหยาบขรุขระ และจะต้องสามารถในการยึดเกาะกันกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดี โดยแบ่งแยกออกเป็น มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

- มวลรวมหยาบ (coarse aggregate) คือ มวลรวมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ โดยมีขนาดโตกว่า 4.75 มิลลิเมตร ขึ้นไป หรือค้ำบนตระแกรงเบอร์ 4 ซึ่งจะได้มาจากการม่หิน หรือกรวด ตั้งแต่ 2 ขนาดขึ้นไป โดยจะต้องเป็นหินที่สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก คือไม่มีดินเหนียว ดินตะกอน หรือสารอินทรีย์ใดๆผสมมาด้วย

- มวลรวมละเอียด (fine aggregate) คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 4.75 มม. และ 75 ไมครอน หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 200 โดยจะเป็นหินฝุ่นหรือหินทรายที่สะอาด

3) ช่องว่างอากาศ (Air voids) คือ ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างมวลรวมของแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งมีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ในส่วนผสมแอสฟัลต์ที่บดอัดแล้ว จะแสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรรวม โดยทั่วไปมีอยู่ประมาณร้อยละ 3-5 ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำหนักรวดยานที่แล่นบนผิวทาง โดยปริมาณช่องว่างอากาศนี้จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะเมื่อรูดยานแล่นผ่านไปมา ทำให้แอสฟัลติกคอนกรีตแน่นขึ้น มีปริมาตรช่องว่างอากาศน้อยลง นอกจากนั้นยังทำหน้าที่ในการรองรับการขยายตัวของ แอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อมีอากาศร้อนมากขึ้นอีกด้วย ปริมาตรช่องว่างอากาศนี้ถ้ามีมากเกินไปอาจทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำลงไปสู่ภายในชั้นของแอสฟัลติกคอนกรีตได้ง่าย และไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ แต่หากมีน้อยเกินไป ก็อาจทำให้เกิดการซึมทะลักขึ้นบนผิวการจราจรเมื่อแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิสูงได้เช่นกัน

## 2.3 พฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

แอสฟัลต์ซีเมนต์นั้นมีพฤติกรรมตามธรรมชาติโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและแรงที่กระทำเป็นสำคัญ ดังนั้นในการนำเอาแอสฟัลต์ซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างถนนในบริเวณพื้นที่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติในการใช้งานต่างกันไปด้วย

### 2.3.1 ที่อุณหภูมิสูง (High Temperature)

ในสภาวะที่แอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรืออากาศร้อน และได้รับแรงกระทำเป็นระยะเวลาสั้น เช่น ในบริเวณทะเลทรายที่มีรถวิ่งผ่านไปอย่างช้าๆ หรือจอดหยุดนิ่งเป็นเวลานาน แอสฟัลต์ที่มีพฤติกรรมเป็นของเหลวหนืดมากอยู่แล้วจะมีสภาพเป็นของไหล ซึ่งมีเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้น มันก็จะไหลไปไม่สามารถทำหน้าที่ยึดเกาะมวลรวมเข้าด้วยกัน

### 2.3.2 ที่อุณหภูมิปานกลาง (Medium Temperature)

เป็นช่วงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างร้อนมาก กับหนาวมาก จะเป็นคุณสมบัติคล้ายทั้งของเหลวหนืดและของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ทำวัสดุผิวทาง คือจะทำตัวเป็นกาวเคลือบยึดมวลรวมเข้าด้วยกัน

### 2.3.3 ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature)

ในสภาวะที่อากาศเย็น เช่น ในฤดูหนาว หรือการที่ยวดยานมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว แอสฟัลต์จะมีพฤติกรรมของของแข็งยืดหยุ่น คล้ายก้อนยาง โดยจะเสียรูปเมื่อน้ำหนักมากระทำ และคืนรูปเมื่อไม่มีน้ำหนักมากระทำแล้ว หากแต่เมื่อได้รับน้ำหนักเกินค่ากำลังที่รับได้ ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าว ไม่สามารถคืนรูปได้ โดยลักษณะนี้จะสามารถพบเห็นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำ

## 2.4 ความเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีต

ความเสียหายของผิวทางเกิดได้เนื่องจากหลายสาเหตุ โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดคือปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุกของยวดยาน สภาพดินฟ้าอากาศและลักษณะการออกแบบและควบคุมงานก่อสร้าง เป็นหลัก ซึ่งลักษณะความเสียหายของผิวทางที่เกิดขึ้นในประเทศไทยนั้นมีหลายแบบด้วยกันที่สามารถพบเห็นได้บ่อย ได้แก่

### 2.4.1 การเกิดการเอิ่มน้ำ (Bleeding)

ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงแอสฟัลติกคอนกรีตที่ออกแบบไม่เหมาะสม โดยมีการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไปและมีปริมาณช่องว่างน้อยเกินไป ทำให้ส่วนผสมไม่ได้สัดส่วน หรือการที่ผิวทางรับน้ำหนักบรรทุกมากเกินไปมาบดทับทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ไม่ได้ถูกดูดซึมถูกดันจนเอิ่มขึ้นมา จะสามารถพบเห็นแอสฟัลต์แยกตัวเป็นชั้นฟิล์มเคลือบบนผิวทางดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าแรงเสียดทานของผิวทางกับล้อรถยนต์ลดลง



#### 2.4.2 การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking)

การเกิดการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นลักษณะรอยแตกร้าวจำนวนมาก ต่อเนื่องกันเป็นพื้นที่โดยเริ่มจากจุดเล็กๆ และรอยแตกอาจหลุดออกจนเป็นหลุมบ่อ มักเกิดขึ้น เริ่มต้นจากบริเวณไหล่ทาง ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทาง เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่าน รอยแตกหรือรอยแยกลงสู่ชั้นวัสดุข้างล่างไปดังแสดงในรูปที่ 2.4 สาเหตุเกิดจากการที่วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเกิดการเสื่อมสภาพ เพราะ แตกหักง่าย ทำให้มีแอสฟัลติกคอนกรีตมีความต้านทานต่อ แรงดึงได้น้อยลง หรือเกิดเนื่องจากโครงสร้างทางไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ ทำให้เกิดหน่วยแรงดึง ที่บริเวณด้านล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตมากกว่าปกติ การเกิดการเสียหายจะเริ่มจากบริเวณ ด้านล่างขึ้นมาด้านบนผิวทาง

#### 2.4.3 การเกิดการทรุดตัวเป็นร่องล้อ (Rutting)

เกิดจากการบดอัดชั้นดินคันทางที่ไม่ได้มาตรฐาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกวิ่งผ่าน ทำให้วัสดุผิวทางเคลื่อนตัวออกด้านข้างเป็นแนวตามยาว ทิศทางเดียวกับแนวร่องล้อ จะเกิดขึ้นเมื่อ อุณหภูมิสูงดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการเสียรูปอย่างถาวร หรืออาจเกิดจากการที่แอสฟัลติกคอนกรีตมีส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม ทำให้ผิวทางทรุดตัว หรือเกิดจากการที่ได้รับน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป ส่งผลให้ถนนมีผิวไม่เรียบ การบังคับทิศทางของยานพาหนะเป็นไปได้ยาก และอาจเกิดน้ำ ขังในแนวร่องล้อ ซึ่งทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากจะส่งผลให้เกิดการลื่นไถลง่าย

#### 2.4.4 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Cracks)

การแตกร้าวนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผิวบนชั้นโครงสร้างทางจะเกิดการหดตัว แต่ส่วนของชั้นที่อยู่ด้านล่างของผิวทางจะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากการหดตัวที่ไม่เท่ากัน เกิดแรงดึงขึ้นจึงทำให้ผิวทางเป็น รอยแตกร้าวในแนวขวางเข้าหากึ่งกลางถนน หรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากการที่สภาวะอากาศ เปลี่ยนแปลงบ่อย เช่น การที่ถนนตั้งอยู่บริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนสลับเย็นตลอดเรื่อยไปใน เวลาอันสั้น เป็นต้น และเมื่อเกิดการแตกร้าวแล้ว ก็จะทำให้ผิวทางเกิดความเสียหาย น้ำสามารถ ซึมผ่านลงสู่ชั้นล่างได้ง่ายตามรอยแยก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



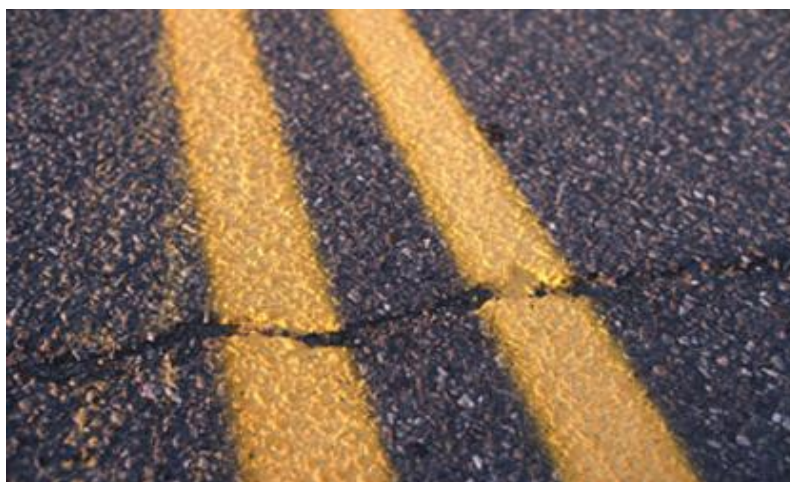
รูปที่ 2.3 การเกิดการเอิ้นน้ำของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต (bleeding)



รูปที่ 2.4 การแตกร้าวของแอสฟัลติกคอนกรีตเนื่องจากความล้า (fatigue cracking)



รูปที่ 2.5 การเกิดการทรุดตัวเป็นร่องล้อของแอสฟัลติกคอนกรีต (rutting)



รูปที่ 2.6 การแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ (temperature cracks)

## 2.5 ระบบซูเปอร์เพฟ

ระบบซูเปอร์เพฟนั้นเป็นที่ย่อของ Superior PERforming Asphalt PAVements ได้รับการพัฒนาจากโครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีการกำหนดขึ้นเพื่อช่วยให้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงสมรรถนะการใช้งานถนนแอสฟัลติกคอนกรีตให้มีการใช้งานได้ดีกว่าเดิมภายใต้อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดสภาวะร้ายแรง และน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรปริมาณสูง โดยมุ่งเน้นแก้ไขปัญหาสำคัญของการเกิดการเสียรูปอย่างถาวร (permanent deformation) ซึ่งเกิดจากส่วนผสมมีกำลังรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ และเพื่อแก้ไขการเกิดแตกร้าวเนื่องอุณหภูมิต่ำ (low temperature cracking) ของแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดจากการที่แอสฟัลติกคอนกรีตหดตัว ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่เกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสม

แอสฟัลต์ซีเมนต์ในระบบซูเปอร์เพฟนั้นจะกำหนดให้ใช้ซีเมนต์น้ำหนัสด้วยตัวอักษร PG ซึ่งย่อมาจาก Performance Grade แล้วจากนั้นจึงตามด้วยเลข 2 ชุด โดยชุดแรกจะแสดงเกรดอุณหภูมิสูง และชุดที่ 2 จะแสดงเกรดอุณหภูมิต่ำ (high and low temperature grad) เช่น PG 52-40 ใช้กับสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิผิวทางเฉลี่ยสูงสุด 7 วันในรอบปี เท่ากับ 52°C และมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ - 40°C เป็นต้น (McGensis, et. al., 1994) โดยการเลือกใช้ผู้ใช้

สามารถเลือกโดยใช้พื้นที่ทางภูมิศาสตร์ ใช้อุณหภูมิผิวทางลาดยาง หรืออุณหภูมิอากาศในการเลือกเกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เกรดสมรรถภาพของตัวเชื่อมประสานประเภทแอสฟัลต์

เกรดอุณหภูมิสูง	เกรดอุณหภูมิต่ำ
PG 46	34,40,46
PG 52	10,16,22,28,34,40,46
PG 58	16,22,22,28,34,40
PG 64	10,16,22,28,34,40
PG 70	10,16,22,28,34,40
PG 76	10,16,22,28,34
PG 82	10,16,22,28,34

ข้อดีของระบบซูเปอร์เพฟ คือมีการนำเอาข้อกำหนดตัวเชื่อมประสานประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยจะยึดถือสมรรถนะของเกรดตัวเชื่อมประสานเป็นหลัก ซึ่งแบ่งตามออกเป็นตามเกรดต่างๆตามช่วงอุณหภูมิ และสภาพภูมิอากาศของโครงสร้างถนนลาดยาง แตกต่างจากเดิมที่ใช้ค่าการทดสอบค่าความเหนียวและการเจาะลึกที่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถหาค่าคุณสมบัติของตัวเชื่อมประสานแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากจะหาค่าความเหนียวและการเจาะลึกได้เฉพาะที่อุณหภูมิปานกลางและอุณหภูมิสูงเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ตรงกับภาวะความเป็นจริงของโครงสร้างผิวทางในสนาม

#### 2.5.1 อุณหภูมิออกแบบค่าสูงและค่าของผิวทางลาดยาง

อุณหภูมิที่ใช้ออกแบบที่จะใช้สำหรับเลือกเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในระบบซูเปอร์เพฟนั้นเป็นอุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต โดยการเลือกใช้การกำหนดอุณหภูมิอากาศจากฐานข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ซึ่งในแต่ละปีจะมีการนำเอาช่วงเวลาที่มียุณหภูมิอากาศสูงและต่ำที่สุด 7 วัน มาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศสูงสุด ค่าตัวกลาง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละสถานที่ โดยจะระบุอุณหภูมิออกแบบค่าสูงสุดของผิวทางต่ำลงไปจากผิวหน้าของถนน 20 มม. และอุณหภูมิออกแบบค่าต่ำไว้ที่ผิวถนน

#### 2.5.2 ฐานข้อมูลสภาพภูมิอากาศของการออกแบบระบบซูเปอร์เพฟ

จากรายงานฐานข้อมูลอุณหภูมิอากาศและผิวทางตามสถานีตรวจวัดต่างๆ ครอบคลุมทั่วประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวน 5,313 ข้อมูลและประเทศแคนาดาจำนวน 1,515 ข้อมูล (Huber, 1994) และได้มีการนำมาพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบผิวทางด้วยวิธี ซูเปอร์เพพ โดยในซอฟต์แวร์ระบบซูเปอร์เพพได้แนะนำสมการทำนายค่าอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการ ออกแบบผิวทาง ซึ่งพิจารณาอุณหภูมิที่ผิวทางที่ระดับ 20 มิลลิเมตร จากผิวบน (maximum pavement temperature at 20 mm in °C,  $T_{PAV@20mm,max}$ ) โดยอ้างอิงค่าพารามิเตอร์สภาพ อากาศทั่วไปดังนี้

- 1) ค่าการดูดซึมแสงอาทิตย์ (solar absorption) เท่ากับ 0.9
- 2) ค่าการส่งผ่านของการแผ่รังสีผ่านอากาศ (transmission through air) เท่ากับ 0.81
- 3) ค่าการแผ่รังสีของบรรยากาศ (atmospheric radiation) เท่ากับ 0.7
- 4) ความเร็วลม (wind speed) เท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาที

มีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1 หรืออาจแปลงอยู่ในรูปแบบที่สะดวกได้ ดังสมการที่ 2.2 คือ

$$T_{PAV@20mm,max} = (T_{AIR,max-7} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2)(0.9545) - 17.78 \quad (2.1)$$

$$T_{PAV@20mm,max} = 22.50 + 0.9545T_{AIR,max-7} + 0.2185Lat - 0.0059Lat^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $T_{AIR,max-7}$  คือ ค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุด 7 วันในรอบปีเฉลี่ย  
(average 7 hottest-days air temperatures within a year, °C)

$Lat$  คือ ละติจูด (latitude, °)

สำหรับการทำนายอุณหภูมิค่าต่ำสุดของผิวทาง คณะกรรมการกลางด้านการทาง ของประเทศสหรัฐอเมริกา (Federal Highway Administration : FHWA, 1997) ได้ทำการวิจัยเพื่อ สร้างสมการในการเลือกค่าอุณหภูมิเกรดแอสฟัลท์ค่าต่ำสำหรับการออกแบบผิวทางระบบซูเปอร์ เพพที่เหมาะสม โดยทำการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวทางและอากาศต่ำสุดรายวันจากเดือนมีนาคมถึง

พฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอากาศหนาวที่สุดจากถนนลาดยาง 24 สายทั่วประเทศ จากนั้นจึงนำมาหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.3 คือ

$$T_{PAV,min} = -1.56 + 0.72T_{AIR,min} - 0.004Lat^2 + 6.26 \log(d + 25) - z(4.4 + 0.52\sigma_{AIR,min}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $T_{PAV,min}$  คือ ค่าอุณหภูมิผิวทางต่ำสุดที่ระดับใด ๆ ลึกลงไปในผิวทาง (minimum pavement temperature at any depth from surface, °C)

$T_{AIR,min}$  คือ ค่าอุณหภูมิอากาศต่ำสุด (minimum air temperature, °C)

$d$  คือ ระดับความลึกจากผิวทาง (depth to surface, mm) และ

$z$  คือ ค่าคะแนนมาตรฐานของการกระจายแบบปกติ

(Standard score from the normal distribution table)

เช่น  $z = 2.055$  ที่ความเชื่อมั่นเท่ากับ 98% และ

$\sigma_{air,min}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอากาศต่ำสุด

(Standard deviation of the annual minimum air temperature, °C)

อย่างไรก็ตามการคำนวณอุณหภูมิผิวทางด้านต่ำสุดมักนิยมใช้ค่าอุณหภูมิผิวบนสุดของผิวทาง และถ้าสมมติว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอากาศต่ำสุดมีค่าประมาณ 3°C ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 98% สมการทำนายอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทางลดรูปเหลือดังสมการที่ 2.4

$$T_{PAV@surface,max} = 1.00 + 0.72T_{AIR,min} - 0.004Lat^2 \quad (2.4)$$

ปีเตอร์และคณะ (Bosscher et. al., 1998) ได้ทำการทดสอบภาคสนามจำนวน 6 แห่งบริเวณทางหลวงของรัฐวิสคอนซิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสอบเทียบกับกระบวนการหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นผิวทางลาดยางของระบบซูเปอร์เพฟ และหาข้อจำกัดของเกรดแอสฟัลท์ที่ได้รับผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศ ณ เวลา และระดับความลึกจากผิวทางต่าง ๆ กัน การประเมินค่าทางสถิติจะใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของอากาศมาสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับสมการซูเปอร์เพฟ

(1) สำหรับการทำนายอุณหภูมิสูงสุดของผิวทางที่ระยะ 6.4 มม. จากผิวทางสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.5

$$\begin{aligned}
 T_{PAV@6.4mm,max} &= -0.519 + 0.820T_{AIR,max} + 0.00335Solar_{-0} \\
 &\text{for } T_{AIR,max} < 10^{\circ}C \\
 T_{PAV@6.4mm,max} &= 2.811 + 1.087T_{AIR,max} + 0.00246Solar_{-0} \\
 &\text{for } T_{AIR,max} > 10^{\circ}C
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

เมื่อ  $Solar_{-0}$  คือ ความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์รวมทั้งวัน  
(Daily total solar radiation intensity,  $W \cdot hr/m^2$ )

และสำหรับวันที่อุณหภูมิอากาศสูงกว่า  $30^{\circ}C$  แนะนำให้ใช้สมการที่ 2.6

$$T_{PAV@20mm,max} = -8.042 + 0.690\sqrt{Solar_{-0} \times T_{AIR,max}} + 0.471T_{AIR-01} + 0.251\sqrt{Solar_{-0} \times MS_{-0}} \tag{2.6}$$

เมื่อ  $MS_{-0}$  คือ ความเข้มการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์สูงสุดในหนึ่งวัน

จะเห็นว่างานวิจัยนี้พิจารณาได้พิจารณาปัจจัยด้านการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เข้าร่วมด้วย

(2) สำหรับอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทางที่ระยะ 6.4 มม จากผิวทาง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned}
 T_{PAV@6.4mm,min} &= 2.27 + 0.778T_{AIR,min} \text{ for } T_{AIR,min} < 0^{\circ}C \\
 T_{PAV@6.4mm,max} &= 6.83 + 1.014T_{AIR,min} \text{ for } T_{AIR,min} > 0^{\circ}C
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

และสำหรับวันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดต่ำกว่า  $-5^{\circ}C$  แนะนำให้ใช้สมการที่ 2.8

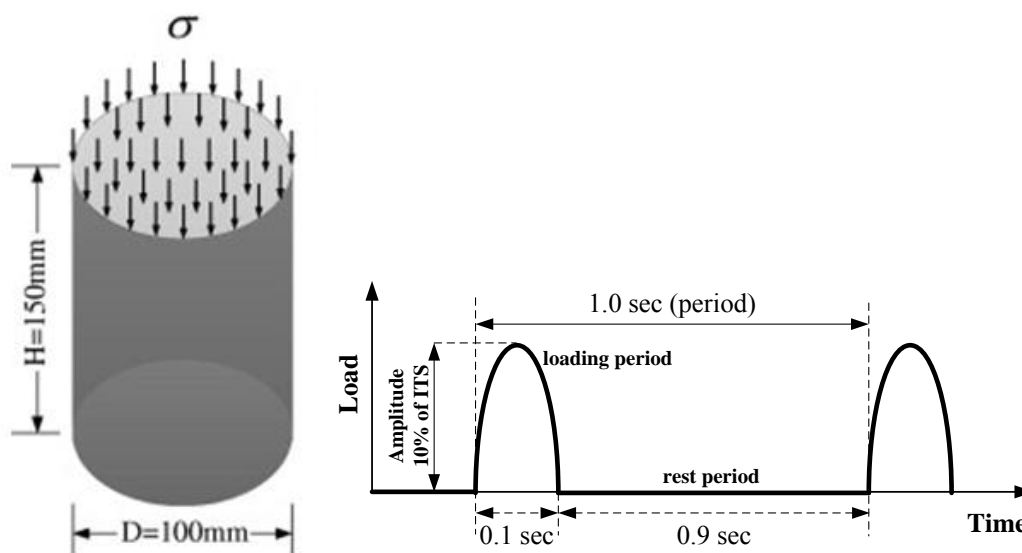
$$T_{PAV@surf,min} = 0.286 + 0.692T_{AIR,min} \tag{2.8}$$

งานวิจัยนี้พบว่าการทำนายอุณหภูมิด้านสูงน่าจะพิจารณาปัจจัยด้านการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วย แต่ในกรณีอุณหภูมิด้านต่ำสมการที่แนะนำโดยระบบซูเปอร์เพฟน่าจะให้ผลการทำงานได้ดี อย่างไรก็ตามการทดสอบภาคสนามกระทำที่ ณ ตำแหน่งเดียวซึ่งไม่สามารถพิจารณาตัวแปรตำแหน่งพิกัดบนผิวโลกหรือละติจูดได้

## 2.6 การทดสอบแอสฟัลติกคอนกรีต

2.6.1 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Permanent Deformation Test)

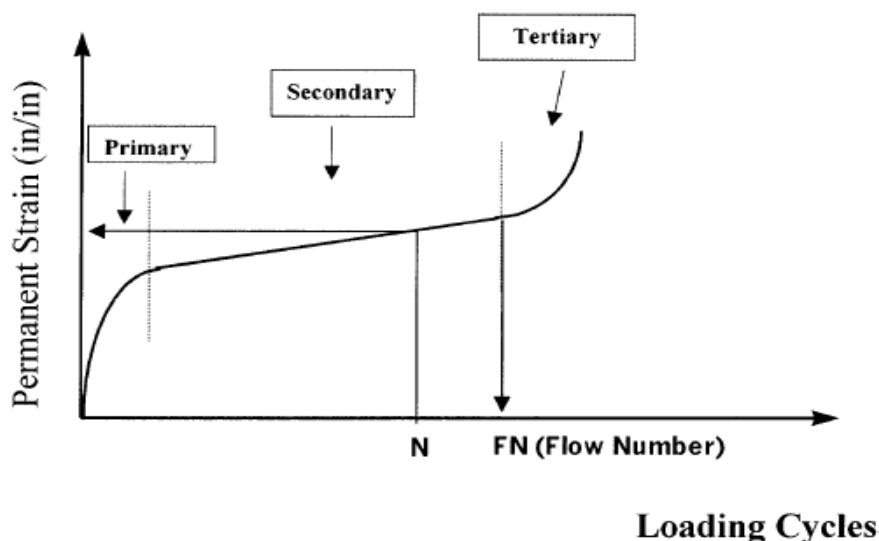
การทดสอบจะให้ความเค้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งมีความเค้นอัดในแนวแกน (axial stress) แบบ Haversine ซึ่งมีรูปแบบการให้แรงดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะรูปแบบการให้แรงกระทำซ้ำแบบ haversine loading

การให้แรงแบบซ้ำซากนี้มีช่วงเวลากการให้และถอนแรงเท่ากับ 0.1 วินาที และ 0.9 วินาทีตามลำดับ เพื่อเลียนแบบการจราจรของยานที่แล่นผ่าน ส่งผลทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรผลที่จะได้จะเป็นความสัมพันธ์ของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติก (plastic strain,  $\epsilon_p$ ) กับจำนวนครั้งของแรงกระทำ (flow number) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้แรงนี้แบบซ้ำซากนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียกว่า ความเครียดสะสม (cumulative permanent strain) (NCHRP 465, 2001)





รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยวบตัวถาวรกับจำนวนครั้งของแรงกระทำ

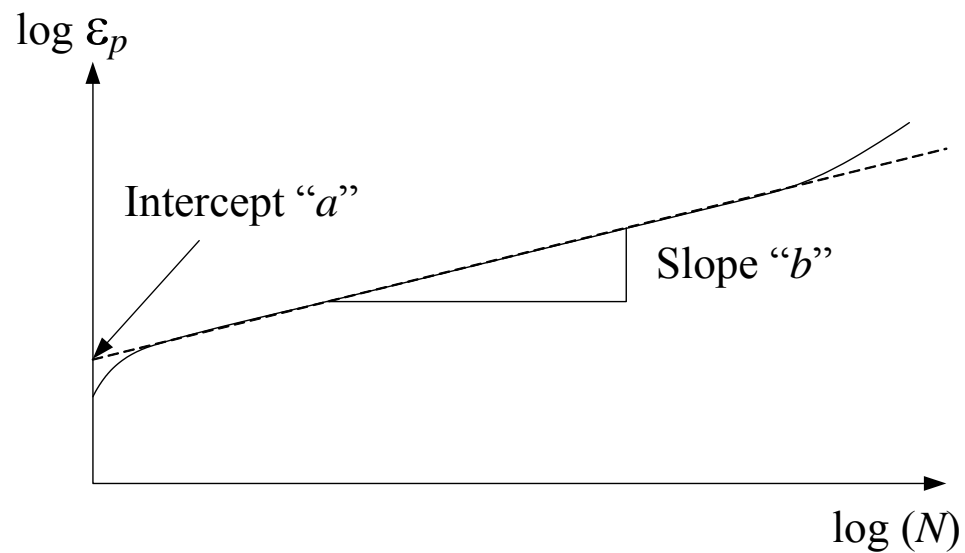
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดยวบตัวถาวรรับจำนวนครั้งของการให้แรงกระทำ สามารถอธิบายช่วงของการเกิดการคืบได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ

- ช่วง primary เป็นช่วงที่ผิวทางเกิดความเครียดสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างรวดเร็วในขณะที่จำนวนรอบของแรงกระทำยังมีน้อย เส้นกราฟจึงมีความชันมาก
- ช่วง secondary เป็นช่วงที่ความเครียดสะสมมีการเพิ่มขึ้นช้าลงจนเกือบเป็นเส้นตรงและมีความแปรผันตรงกับจำนวนรอบของแรงกระทำน้อย เส้นกราฟมีความชันลดลง
- ช่วง tertiary เป็นช่วงที่เส้นกราฟเปลี่ยนความชันอีกครั้ง โดยมีความชันที่เพิ่มมากขึ้นจนสังเกตได้ชัด ช่วงสุดท้ายนี้เป็นช่วงที่แสดงว่าแอสฟัลติกคอนกรีตเริ่มไถลวิบัติ โดย ณ จุดที่กราฟเปลี่ยนความชันในช่วงนี้จะกำหนดให้เป็นค่า FN (flow number)

ผลการทดสอบจะสามารถหาค่าความเครียดได้จากสมการที่ 2.9 และความหมายของค่าคงที่  $a$  และ  $b$  สามารถหาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยค่าคงที่  $a$  คือจุดที่เมื่อลากเส้นตรงขนานทับกับกราฟความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยวบตัวถาวรกับจำนวนครั้งของแรงกระทำในกราฟล็อก (log-log scale) ในช่วง secondary creep ตัดกับแกนค่าความเครียดยวบตัวถาวร ที่จุด  $N=1$  ส่วนค่าคงที่  $b$  คือค่าความชัน (slope) ของส่วนที่เส้นตรงที่ลากขนานทับกราฟเป็นเส้นเดียวกันซึ่งคือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดยวบตัวถาวร (rate of change of permanent strain)

$$\varepsilon_p = aN^b \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\varepsilon_p$  คือ ความเครียด (permanent strain)  
 $N$  คือ จำนวนรอบ (cycle)



รูปที่ 2.9 ความหมายของค่าคงที่  $a$  และ  $b$

### 2.6.2 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Strength Test)

การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม เป็นการทดสอบโดยการให้แรงอัดกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งอาจทำได้ทั้งการให้แรงแบบอัตราคงที่ หรือแบบกระทำซ้ำก็ได้ โดยค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถหาได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมนี้คือ

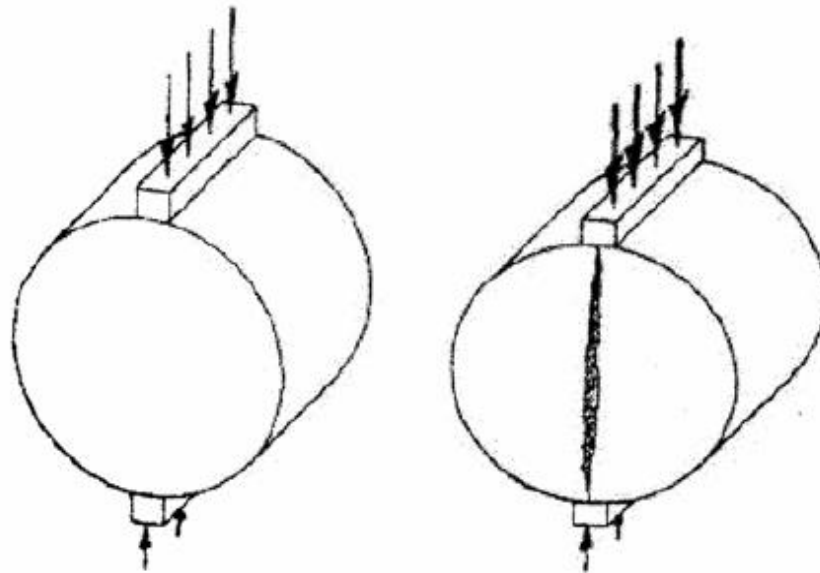
#### 1) การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบอัตราคงที่ (static indirect tensile test)

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (static modulus of elasticity)
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)
- ค่าอัตราส่วนปัวซอง (static Poisson's ratio)

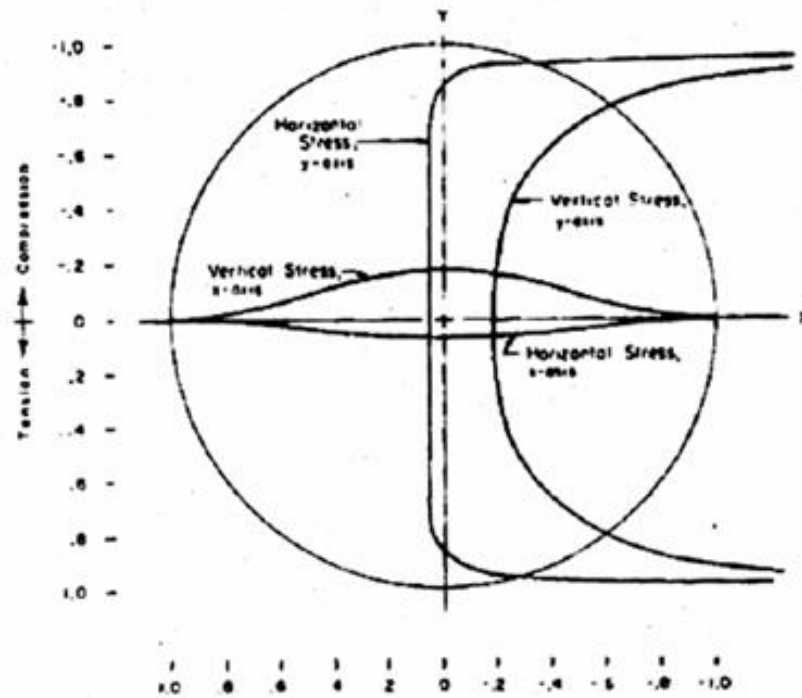
2) การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบกระทำซ้ำ (dynamic indirect tensile test)

- ค่าโมดูลัสคืบคืนตัว (resilient modulus of elasticity)
- ค่าสัดส่วนปัวซองของแบบคืบคืนตัว (resilient Poisson's ratio)
- ค่าความต้านทานความล้า (fatigue characteristics)
- ค่าการยุบตัวแบบถาวร (permanent deformation characteristics)

วิธีการให้แรงโดยการกดตัวอย่างในแนวนอนขนานกับตัวอย่างนั้นจะทำให้ก่อนตัวอย่างเกิดการแตกร้าวโดยความเค้นดึงตามเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.10 และลักษณะการกระจายความเค้นดึงและความเค้นอัดที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างทดสอบสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ลักษณะการให้แรงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างและลักษณะการวิบัติจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการกระจายของ Tensile stress และ Compression Stress ใน

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test (Thomas W. Kennedy, et al)

ค่าความเค้นดึงในแนวราบ (horizontal tensile stress) สามารถคำนวณได้จากสมการ

ที่ 2.10

$$\sigma_{xy} = \frac{2P}{\pi dt} \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $\sigma_{xy}$  คือ ความเค้นดึงในแนวราบ (horizontal tensile stress, MPa)  
 $P$  คือ แรงกระทำ (load, N)  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (diameter, mm)  
 $t$  คือ ความหนาของตัวอย่าง (thickness, mm)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตในงานวิจัยนี้จะใช้ทั้งการทดสอบแบบอัตราค่าที่ และแบบกระทำซ้ำ โดยการทดสอบแบบกระทำซ้ำนั้นสามารถแบ่งออกเป็น

- Dynamic indirect tensile test
- Repeated load indirect tensile test

วิธีการทดสอบทั้งสองจะมีลักษณะคล้ายกัน ต่างกันตรงที่วิธีการ Repeated load เป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้สำหรับการทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต ส่วนการทดสอบแบบ Dynamic นั้นจะใช้ทดสอบการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต

การทดสอบแบบอัตราคงที่ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องทดสอบ AMSLER Universal Testing Machine ในการทดสอบ

### 2.6.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)

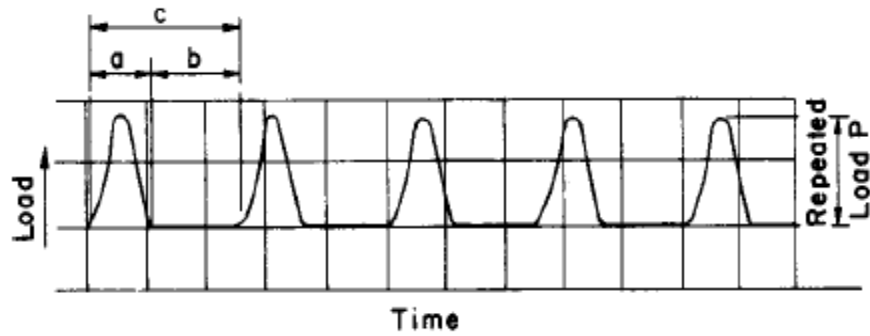
เป็นการทำการทดสอบที่นำหลักการของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตมาใช้ คือให้แรงกระทำแบบ haversine loading แล้วหาความสัมพันธ์ของแรงและค่าการยุบตัวกับเวลาเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัวได้ดังแสดงในสมการที่ 2.11 โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ของแรง (load) และการเสียรูป (deformation) กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.12

$$M_r = \frac{P}{t\Delta H} (0.27 + \mu) \quad (2.11)$$

เมื่อ	$M_r$	คือ ค่าโมดูลัสคืนตัว (total resilient modulus, MPa)
	$P$	คือ แรงกระทำ (applied load, N)
	$t$	คือ ความหนาของตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต (specimen thickness, mm)
	$\Delta H$	คือ การเสียรูปตัวในแนวราบ (total recoverable horizontal deformation, mm)
	$\mu$	คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

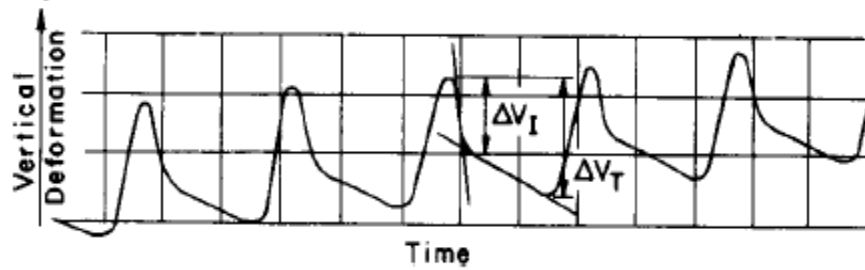
ค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างและวัสดุชั้นทางต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งค่าอัตราส่วนปัวซอง นำหนักที่กระทำ และ อุณหภูมิที่ทดสอบจะส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต คือเมื่อค่าเหล่านี้

เพิ่มขึ้นแล้วส่งผลให้ค่าโมดูลัสคืบตัวเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าตัวอย่างเกิดการเสียรูปอย่างถาวรมากขึ้น การคืบตัวกลับเป็นไปได้น้อย

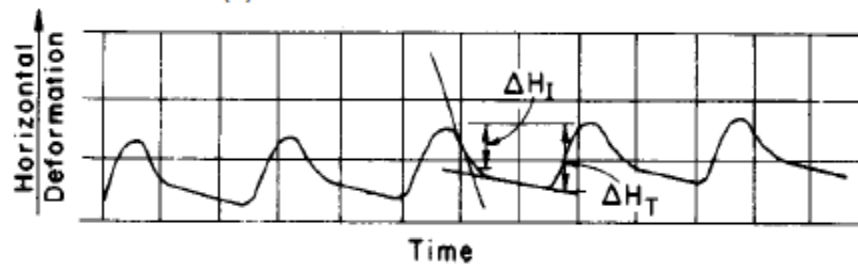


(a) Load-Time Pulse

- $a$  = duration of loading during one load cycle
- $b$  = recovery time
- $c$  = cycle time



(b) Vertical Deformation Verses Time



(c) Horizontal Deformation Verses Time

รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของแรง (load) และการเสียรูป (deformation) กับเวลาของการทดสอบแรงดึงทางอ้อม

#### 2.6.4 การทดสอบความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Fatigue Test)

การทดสอบโดยทั่วไปของการหาค่าความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตสามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบการทดสอบด้วยกันคือการทดสอบแบบควบคุมความเค้นและการทดสอบแบบควบคุมความเครียด โดยจะมีลักษณะการทดสอบต่างกันคือ

- การทดสอบแบบควบคุมความเค้น (controlled stress test)

เป็นการให้แรงกระทำซ้ำๆ กับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตเพื่อให้เกิดความเค้น (stress) ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าตัวอย่างจะเกิดความเสียหาย จำนวนครั้งที่แรงกระทำจนเกิดความเสียหายก็คือ อายุความต้านทานต่อการล้า (fatigue life, FN) ของตัวอย่างทดสอบนั้น ซึ่งการทดสอบแบบนี้ส่วนมากจะใช้กับวิธีการทดสอบแบบใช้แรงดึงทางอ้อม (indirect tensile test)

- การทดสอบแบบควบคุมความเครียด (controlled strain test)

เป็นการทดสอบโดยการให้แรงกระทำซ้ำๆ ต่อตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตเพื่อให้เกิดความเครียด (Strain) ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าตัวอย่างจะเกิดความเสียหาย ซึ่งจะถือว่าตัวอย่างเกิดความเสียหายเมื่อค่าความแข็ง (stiffness or resilient modulus) ของตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ 50 % ของค่าเมื่อเริ่มต้นทดสอบ จำนวนครั้งที่แรงกระทำจนถึงสภาวะดังกล่าวก็ถือว่าเป็นอายุความต้านทานต่อการล้าของตัวอย่าง (fatigue life)

การคำนวณหาค่าความล้าของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตในงานวิจัยนี้นั้นเป็นการทดสอบแบบควบคุมความเค้น (stress) โดยจากจำนวนรอบที่กระทำแบบ Haversine load จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการเสียหาย ( $N_f$ , Flow number) และความเค้นที่เกิดขึ้น (stress) หรือความเครียด (strain) ดังแสดงในสมการที่ 2.12 และ 2.13

$$N_f = K_1 * \sigma^{K_2} \quad (2.12)$$

$$N_f = K_1 * \varepsilon^{K_2} \quad (2.13)$$

การทดสอบค่าความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตนั้นได้มีผู้ทำการทดสอบและพัฒนามากมาย ซึ่งแต่ละแห่งก็ใช้ค่าพารามิเตอร์ในสมการความสัมพันธ์ของการล้าต่างกัน ขึ้นอยู่

กับการใช้งาน และรูปแบบการเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางสมการความสัมพันธ์ของการล้าหรือแบบจำลองการล้า (fatigue model) ที่ถูกพัฒนาโดยองค์กรต่างๆ (pavement engineering, 2009)

ผู้พัฒนา	แบบจำลอง
The Asphalt Institute (AI:1991)	$N_f = 0.00432C (\varepsilon_t)^{-3.291} (E)^{-0.854}$ $C = 10^M$ $M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• ใช้ค่า shift factor = 18.4 หากต้องการแปลงค่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (laboratory fatigue) เป็นสภาพจริง (field data)</li> <li>• สำหรับการบดอัดตัวอย่างแบบมาตรฐานที่ช่องว่างอากาศเท่ากับ 5% และปริมาตรแอสฟัลต์เท่ากับ 11% ให้ใช้</li> </ul> $N_f = 0.0796 (\varepsilon_t)^{-3.291} (E)^{-0.854}$
FHWA (Rauhut et al., 1984)	$N_f = K_1 (\varepsilon_t)^{K_2}$ $K_1 = K_{1r} \left[ \frac{E_r}{E_{Rr}} \right]^{-4}$ $K_2 = 1.75 - 0.252 \left[ \text{Log} (K_1) \right]$
The Transportation and Road Research Laboratory (Powell et al., 1984)	$N_f = 1.66 * 10^{-10} (\varepsilon_t)^{-4.32}$

หมายเหตุ	$N_f$	คือ จำนวนครั้งของการให้แรงแบบซ้ำซาก (number of load repetition to failure)
	$\varepsilon_t$	คือ ค่าความเค้นดึง (tensile strain at bottom of asphalt mix layer)
	$E$	คือ ค่าไดนามิกโมดูลัส (dynamic modulus of asphaltic concrete)
	$C$	คือ ค่าแก้ไข (correction factor)



$V_a$	คือ ปริมาตรของอากาศในแอสฟัลติกคอนกรีต (% air void)
$V_b$	คือ ปริมาตรแอสฟัลติกคอนกรีต (% asphalt content)
$K_{1r}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (coefficients determined from fatigue tests at a reference temperature of 70 °F , $7.87 \cdot 10^{-7}$ )
$E_r$	คือ ค่าโมดูลัสคืนตัวจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิเฉพาะ (total resilient modulus from indirect tensile test, psi)
$E_{Rr}$	คือ ค่าโมดูลัสคืนตัวอ้างอิง (reference total resilient modulus for a test temperature of 70 °F , 50,000 psi)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 (วีรยุทธ, 2551)

ได้ทำการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัตของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 โดยศึกษาที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดแตกต่างกัน ใช้ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตผสมร้อนประเภทแน่นที่ถูกรีดด้วยวิธีมาร์แชล ทำการบดอัดด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) ซึ่งผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราความเครียดและอุณหภูมิ นั้นจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ส่วนเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราความเครียดและอุณหภูมิ แต่จะมีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต คือทำให้เกิดการแปรปรวนเนื่องจากวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์เกรดการเจาะลึกแตกต่างกันทั้งสามชนิดแต่มีค่าความหนาแน่นเท่ากันให้ค่าโมดูลัสคืนตัวแตกต่างกัน และอิทธิพลของเกรดแอสฟัลต์มีผลต่อการยุบตัวแบบถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC40/50 สามารถต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวรได้มากที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70

และ AC80/100 ตามลำดับ โดยสังเกตจากค่า FN ของตัวอย่างที่ผสมด้วย AC40/50 จะมีค่าสูงที่สุด และสำหรับค่าความชันของการคืบของตัวอย่างที่ผสมด้วย AC80/100 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70 และ AC40/50

#### 2.7.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (ธนกร, 2551)

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาประมาณค่าโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus) ที่อุณหภูมิ 10 25 40 และ 55 °C โดยค่าแรงที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละอุณหภูมินั้น มีค่าเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม และหาความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์เพื่อประมาณค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 65 มม. โดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) -14P การให้แรงแบบ haversine จำนวน 155 รอบ และ 5 รอบสุดท้ายใช้เพื่อประเมินค่าโมดูลัสคืนตัว โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 Hz ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมามีผลกระทบอย่างมากต่อค่าโมดูลัสคืนตัวและต่อพฤติกรรมของความเค้นและความเครียด สำหรับค่าโมดูลัสคืนตัวจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และแอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior) มากขึ้น

#### 2.7.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (ธนกร, 2552)

เป็นงานวิจัยที่ทำการทดสอบเพื่อหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 10 25 40 และ 55 °C โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 เป็นส่วนผสมในตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 150 มม. ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) -14P การให้แรงเป็นแบบ haversine ที่ค่าระดับความเค้น (Stress level) ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 207 kPa จำนวน 40,000 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างจะเสียหาย โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 Hz ผลการทดสอบวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมของการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิต่ำ (10°C) แอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly elastic) คือวัสดุสามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์หลังจากถอนแรงกระทำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (25°C) แอสฟัลติกคอนกรีตเริ่มแสดงพฤติกรรมการยุบตัวถาวรบ้างในช่วง primary และ secondary ของกราฟความเครียดยุบตัวถาวรกับจำนวนครั้งของแรงกระทำ แต่ไม่แสดง

ในช่วง tertiary ส่วนที่อุณหภูมิสูง (40 °C และ 50°C) เกิดความเสียหายที่จำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสียรูปประมาณ 11,000-11,500 และ 3,000 รอบ ตามลำดับ

2.7.4 คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย (ชยธันว์ และคณะ, 2546)

ศึกษาเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีต คือ หาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม และค่าโมดูลัสคืบตัว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถนนโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ โดยการเจาะเก็บวัสดุผิวทางจากสนามทั่วประเทศไทย แล้วนำมาทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25°C และค่าโมดูลัสคืบตัวที่อุณหภูมิ 15 25 35 และ 45°C โดยพบว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ยมีค่า 1.084 MPa โดยแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.353 g/cm<sup>3</sup> และค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 13,552 8,121 4,683 และ 2,659 Mpa ที่อุณหภูมิ 15 25 35 และ 45 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อความแข็งแรงของแอสฟัลติกคอนกรีต โดยทุกๆ 10°C ค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น ประมาณ 2 เท่า ความแข็งแรงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อายุการใช้งานมากขึ้น ค่าความโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตเพียงสูงขึ้นด้วย

2.7.5 คุณสมบัติด้านการต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม (เศกชัย และคณะ, 2549)

ทดสอบหาค่าคุณสมบัติการต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเก็บในสนามทั่วประเทศไทย ทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ ด้วยวิธีทดสอบแบบการให้แรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งจะแสดงค่าเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง permissible strain และ จำนวนครั้งที่กระทำจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากการการล้า พบว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันจากตัวอย่างทั่วทุกภาค เนื่องจากการออกแบบและการใช้วัสดุของกรมทางหลวงมาจากมาตรฐานเดียวกัน และอาจสามารถใช้สมการการล้าแบบเดียวกันได้ทั้งหมดทั่วทุกภาคของประเทศไทย แต่เมื่อได้ปรับแก้ค่าเนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและสภาพจริงในสนาม และการใช้ค่า level of confidence แล้วได้ค่าเท่ากับ ร้อยละ 95 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์หรือสมการที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับบางประเทศ เช่น เดนมาร์ก ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา ดังสมการ

$$\log \varepsilon_{\text{int}} = 3.405 - 0.159 \log N_f$$

หรืออาจสามารถแปลงให้อยู่ในรูป

$$\varepsilon_{\text{int}} = 282 * \left( \frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.159}$$

ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ของความเครียดเริ่มต้นที่ยอมรับได้ และจำนวนครั้งที่กระทำ

### บทที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ภาคสนาม

#### 3.1 พื้นที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวทาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการวัดอุณหภูมิผิวทางที่เพิ่มขึ้นและลดลงทุกวันในเวลา 1 ปี และเนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษานำร่องเพื่อให้เกิดข้อมูลอุณหภูมิผิวทาง อุณหภูมิอากาศ และปริมาณความชื้นในอากาศ ณ ขณะเดียวกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ของกรมอุตุนิยมวิทยา และเนื่องด้วยการที่งบประมาณมีจำกัด จึงจัดให้มีการกำหนดพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อเป็นตัวแทนในการตรวจวัดในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย โดยกำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1 และแสดงดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.5

ตารางที่ 3.1 ตารางพื้นที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวทาง ณ จังหวัดตัวแทนต่างๆ

ภูมิภาค	พื้นที่ติดตั้งเครื่องมือ
ภาคกลาง	ปทุมธานี อ่างทอง
ภาคเหนือ	พะเยา
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	สกลนคร
ภาคใต้	สงขลา

การเลือกกำหนดจังหวัดที่เป็นตัวแทนของแต่ละภูมิกษณนั้นใช้เกณฑ์ในการเลือกโดยเลือกจังหวัดที่ง่ายต่อการเก็บข้อมูล เป็นบริเวณที่มีการจราจรไม่หนาแน่นมากนักเนื่องจากหากเลือกพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นจะทำให้ยากต่อการติดตั้ง และในบริเวณผิวทางจุดที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์นั้นไม่ควรมีการรบกวนการทำงานของเครื่องมือ ยกตัวอย่างเช่น ไม่ควรมีการปรับปรุงหรือซ่อมแซมผิวทาง ณ จุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล เป็นต้น



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัดพะเยา



รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัดปทุมธานี



รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัดสกลนคร



รูปที่ 3.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัดอ่างทอง

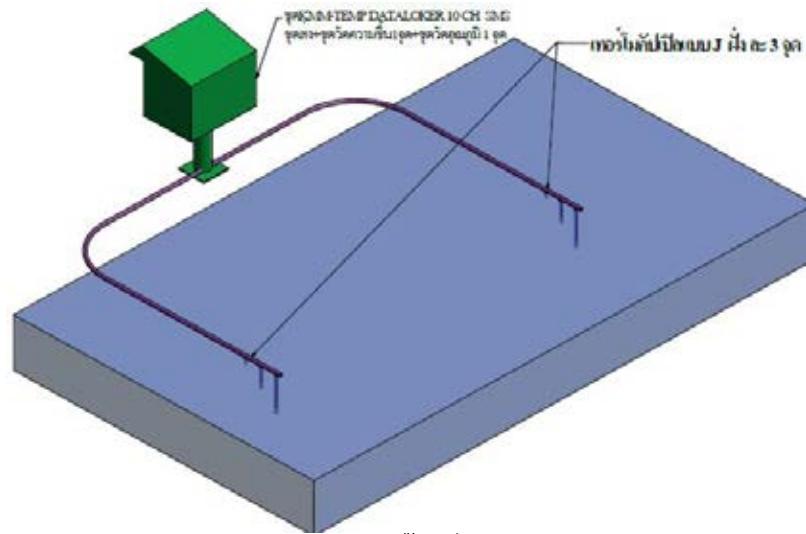


รูปที่ 3.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและความชื้นของอากาศที่จังหวัดสงขลา

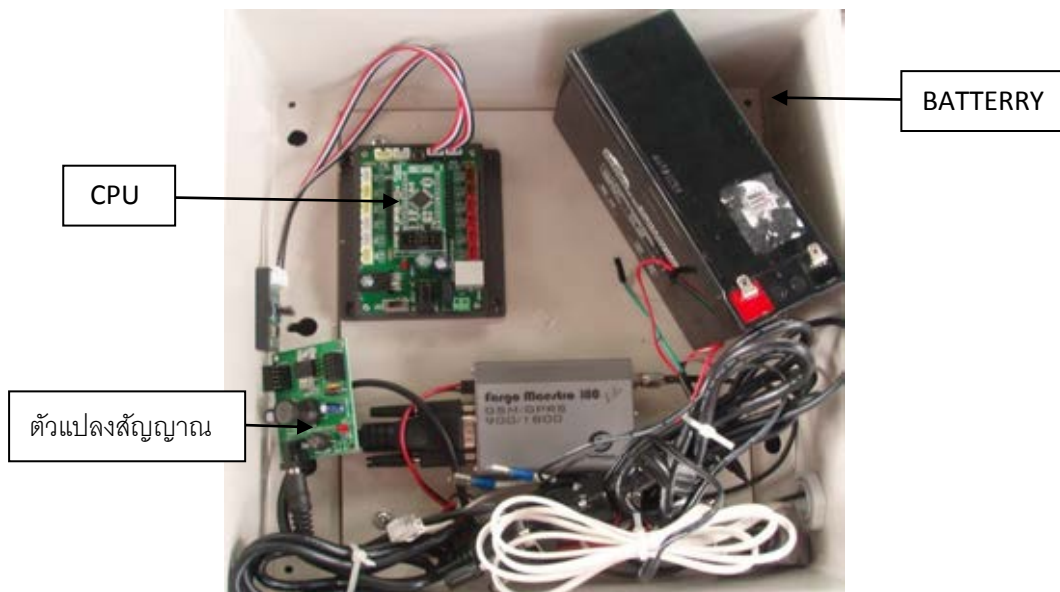
### 3.2 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทาง

เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย เป็นเครื่องมือที่ไม่สามารถหาซื้อในท้องตลาด จึงต้องมีการออกแบบ พัฒนาและจัดซื้ออุปกรณ์โดยเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์ชุดตรวจวัดอุณหภูมินั้นใน 1 สถานี (จังหวัด) แบ่งออกเป็น 2 ฝั่ง คือฝั่งซ้ายและฝั่งขวา แต่ละฝั่งห่างกัน 15 เมตร ประกอบไปด้วยหัวเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิผิวทาง 3 ตัว ที่ความลึกระยะ 2, 6 และ 15 เซนติเมตร จากผิวทางลาดยาง โดยตรงกลางระหว่างจุดฝังเทอร์โมคัปเปิล 2 ฝั่ง คือตู้เก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวทางและอากาศ



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ภายในตู้เก็บข้อมูล

ลักษณะอุปกรณ์ภายในตู้เก็บข้อมูลที่ใช้มีดังนี้

- 1) อุปกรณ์สามารถวัดอุณหภูมิได้ 7 ตำแหน่ง แบ่งเป็นอุณหภูมิผิวทาง 6 ตำแหน่งและอุณหภูมิอากาศ 1 ตำแหน่ง และวัดความชื้น 1 ตำแหน่ง
- 2) อุปกรณ์สามารถเก็บข้อมูลวันที่ เวลา อุณหภูมิ และความชื้นในรูปแบบตาราง โดยมีหน่วยความจำ (SD card) ขนาดความจุอย่างน้อย 8 กิกะไบต์ สามารถเก็บข้อมูลภายในเครื่องต่อเนื่องได้อย่างน้อย 1 ปี และสามารถกำหนดความถี่ของการบันทึกข้อมูลได้

3) มีเทอร์โมคัพเบิลแบบมาตรฐาน (characteristic of standard thermocouples) ชนิด J ความแน่นอนตามมาตรฐาน BS 1797 Part 30 หรือเทียบเท่า สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างน้อย ตั้งแต่ -40 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส และมีความละเอียดอย่างน้อย 0.1 องศาเซลเซียส จำนวน 7 ตัวพร้อมสายเคเบิลสำหรับติดตั้งหน้างาน

4) มีเซนเซอร์วัดความชื้น 1 ตัวที่สามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ระหว่าง 0–100 เปอร์เซ็นต์ มีความละเอียดอย่างน้อย 1 เปอร์เซ็นต์

5) มีระบบกำลังไฟสำรอง (battery backup) 12 โวลต์ 1.2 แอมแปร์ต่อชั่วโมง และสามารถใช้งานต่อเนื่องได้ 6 เดือน พร้อมเครื่องชาร์จ 1 เครื่อง

6) ตู้เหล็กกันน้ำกันฝุ่น สำหรับงานติดตั้งภายนอกอาคารโดยเฉพาะ

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและผิวทาง

#### 3.3.1 อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวง

ในช่วงปี พ.ศ. 2534 – 2536 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงได้ทำการสำรวจวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของผิวถนนลาดยางของประเทศไทยในทุกภูมิภาค (ประสิทธิ์, 2539) โดยค่าอุณหภูมิที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้ระหว่างการสำรวจประเมินวัดค่าการแอ่นตัวของถนนโดยวิธีและเครื่องมือเบคเคนแมนบีม (benkelman beam) เพื่อนำมากำหนดอุณหภูมิมาตรฐานของผิวทางในประเทศไทยที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ค่าแอ่นตัวของถนน และเพื่อเป็นค่าอ้างอิงสำหรับกำหนดคุณสมบัติแอสฟัลท์เชื่อมประสานที่เหมาะสมกับภูมิภาคต่างๆ ในประเทศไทยอีกด้วย การทดสอบนี้ใช้ช่วงเวลาในการสำรวจตั้งแต่ 8.00 นาฬิกา ถึง 17.00 นาฬิกา ในแต่ละวันต่อเนื่องกัน 3 ปี จำนวนทั้งหมด 650 สายทาง เป็นระยะทาง 15,740 กิโลเมตร ทำการทดสอบโดยใช้เหล็กตอกนำขนาด 7 มิลลิเมตร ตอกลึกลงไปในพื้นที่ผิวทาง 4.5 เซนติเมตร จากนั้นเติมกิลีเซอรินลงในรูจนเต็ม แล้วใช้เครื่องมือเทอร์โมมิเตอร์ควบคุม (steering thermometer) วัดที่ระดับความลึก 4 เซนติเมตร รอคจนปรอทหยุดนิ่ง 1 นาที จึงอ่านค่าอุณหภูมิ โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของแต่ละวันของแต่ละสายทางที่ตั้งอยู่จังหวัดและภาคเดียวกันจะถูกนำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าช่วงอุณหภูมิในแต่ละวัน แต่ละเดือน และแต่ละปีตามลำดับ ดังนั้นค่าอุณหภูมิมาตรฐานที่ได้จึงน่าจะเป็นอุณหภูมิส่วนใหญ่ของถนนลาดยางของประเทศไทยขณะแบกรับการจราจรได้ แต่เนื่องจากขณะที่ทำการวัดค่าอุณหภูมิผิวทางของกรมทางหลวงไม่ได้มีการบันทึกค่าตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ (GPS) ของจุดที่ทำการวัด มีเพียงแต่การบันทึกเขตความรับผิดชอบของสายทางที่ทำการทดสอบไว้เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ค่าอุณหภูมิผิวทางอยู่ในตำแหน่งที่

ใกล้เคียงกับจุดที่สำรวจที่สุด งานวิจัยนี้จึงสมมติว่าพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของหน่วยงานกรมทางหลวงเป็นตัวแทนจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิของผิวถนน ดังสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าอุณหภูมิวิกฤต และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนในแต่ละภาคในระยะเวลา 3 ปี (พ.ศ. 2534 – 2536)

ภาค	ค่าอุณหภูมิวิกฤต (°C)		อุณหภูมิที่ Percentile 80 (°C)		อุณหภูมิสูงสุด - ต่ำสุดเฉลี่ย (°C)		อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด		
เหนือ	56.0	14.0	42.5	35.5	43.3	33.5	38.0	3.40
ตะวันออกเฉียงเหนือ	56.0	22.0	41.6	33.4	41.1	33.7	37.5	3.12
กลาง	53.0	22.0	41.4	35.5	41.5	33.4	38.4	2.32
ใต้	53.0	26.0	40.9	34.0	40.9	35.4	37.4	2.64
เฉลี่ย	54.5	21.0	41.6	34.1	41.7	34.0	37.8	2.78

การสรุปค่าอุณหภูมิของถนนทั้งสี่ภาคของกรมทางหลวงที่วัดในช่วงปี พ.ศ. 2534 – 2536 ในภาพรวมนั้น ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทางทั่วทั้งประเทศมีค่าประมาณ 38 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่านี้สามารถใช้เป็นค่าอุณหภูมิมาตรฐานของกรมทางหลวงในขณะนั้น และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิวิกฤตในแต่ละภาคแล้วจะพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนในภาคกลางมีค่าสูงสุด คือ 38.4 องศาเซลเซียส เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นที่ราบลุ่ม อับลม การระบายความร้อนด้วยกระแสลมจึงมีน้อย และมีค่าต่ำสุดในภาคใต้คือ 37.4 องศาเซลเซียส จากการที่ภาคใต้มีฝนตกมากกว่าภาคอื่น ส่วนภาคเหนือจะเป็นภาคที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าภาคอื่น และยังเป็นภาคที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดและต่ำสุดด้วย หลายคนอาจคิดว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือน่าจะเป็นพื้นที่วิกฤตที่มีอุณหภูมิผิวทางสูงสุด แต่เนื่องจากสภาพภูมิประเทศในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นที่ราบสูง แห้งแล้ง ความชื้นในอากาศมีน้อย ทำให้การระบายความร้อนเป็นไปได้ดีกว่าสภาพภูมิประเทศในภาคเหนือที่เป็นภูเขา

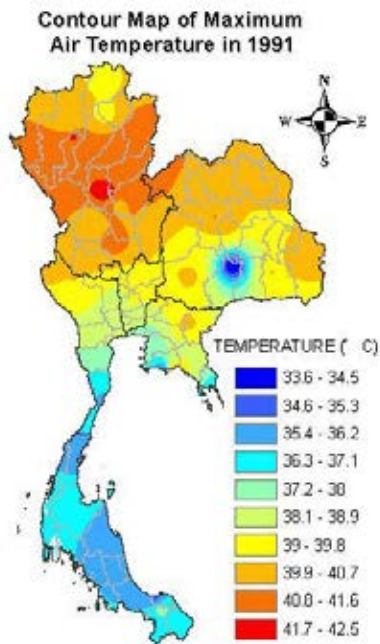
### 3.3.2 ฐานข้อมูลอุณหภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา

ในการออกแบบผิวทางด้วยระบบซูเปอร์เพฟ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศจะถูกนำมาแปลงเป็นค่าอุณหภูมิผิวทางเพื่อใช้ในการเลือกเกรดแอสฟัลต์เชื่อมประสาน เก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิอากาศย้อนหลัง 23 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2530 – 2553 จากกรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์ภูมิอากาศกรมอุตุนิยมวิทยา, 2553) ข้อมูลในช่วงเวลา 23 ปีที่ผ่านมาพบว่าอากาศร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทุกปี และจะร้อนที่สุดในช่วงเดือนเมษายนของทุกปีดังตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรวมของทุกภาคมีค่าสูงขึ้นกว่าค่าปกติ โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นกว่าค่าปกติมากที่สุดคือเพิ่มขึ้น 0.76 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยของประเทศไทยแล้ว พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าปกติทั้งหมด นั่นคือเพิ่มขึ้น 0.70 0.31 0.46 ตามลำดับ ส่วนภาคเหนือจะมีช่วงต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดมากที่สุด คือ 12 องศาเซลเซียส และภาคกลางเป็นภาคที่มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยสูงสุดที่สุดคือ 33.32 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดอุณหภูมิผิวทางของกรมทางหลวง ซึ่งอาจนำข้อมูลการสำรวจดังกล่าวข้างต้นไปสร้างเส้นชั้นความสูงของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด และเส้นชั้นความสูงของอุณหภูมิผิวทางสูงสุดและต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถึง 3.19

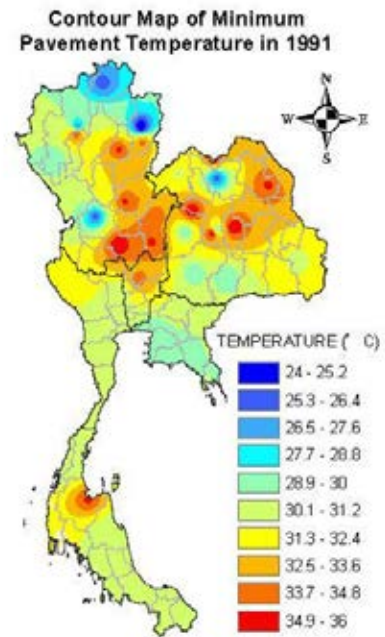
ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิของประเทศไทยเฉลี่ย 23 ปี (พ.ศ.2530- 2553)

ภาค	อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย (°C)	ผลต่างจากค่าปกติ (°C)	อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย (°C)	ผลต่างจากค่าปกติ (°C)	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ผลต่างจากค่าปกติ (°C)
เหนือ	32.86	+0.09	20.86	-0.08	26.66	+0.47
ตะวันออกเฉียงเหนือ	32.64	+0.46	22.26	+0.46	27.32	+0.76
กลาง	33.32	-0.25	23.53	-0.21	28.29	+0.12
ตะวันออก	33.01	+0.47	24.23	+0.56	28.47	+0.66
ใต้	32.36	+0.40	23.75	+0.18	27.90	+0.54
ประเทศไทย	32.82	+0.31	22.95	+0.46	27.73	+0.70

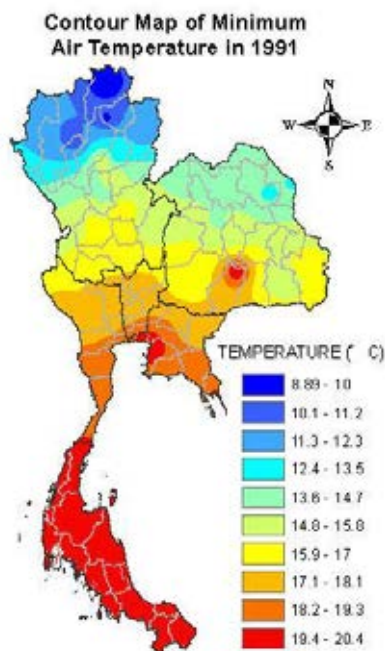
หมายเหตุ ค่าปกติ 30 ปี พ.ศ. 2514-2543 ยกเว้นอุณหภูมิเฉลี่ยใช้ค่าปกติ 20 ปี พ.ศ. 2524-2543



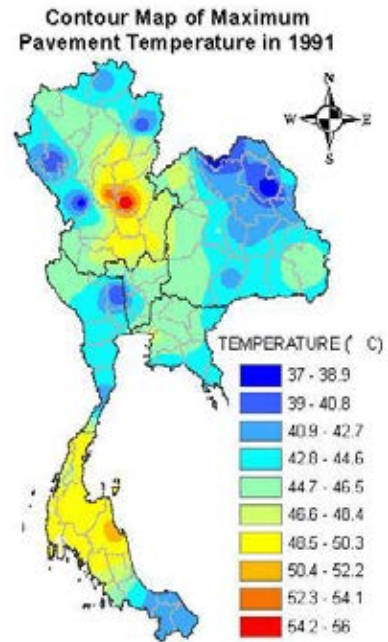
รูปที่ 3.8 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2534



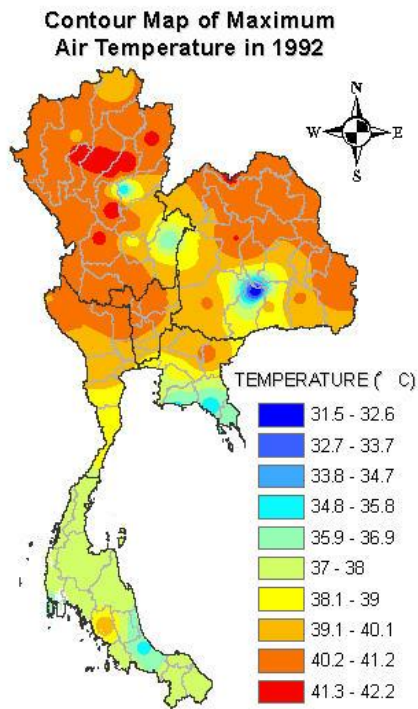
รูปที่ 3.10 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2534



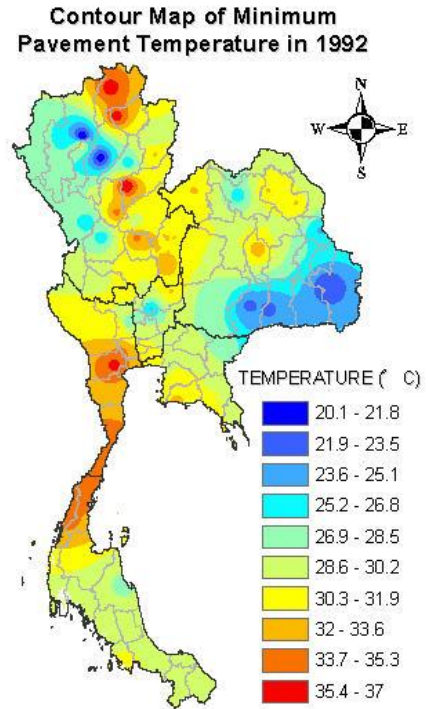
รูปที่ 3.9 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2534



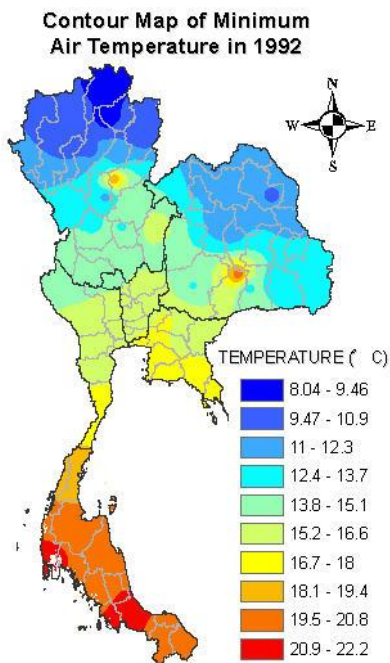
รูปที่ 3.11 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2534



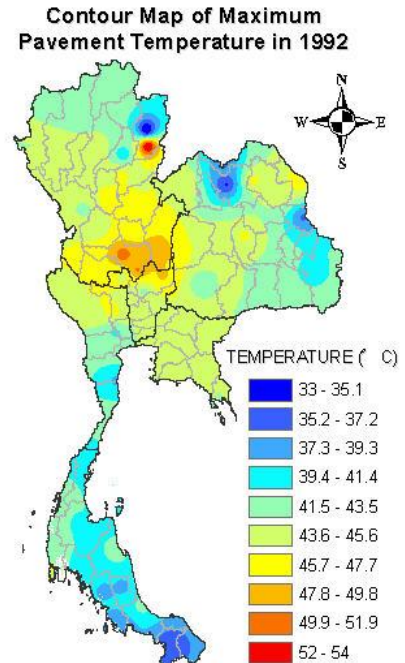
รูปที่ 3.12 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2535



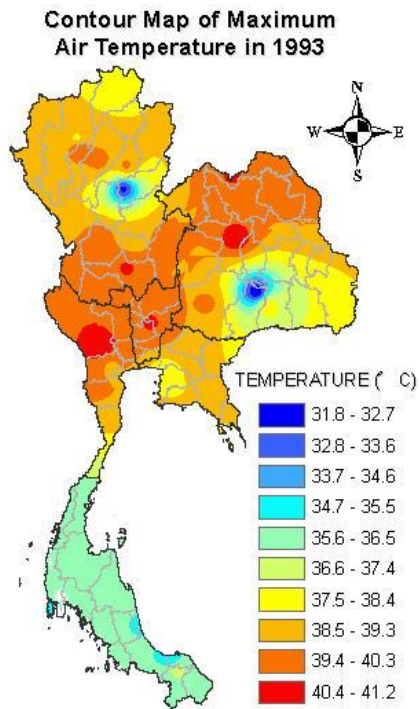
รูปที่ 3.14 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2535



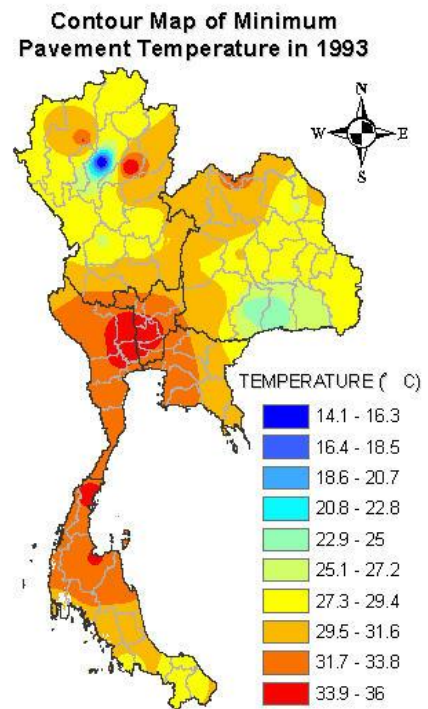
รูปที่ 3.13 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2535



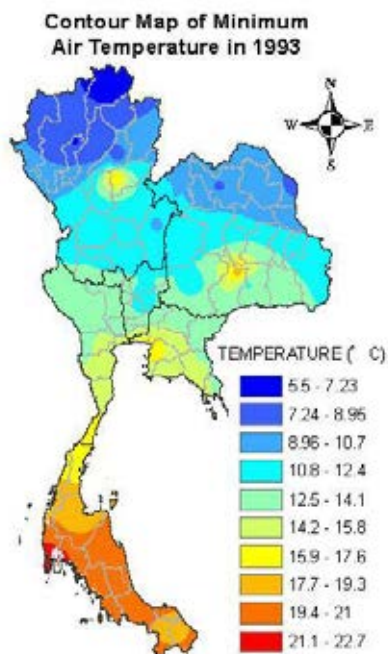
รูปที่ 3.15 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2535



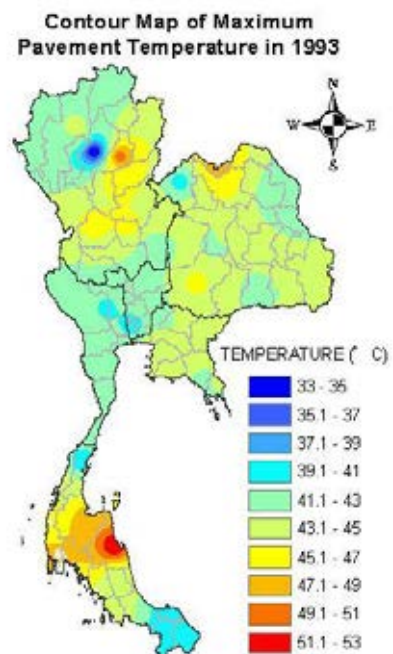
รูปที่ 3.16 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2536



รูปที่ 3.18 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2536



รูปที่ 3.17 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ ปี พ.ศ. 2536



รูปที่ 3.19 แผนที่สภาพภูมิอากาศแสดงอุณหภูมิสูงสุดของผิวทาง ปี พ.ศ. 2536

### 3.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์แบบถดถอย

ภายหลังจากนำค่าอุณหภูมิผิวทางที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามแล้วจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการสร้างฐานข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น และการสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับหลายตัวแปร (multiple variables) ด้วยหลักสถิติที่นิยมมากที่สุดคือ การวิเคราะห์ถดถอยทีละขั้น (stepwise regression analysis) โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวัน (daily max and min air temperature) อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ย 7 วันในรอบปี (average 7- hottest and coldest days air temperature within a year) ค่าละติจูด (latitude) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด (standard deviation of max and min air temperature) โดยได้มีการทดลองวิเคราะห์เพื่อศึกษาแนวโน้มอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวทางของถนนจากฐานข้อมูลการวัดอุณหภูมิผิวทางในอดีตโดยอ้างอิงวิธีการศึกษาของระบบซูเปอร์เพพทดลองโดยนำค่าอุณหภูมิผิวทางที่ได้จากการเก็บข้อมูลของศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ระหว่างปี พ.ศ. 2534 – 2536 มาพยายามสร้างสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศที่วัดที่สถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ใกล้กันมากที่สุดดังจะแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การศึกษาอุณหภูมิผิวทางสูงสุด

ผลการศึกษาสหสัมพันธ์เชิงเส้น (linear correlation) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่าตัวแปรอุณหภูมิอากาศสูงสุดในแต่ละวันมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิผิวทางสูงสุดมากกว่าตัวแปรอุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย 7 วันในรอบปี ซึ่งแตกต่างจากสมการของซูเปอร์เพพที่ใช้ค่าตัวแปรอุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย 7 วันในรอบปี ดังนั้นการวิเคราะห์ถดถอยจึงเลือกใช้ตัวแปรอุณหภูมิอากาศสูงสุดในแต่ละวัน ละติจูด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอากาศสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 3.5

จากผลการวิเคราะห์ถดถอยพบว่า สมการเชิงเส้นหลายตัวแปรที่ใช้ทำนายอุณหภูมิผิวทางสูงสุดได้ดีที่สุดดังแสดงในสมการที่ 3.1 คือ

$$T_{PAV,max} = 14.88 + 0.5771T_{AIR,max} + 1.9416Lat - 0.0754Lat^2 \quad (3.1)$$

ด้วยค่า  $R^2 = 0.3215$  และค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (standard error of estimation, SE) เท่ากับ 3.4218 องศาเซลเซียส



ตารางที่ 3.4 ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยสำหรับอุณหภูมิผิวทางสูงสุด

Correlation	Tpav,max	Lat	Lat <sup>2</sup>	Tair,max	Tair,max-7	Sair,max
Tpav,max	1	0.0305324	-0.012765	0.5142599	0.0552831	-0.02519
Lat	0.0305324	1	0.9901772	0.0920175	0.5782246	0.7462141
Lat <sup>2</sup>	-0.012765	0.9901772	1	0.0716798	0.565605	0.7567872
Tair,max	0.5142599	0.0920175	0.0716798	1	0.0871096	-0.02079
Tair,max-7	0.0552831	0.5782246	0.565605	0.0871096	1	0.6296183
Sair,max	-0.02519	0.7462141	0.7567872	-0.02079	0.6296183	1

ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์ถดถอยที่ละขั้นสำหรับอุณหภูมิผิวทางสูงสุด

Model	Coefficients					Statistical values	
	Const.	$T_{air,max}$	$Lat$	$Lat^2$	$\sigma_{air,max}$	SE	$R^2$
1	24.9243	0.6156				3.5366	0.2644
2	25.1469	0.6174	-0.0195			3.5489	0.2647
3	14.8815	0.5771	1.9416	-0.0754		3.4218	0.3215
4	14.1028	0.5825	1.9473	-0.0777	0.3430	3.4305	0.3231

### 3.4.2 การศึกษาอุณหภูมิผิวทางต่ำสุด

ในทำนองเดียวกัน ผลการศึกษาสหสัมพันธ์เชิงเส้นของอุณหภูมิด้านต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 พบว่าตัวแปรอุณหภูมิอากาศต่ำสุดในแต่ละวันมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิผิวทางสูงสุดมากกว่าตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับสมการของซูเปอร์เพฟ ดังนั้นการวิเคราะห์ถดถอยจึงเลือกใช้ตัวแปร อุณหภูมิอากาศต่ำสุดในแต่ละวัน ละติจูด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอากาศต่ำสุด ดังแสดงในตารางที่ 3.7 จากผลการวิเคราะห์ถดถอยพบว่า สมการเชิงเส้นหลายตัวแปรที่ใช้ทำนายอุณหภูมิผิวทางต่ำสุดได้ดีที่สุดดังแสดงในสมการที่ 3.2 คือ

$$T_{PAV@,min} = 15.63 + 0.4996T_{AIR,min} + 0.6233Lat - 0.0156Lat^2 - 0.6196\sigma_{AIR,min} \quad (3.2)$$

ด้วยค่า  $R^2 = 0.2599$  และค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (SE) เท่ากับ  $3.2168^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 3.6 ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยสำหรับอุณหภูมิผิวทางต่ำสุด

Correlation	Tpav,min	Lat	Lat <sup>2</sup>	Tair,min	Tair,min-7	Sair,min
Tpav,min	1	-0.116923	-0.14366	0.4993462	0.1746213	-0.187374
Lat	-0.116923	1	0.9903771	-0.294815	-0.83937	0.9320732
Lat <sup>2</sup>	-0.14366	0.9903771	1	-0.326199	-0.856051	0.9460496
Tair,min	0.4993462	-0.294815	-0.326199	1	0.3804494	-0.369787
Tair,min-7	0.1746213	-0.83937	-0.856051	0.3804494	1	-0.914102
Sair,min	-0.187374	0.9320732	0.9460496	-0.369787	-0.914102	1

ตารางที่ 3.7 การวิเคราะห์ถดถอยทีละขั้นสำหรับอุณหภูมิผิวทางต่ำสุด

Model	Coefficients					Statistical values	
	Const.	$T_{air,min}$	$Lat$	$Lat^2$	$\sigma_{air,min}$	SE	$R^2$
1	18.8254	0.5247				3.2312	0.2493
2	18.0826	0.5350	0.0359			3.2319	0.2504
3	14.9069	0.5120	0.6558	-0.0239		3.2215	0.2564
4	15.6338	0.4996	0.6233	-0.0156	-0.6196	3.2168	0.2599

อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการทดลองนี้เป็นเพียงการแสดงผลตัวอย่างการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวทางของถนนจากรฐานข้อมูลการวัดอุณหภูมิผิวทางในอดีตคือเมื่อเกือบ 20 ปีที่แล้ว ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานยังอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง (มากกว่า 3 องศาเซลเซียส) และค่าความแม่นยำในการทำนายผลค่อนข้างต่ำ ( $R^2 < 0.5$ ) อันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนด้านตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิผิวทางและสถานีวัดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา และในอนาคตหากมีฐานข้อมูลเพียงพอ และข้อมูลมีความละเอียดมากกว่านี้ ผลการวิเคราะห์จึงน่าจะมีค่าความแม่นยำมากขึ้น

## บทที่ 4 วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดสอบในรายงานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำก้อนตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติยวบตัวถาวร ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าความต้านทานต่อการฉีกการของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยใช้แอสฟัลซีเมนต์ชนิด AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 เป็นส่วนผสม โดยในบทนี้จะอธิบายถึงวัสดุที่ใช้ ขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่าง วิธีการ ตลอดจนขั้นตอนการทดสอบเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย

### 4.1 ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้มีทั้งหมด 2 ขนาดด้วยกัน ตัวอย่างขนาดแรก คือตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าความต้านทานความฉีกของแอสฟัลติกคอนกรีต จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 65 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 65 มม.

ส่วนก้อนตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการทดสอบหาค่าการยุบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 150 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 150 มม.

ตัวอย่างทั้งหมดนั้นจะถูกออกแบบโดยวิธีมาร์แชล (marshall method) และบดอัดด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพอ (superpave gyratory compactor) ที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเป็นแอสฟัลติกผสมร้อนประเภทแน่น (hot mix asphaltic concrete)

ส่วนผสมที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่าง คือ หินปูนปริมาณ 1,200 กรัม ที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" 1/2" #4 #8 #50 #200 และถาดรอง สำหรับตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 65 มม. จะใช้หินปูนปริมาณรวม 2,673 กรัม สำหรับตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. 150 มม. ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แต่เนื่องจากในแต่ละส่วนผสมนั้น ใช้แอสฟัลติกซีเมนต์ต่างชนิดกัน ปริมาณที่ต้องใช้ในแต่ละส่วนผสมจึงต่างกันด้วย โดยได้แสดงปริมาณแอสฟัลติกซีเมนต์ที่เหมาะสมไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล

ขนาดตะแกรง	ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 65 มม.	ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 150 มม.
	น้ำหนักหิน (g)	น้ำหนักหิน (g)
3/4	0	0
1/2	120	267.3
4	360	801.9
8	180	400.95
50	384	855.36
200	84	187.11
Pan	72	160.38
Total	1200	2673

ตารางที่ 4.2 ปริมาณชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม

AC40/50	AC60/70	AC80/100
ร้อยละ 4.9	ร้อยละ 4.5	ร้อยละ 4.9
โดยน้ำหนักของมวลรวม	โดยน้ำหนักของมวลรวม	โดยน้ำหนักของมวลรวม

#### 4.2 เครื่องบดอัดแอสฟัลต์คองกรีตไจราทอรีในระบบซูเปอร์เพพ

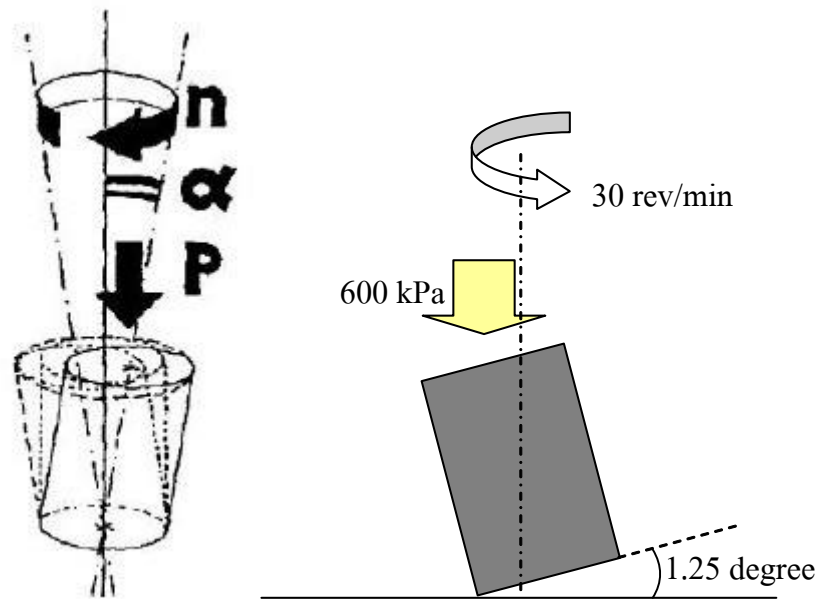
แอสฟัลต์ซีเมนต์และหินปูนจะถูกผสมเข้าด้วยกันและนำเข้าเครื่องบดอัดไจราทอรี (superpave gyratory compactor) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก่อนที่จะทำการบดอัดนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์ หินปูน และแบบ (mold) จะถูกนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 38-150 °C (ASTM D4013) เพื่อให้สามารถคลุกเคล้าเข้ากันได้และอุณหภูมิขณะทำการบดอัดควรอยู่ที่ 121 ± 3 °C การทำงานของเครื่องนั้นใช้ความดันคงที่ 0.6 MPa เพื่อให้ตัวอย่างได้รับแรงกระทำเช่นเดียวกับผิวทางที่ได้รับการบดอัดจากล้อเหล็กบดอัดถนนในสภาพที่เกิดขึ้นจริง ส่วนของเครื่องบดอัดจะเอียงตัว 1.2 องศา จากแนวระนาบ และหมุนด้วยอัตราคงที่ 30 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้จะมีค่าความหนาแน่น ประมาณ  $2,400 \text{ kg/cm}^3$  และปริมาณช่องว่างอากาศ 4-8%

การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยเครื่องไจราทอรีนี้จะใช้หลักการของแรงอัดเฉือน (shear-compaction principle) ซึ่งต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญคือ การเคลื่อนที่ในแนวทแยงและแนวเฉือน แรงอัดที่กระทำลงบนวัสดุที่อยู่บนเครื่องมือ ทำให้เกิดจากการอัดมวดของตัวอย่างในระบอบบรรจุด้านบนและด้านล่าง ซึ่งขณะที่เครื่องบดอัดเคลื่อนที่หมุนแบบไจราทอรีระหว่างการทดสอบจะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้น อนุภาคเกิดการเคลื่อนไถลกันมากขึ้นและเปลี่ยนรูปร่างให้มีการรูปทรงที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 เครื่องบดอัดไจราทอรีในระบบซูเปอร์เพฟ (superpave gyratory compactor)



รูปที่ 4.4 รูปแบบการบดอัดด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรี (Asphalt Institute, 1996)

การอัดตามหลักการของไจราทอรี เป็นไปตามหลักการดังต่อไปนี้

- ความสมมาตรของวัสดุตัวอย่าง คือตัวอย่างในระบอบกบรจจะมีความเอียงตรงปลายเล็กน้อย ค่าความเอียง ( $\alpha$ ) จะหมุนรอบแกนกลางของระบอบกบรจตัวอย่างระหว่างการทดสอบ การหมุนครบหนึ่งรอบแกนนี้จะถูกเรียกว่า รอบการทำงาน (work cycle)
- ปริมาณการเคลื่อนที่แนวเฉือนจะเกิดแรงเฉือนภายในขึ้นทุกๆ รอบการทำงาน โดยวัสดุตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ แรงเฉือนจะเกิดขึ้นในแต่ละส่วนของด้านข้างที่เชื่อมต่อกันอยู่

4.4.1 ขั้นตอนหลักเพื่อใช้ในการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรี

- 1) ทำการเตรียมส่วนผสมอันได้แก่ แอสฟัลตซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 และมวลรวม
- 2) นำส่วนผสมมาซึ่งนำหนักภายหลังจากที่ทำการอบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เรียบร้อยแล้ว

3) ผสมส่วนผสมทั้งแอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวมเข้าด้วยกัน จนเมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำกลับไปอบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ใหม่เพื่อปรับให้อุณหภูมิเหมาะสมกับการบดอัดในเครื่องไจราทอรีประมาณ 1 ชม.

4) วางแผนงานรองด้านล่างของกระบอกบรรจุตัวอย่าง โดยวางให้ด้านเรียบหันขึ้นด้านบน และวางแผนปิดปลายด้านหนึ่งในแบบบรรจุตัวอย่าง และวางบน เครื่องชั่ง และอ่านค่าน้ำหนักของแบบบรรจุตัวอย่าง

5) ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในแบบบรรจุตัวอย่าง

6) กรอกราค่าน้ำหนักของวัสดุผสมตัวอย่าง ค่าตัวแปรอื่นๆ เช่น จำนวนรอบการหมุนหรือค่าความหนาแน่นสูงสุดในโปรแกรมการบดอัด

7) ตรวจสอบให้มั่นใจว่า แผ่นจานด้านบนวางอยู่เหนือวัสดุตัวอย่าง ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องไจราทอรีเตรียมการบดอัด แล้วเริ่มการบดอัด

8) เมื่อการบดอัดสิ้นสุดลง นำตัวอย่างที่ได้ออกจากอุปกรณ์

9) ทำความสะอาดแบบบรรจุตัวอย่าง ขึ้นส่วนต่าง ๆ แล้วเริ่มทำการบดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่างต่อไป

ภายหลังจากที่ทำการบดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการบันทึกค่าน้ำหนักตัวอย่าง ความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พร้อมทั้งทำเครื่องหมายยกความแตกต่างของตัวอย่างแต่ละส่วนผสม เพื่อที่จะสามารถนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

#### 4.3 เงื่อนไขในการทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้แบ่งเป็นการทดสอบแบบเปียกแบบแห้ง แบบเปียกคือภายหลังจากที่บดอัดก้อนตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการดูอากาศออกจากก้อนตัวอย่างโดยใช้ปั๊มดูดอากาศจนความอิมตัวของอากาศอยู่ระหว่าง 55% ถึง 80% ก่อนที่ตัวอย่างจะถูกนำไปแช่น้ำควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบแอสฟัลติกคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียก ตัวอย่างจะถูกควบคุมอุณหภูมิก่อนการทดสอบเป็นเวลา 24 ชม. และระหว่างการทดสอบ โดยจะควบคุมอุณหภูมิที่  $55^{\circ}\text{C}$  เพื่อการทดสอบหาค่าคุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัวและการยุบตัวถาวร และควบคุมอุณหภูมิที่  $10^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3



ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปการทดสอบและเงื่อนไขการทดสอบ

การทดสอบ	ชนิดยาง	อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ (°C)	เงื่อนไขก่อนการทดสอบ	
			แห้ง	เปียก
การทดสอบการยุบตัวถาวร	AC 40/50	55		x
	AC 60/70	55		x
	AC 80/100	55		x
การทดสอบแรงดึงทางอ้อม	AC 40/50	55	x	x
	AC 60/70	55	x	x
	AC 80/100	55	x	x
การทดสอบโมดูลัสคืนตัว	AC 40/50	55		x
	AC 60/70	55		x
	AC 80/100	55		x
การทดสอบความต้านทานความล้า	AC 40/50	10, 25		x
	AC 60/70	10, 25		x
	AC 80/100	10, 25		x

#### 4.4 การทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine AMSLER

เครื่องทดสอบ UTM AMSLER นี้เป็นเครื่องทดสอบขนาด 20 ตัน ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการให้แรงได้โดยให้ผู้เชี่ยวชาญควบคุม ใช้ในการทดสอบการหาค่าแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติก คอนกรีตแบบสถิต (static) แต่ในระหว่างการทดสอบนี้จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบสอบได้ จึงใช้ระยะเวลาในการทดสอบอย่างรวดเร็ว คือไม่เกิน 2 นาที หลังจากนำตัวอย่างออกจากห้องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำให้อุณหภูมิขณะทดสอบใกล้เคียงกับ 55 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.5

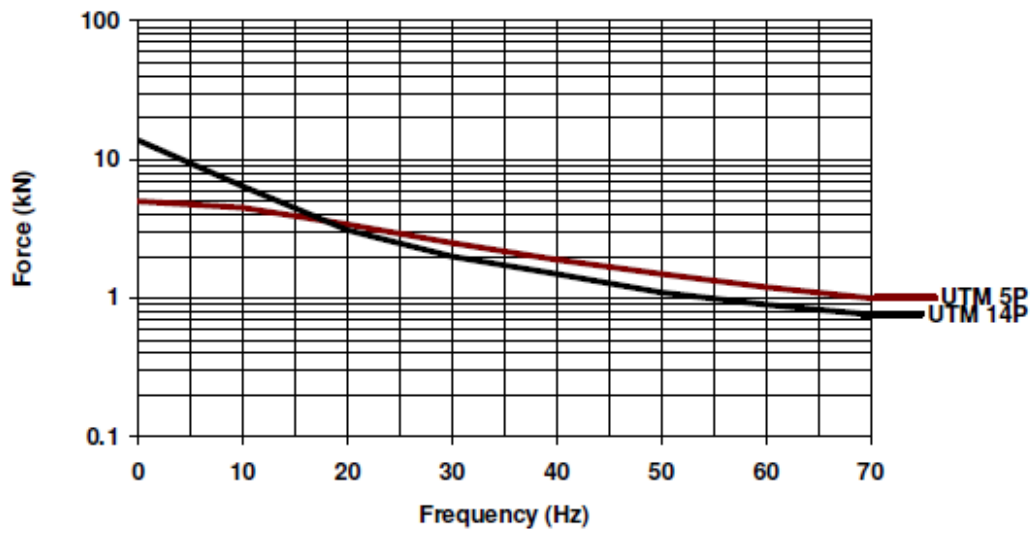


รูปที่ 4.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine AMSLER

#### 4.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)

เครื่อง UTM นี้เป็นเครื่องทดสอบขนาด 14P (14 kN) ควบคุมการใช้งานโดยคอมพิวเตอร์ ใช้ในการทดสอบการหาค่าแรงดึงทางอ้อม (indirect tensile) และแรงในแนวแกน (axial load) สามารถควบคุมการให้น้ำหนักเป็นแบบอัตราคงที่ (static) หรือกระทำแบบซ้ำซาก (dynamic) ได้ โดยมีแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 14 kN ที่ความถี่ในการให้แรง 0-70 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เครื่องทดสอบจะใช้ระบบไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมเปิดปิดวาล์วแรงดันอากาศ (air pressure) ที่ 750 kPa และยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ตั้งแต่ 0-60 °C ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและความถี่ในการให้แรงของเครื่องทดสอบ UTM



รูปที่ 4.7 เครื่องทดสอบ universal testing machine ที่อยู่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

#### 4.6 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Permanent Deformation Test)

การทดสอบนี้อ้างอิงจากมาตรฐานของ The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) ฉบับที่ 465 ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ UTM 14P

ตัวอย่างที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. 150 มม. มีการให้แรง 207 kPa ตามแนวความสูงของตัวอย่างซึ่งเป็นระดับความเค้นที่เกิดขึ้นของยานพาหนะบนชั้นผิวทาง กระทำกับก้อนตัวอย่างในลักษณะกระทำซ้ำ โดยใช้ความถี่ 1 Hz ซึ่งคือมีระยะเวลาในการให้น้ำหนัก (load) 0.1 วินาที และถอนน้ำหนัก 0.9 วินาที

ตัวอย่างจะถูกแช่ในน้ำทั้งก่อนเป็นเวลา 24 ชม. และในขณะที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเพื่อการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตนี้จะได้โปรแกรม UTM:UTS014 Asphalt Permanent Deformation Test ซึ่งเป็นโปรแกรมเพื่อหาค่าความต้านทานในการเสียรูปแบบถาวร โดยการแรงกระทำแบบซ้ำๆ อย่างต่อเนื่อง

เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้น ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้คือจำนวนครั้งของแรงกระทำที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการเสียรูปแบบถาวร (number of cycle) กับค่าความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (permanent strain) นำค่าทั้งสองนี้มาหาความสัมพันธ์เพื่อหาสมการการเสียรูปถาวรได้

#### 4.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Static Indirect Tensile Strength Test)

การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D6931 กระทำโดยให้แรงกด (compression load) แบบสถิตย์ด้วยเครื่อง amsler universal testing โดยพยายามควบคุมด้วยอัตราการให้แรง  $50 \pm 5$  mm/s โดยให้น้ำหนักกระทำคงที่ในแนวเส้นขนานตามเส้นผ่านศูนย์กลางด้านข้างของก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และความสูง 62.5 มม. จากนั้นทำการบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดที่กระทำกับก้อนตัวอย่าง แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (horizontal tensile stress) ด้วยการติดตั้งตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อให้ในการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

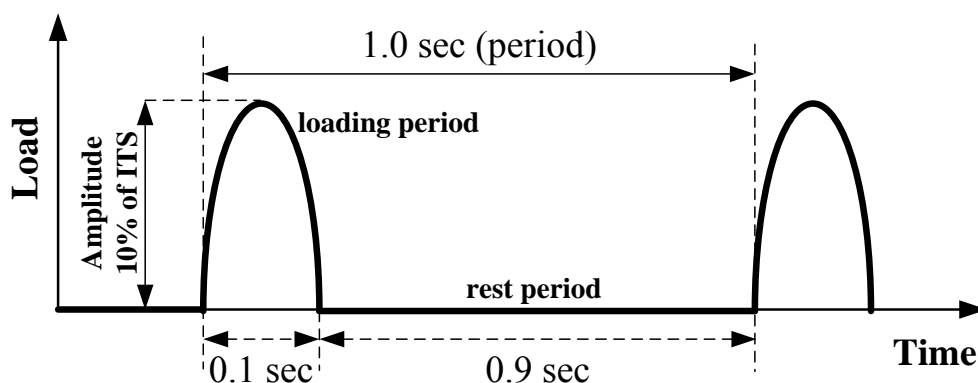
#### 4.8 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)

การทดสอบนี้ติดตั้งก้อนตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4132 ซึ่งเหมือนกับการติดตั้งก้อนตัวอย่างแบบการหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม แต่ทำการเพิ่มการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้าง (linear variable differential transducers, LVDTs) ที่มีความละเอียดถึง 0.00025 มม. เพื่อวัดค่าการเสียรูปด้านข้าง (horizontal deformation)



รูปที่ 4.10 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อให้ในการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต

การทดสอบจะเป็นการให้น้ำหนักกระทำกับก้อนตัวอย่างในลักษณะกระทำซ้ำ โดยใช้ความถี่ 1 Hz คือมีระยะเวลาในการให้น้ำหนัก (load) 0.1 วินาที ต่อช่วงระยะเวลาปล่อยน้ำหนัก (unload) 0.9 วินาที สำหรับรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine function) ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (haversine function)

การกระทำน้ำหนักนี้จะกระทำซ้ำอย่างต่อเนื่องจำนวน 155 รอบ โดยใช้โปรแกรมของเครื่อง Universal Testing Machine (Controls UTM-14 kN) เลือกใช้โปรแกรมการหาค่าโมดูลัสคั้นตัวทางอ้อม (UTS003) ส่วนผลการทดสอบจะได้จากค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายที่มีการคั้นตัวคงที่ในแต่ละก้อนตัวอย่าง ภายหลังจากการแช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันก่อนการทดสอบ 24 ชั่วโมง กำหนดค่าอัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio) เท่ากับ 0.35 และค่าแรงกระทำสูงสุดที่กระทำต่อก้อนตัวอย่างมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของแรงกระทำที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 55 °C

#### 4.9 การทดสอบความต้านทานความล้า (Indirect Tensile Fatigue Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติการต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตจากการหาค่าแรงดึงทางอ้อม (indirect tensile strength) ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และความสูง 62.5 มม. โดยใช้การให้น้ำหนักกระทำคงที่เข้าไปซ้ำมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า โดยใช้ความถี่ 1 Hz เช่นเดียวกับการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบเป็นในลักษณะเดียว โปรแกรมเครื่อง Universal Testing Machine (Controls UTM-14 kN) เลือกใช้โปรแกรมสำหรับการหาค่าความต้านทานความล้าโดยวิธีทางอ้อม (UTS 013)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะถูกนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชม. ก่อนทำการทดสอบ โดยที่อุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิอากาศขณะทำการทดสอบเท่ากับ 10 และ 25 °C กำหนดค่า

อัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio) เท่ากับ 0.35 และค่าแรงกระทำสูงสุดที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง มีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของแรงกระทำที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ อุณหภูมิ 10 และ 25°C ตามลำดับ



## บทที่ 5

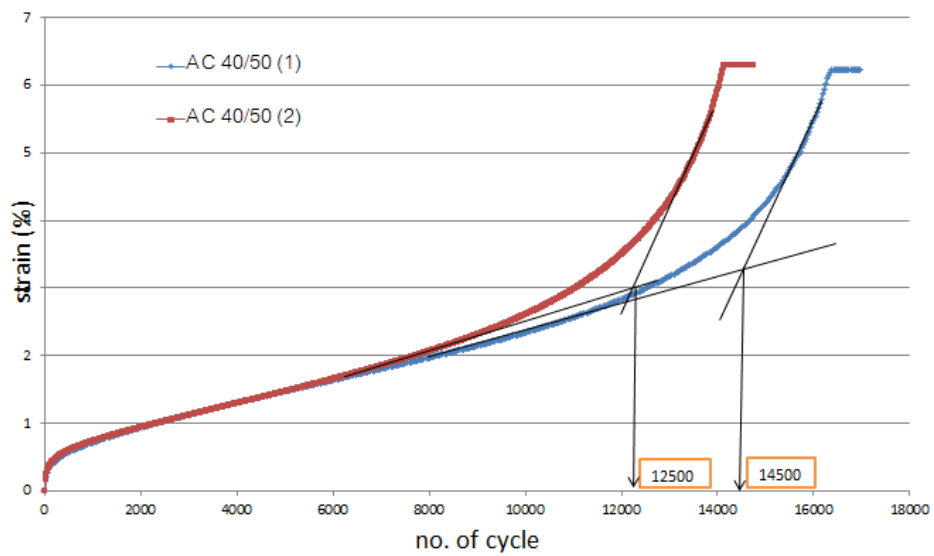
### ผลการทดสอบ

#### 5.1 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Permanent Deformation Test)

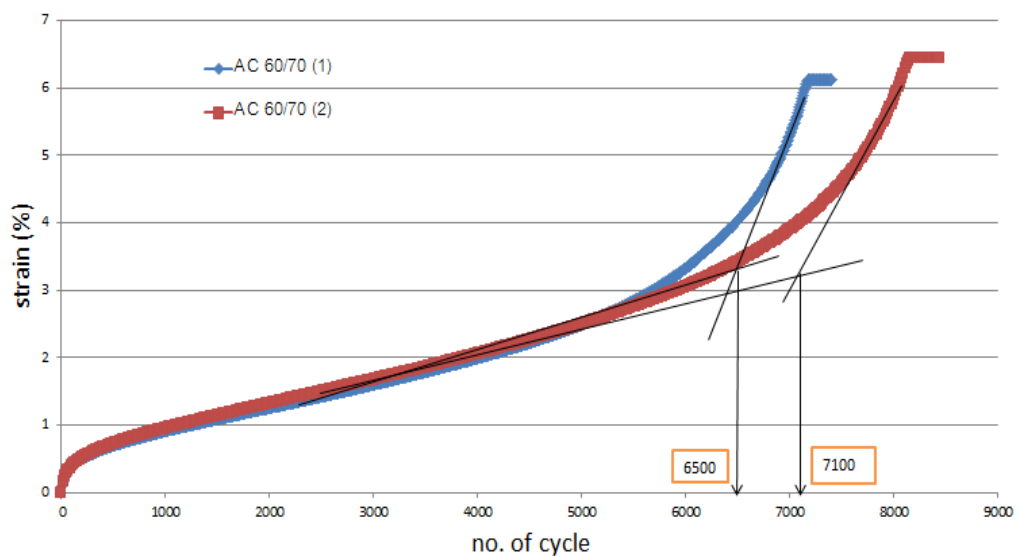
ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นการนำค่าความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดพลาสติก (plastic strain,  $\epsilon_p$ ) กับจำนวนครั้งของแรงกระทำ (flow number) ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการที่ตัวอย่างได้รับแรงกระทำในลักษณะการให้แรงแบบซ้ำซากภายหลังจากตัวอย่างแช่น้ำ 24 ชม (การยุบตัวถาวรเนื่องจากความชื้น) มาหาความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 จะเห็นว่าค่าจำนวนรอบสูงสุดที่อุณหภูมิ 55°C ของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 มีค่า 14500 และ 12500 รอบ แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 มีค่า 6500 และ 7100 รอบ และแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC80/100 มีค่า 2500 และ 4300 รอบ โดยลักษณะตัวอย่างที่เกิดการวิบัติแสดงในรูปที่ 5.10

พิจารณาช่วงที่เกิด secondary creep หรือช่วงที่กราฟเปลี่ยนความชันช่วง 2 มาพล็อตเป็นกราฟสเกลล็อกเพื่อหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ถึง 5.9 สรุปการทดสอบการยุบตัวถาวรได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1

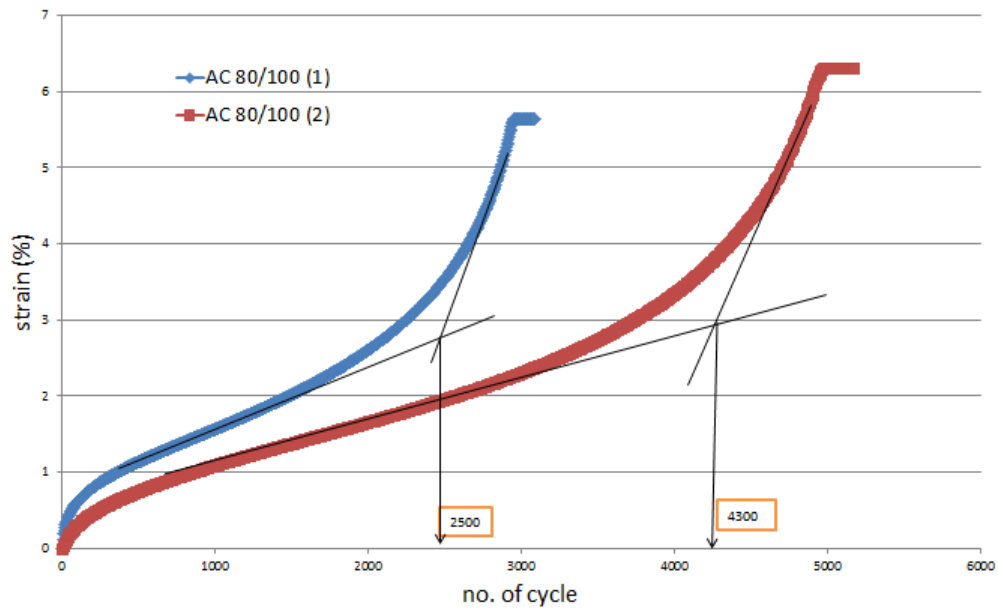
พิจารณาค่าพารามิเตอร์  $b$  จากกราฟล็อกจะเห็นว่าค่า  $b$  มีค่าสูงขึ้น โดยแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC80/100 มีค่ามากที่สุด AC60/70 และ AC40/50 รองลงมาตามลำดับ หรืออาจสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์  $b$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวอย่างผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเจาะลึกสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าพารามิเตอร์  $b$  แปรแบบผกผัน (Reverse variation) กับค่าของแรงกระทำที่จุดเสียรูป



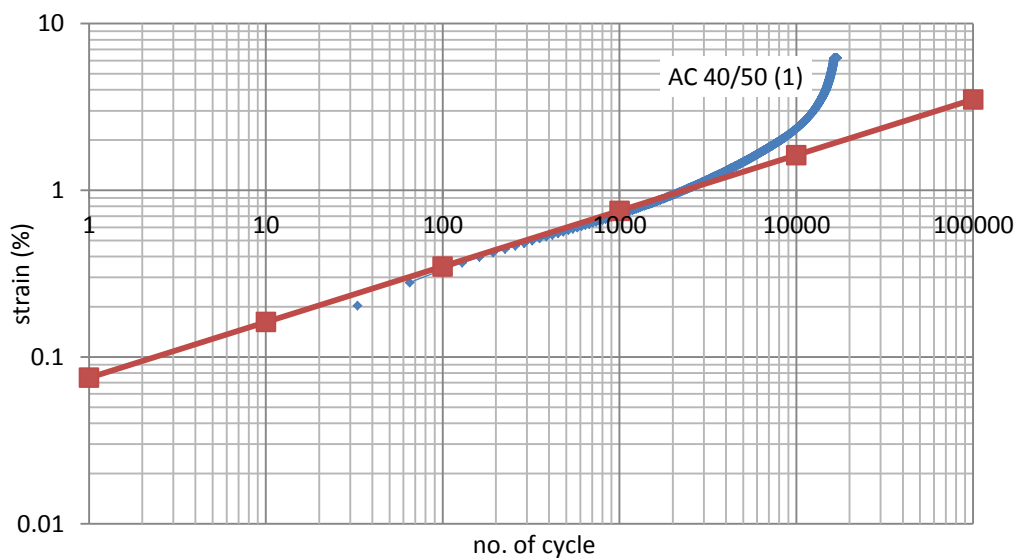
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50



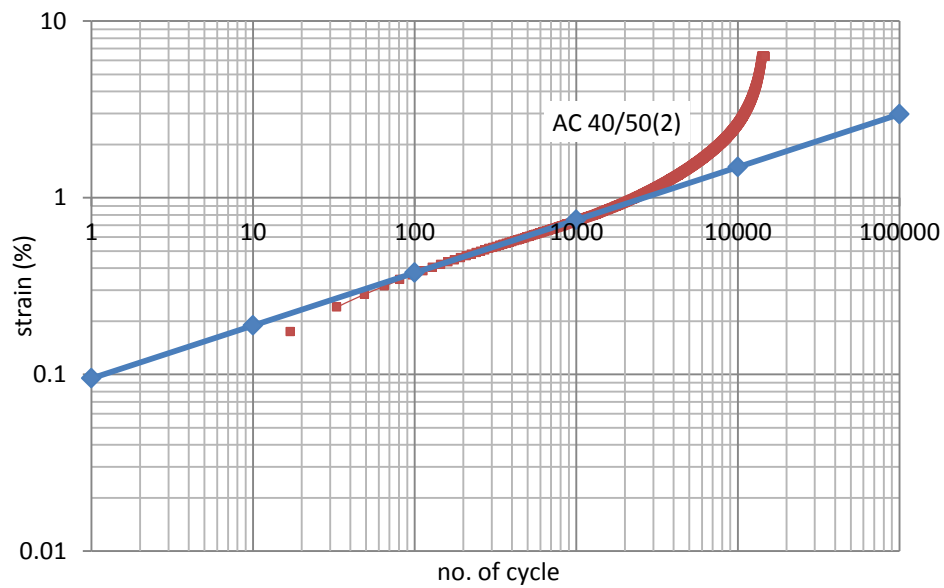
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเครียดการยุบตัวถาวรหรือความเครียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100

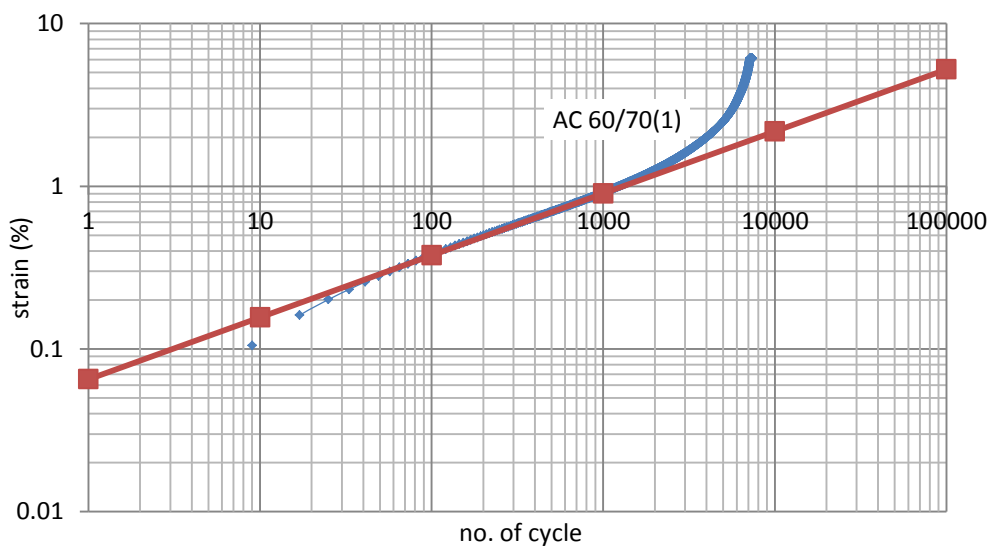


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$

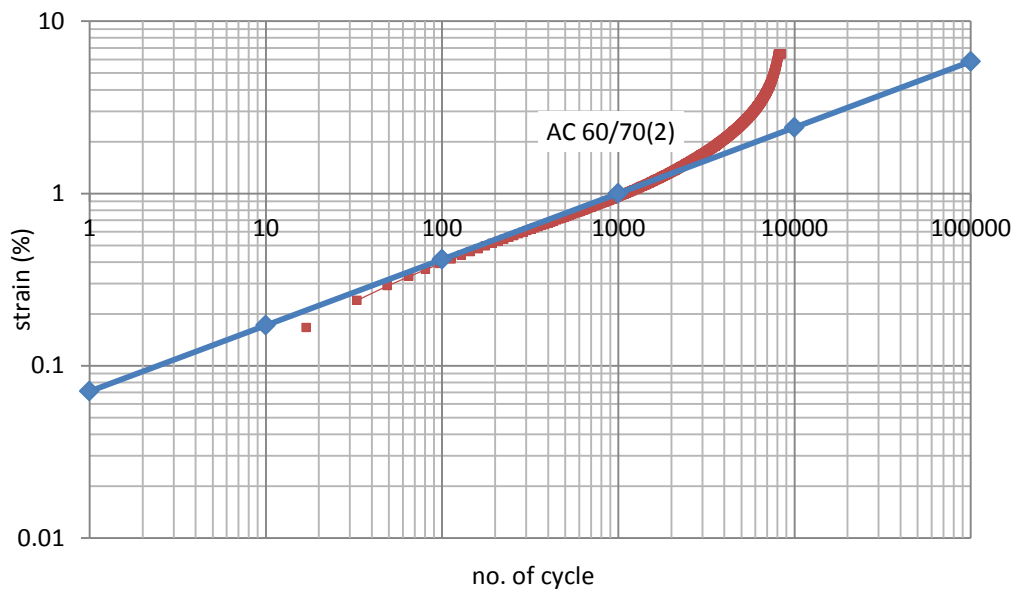


รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่

$a$  และ  $b$

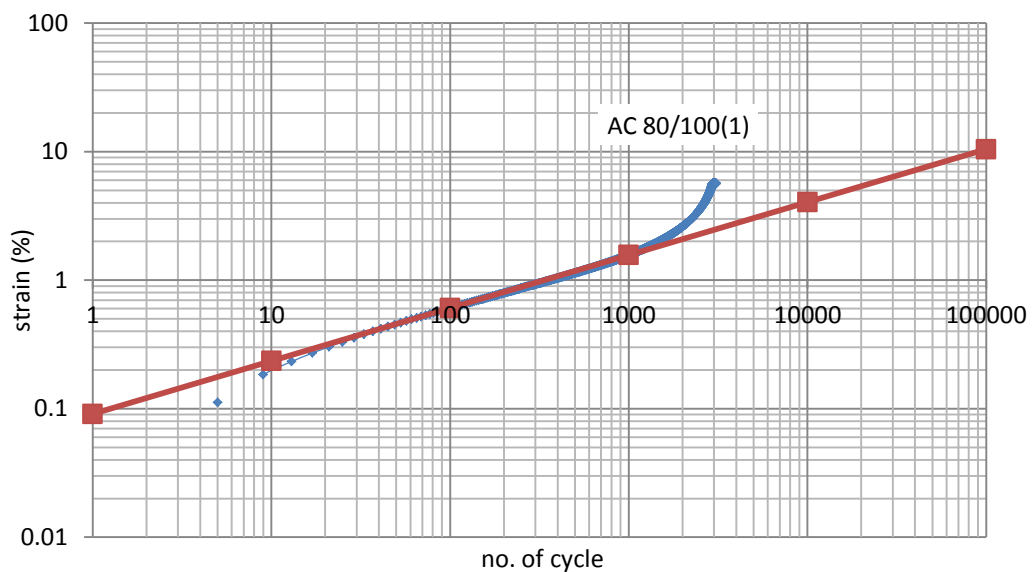


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$



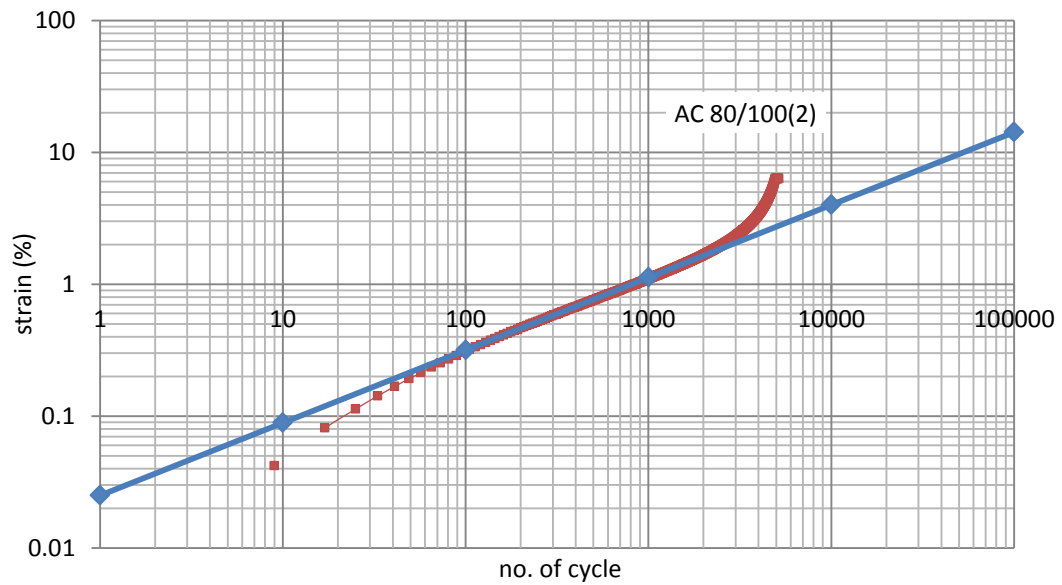
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่

$a$  และ  $b$



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยุบตัวถาวรหรือความเคียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100(1) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่

$a$  และ  $b$



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของค่าผลของความเคียดการยวบตัวถาวรหรือความเคียดพลาสติกกับจำนวนครั้งของแรงกระทำของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100(2) ในกราฟล็อกเพื่อการหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$

ตารางที่ 5.1 ตารางผลการทดสอบค่าการยวบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนรอบรอบสูงสุด ที่อุณหภูมิ 55°C	Flow Number	$a$	$b$	สมการการยวบตัว
AC 40/50 (1)	16967	14500	0.075	0.334	$\varepsilon_p = 0.075N^{0.334}$
AC 40/50 (2)	14743	12500	0.095	0.299	$\varepsilon_p = 0.095N^{0.299}$
AC 60/70 (1)	7407	6500	0.065	0.381	$\varepsilon_p = 0.065N^{0.381}$
AC 60/70 (2)	8448	7100	0.071	0.383	$\varepsilon_p = 0.071N^{0.383}$
AC 80/100 (1)	3088	2500	0.091	0.421	$\varepsilon_p = 0.091N^{0.412}$
AC 80/100 (2)	5161	4300	0.025	0.551	$\varepsilon_p = 0.025N^{0.551}$



รูปที่ 5.10 ลักษณะตัวอย่างเมื่อเกิดการวิบัติแบบการยุบตัวถาวร

## 5.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test)

การทดสอบการหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผ่านการแช่น้ำและไม่แช่น้ำที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ค่าแรงกระทำสูงสุด ( $P$ ) ที่ทำให้แอสฟัลติกคอนกรีตเกิดการเสียหายด้วยแรงดึงทางอ้อม จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาค่าความเค้นดึงในแนวระนาบ ( $\sigma_{xy}$ ) ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3

พิจารณาตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตแช่น้ำอุณหภูมิ 55°C จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50 มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมากที่สุด คือมีความสามารถต้านทานความเค้นดึงในแนวศูนย์กลางได้เฉลี่ย 141.80 kPa รองลงมาคือ AC 60/70 และ AC 80/100 ตามลำดับ ที่มีต้านทานความเค้นดึงในแนวศูนย์กลางได้เฉลี่ย 139.73 และ 133.66 kPa ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ตารางผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต  
ภายหลังจากแช่น้ำอุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนการทดสอบ

ชนิดตัวอย่าง	แรงกระทำ (kN)	$\sigma_{xy}$ (kPa)	$\sigma_{xy}$ เฉลี่ย (kPa)
AC 40/50 (1)	1.35	129.57	141.80
AC 40/50 (2)	1.54	147.70	
AC 40/50 (3)	1.55	148.13	
AC 60/70 (1)	1.32	127.56	139.73
AC 60/70 (2)	1.51	145.59	
AC 60/70 (3)	1.51	146.05	
AC 80/100 (1)	1.41	132.62	133.66
AC 80/100 (2)	1.49	139.68	
AC 80/100 (3)	1.34	128.70	

ตารางที่ 5.3 ตารางผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต  
โดยที่ไม่ได้แช่น้ำแต่ควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนการทดสอบ

ชนิดตัวอย่าง	แรงกระทำ (kN)	$\sigma_{xy}$ (kPa)	$\sigma_{xy}$ เฉลี่ย (kPa)
AC 40/50 (1)	1.21	115.66	104.56
AC 40/50 (2)	1.17	111.61	
AC 40/50 (3)	0.90	86.41	
AC 60/70 (1)	0.98	95.86	97.55
AC 60/70 (2)	1.03	98.92	
AC 60/70 (3)	1.02	97.87	
AC 80/100 (1)	0.92	86.97	99.68
AC 80/100 (2)	1.11	104.97	
AC 80/100 (3)	1.13	107.10	



พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ทดสอบที่ไม่แช่น้ำตามควบคุม อุณหภูมิที่ 55°C จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50 มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมากที่สุด คือมีความสามารถต้านทานความเค้นดึงในแนวศูนย์กลางได้เฉลี่ย 104.56 kPa แต่เมื่อพิจารณาค่าความเค้นดึงของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70 และ AC 80/100 มีค่าเท่ากับ 97.55 kPa และ 99.68 kPa ซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC 80/100 มีค่ามากกว่าแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70 การทดสอบแสดงให้เห็นว่าเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต คือที่อุณหภูมิเดียวกัน แอสฟัลติกคอนกรีตที่มีเกรดการเจาะลึกต่างกัน ก็จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่างกันด้วย และอิทธิพลของความชื้นก็เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอย่างหนึ่งด้วยเช่นกัน และตัวอย่างที่มีการแช่ลงในน้ำมีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมมากกว่าอย่างตัวอย่างที่ไม่แช่ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการที่น้ำแทรกซึมเข้าไปอยู่ในช่องว่างในแอสฟัลติกคอนกรีต

### 5.3 การทดสอบโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)

จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสคืบตัวภายหลังจากการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 55°C ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ AC40/50 มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ AC60/70 และ AC80/100 ซึ่งคือมีค่าเท่ากับ 1317.38 MPa 1097.00 MPa และ 809.89 MPa ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.4

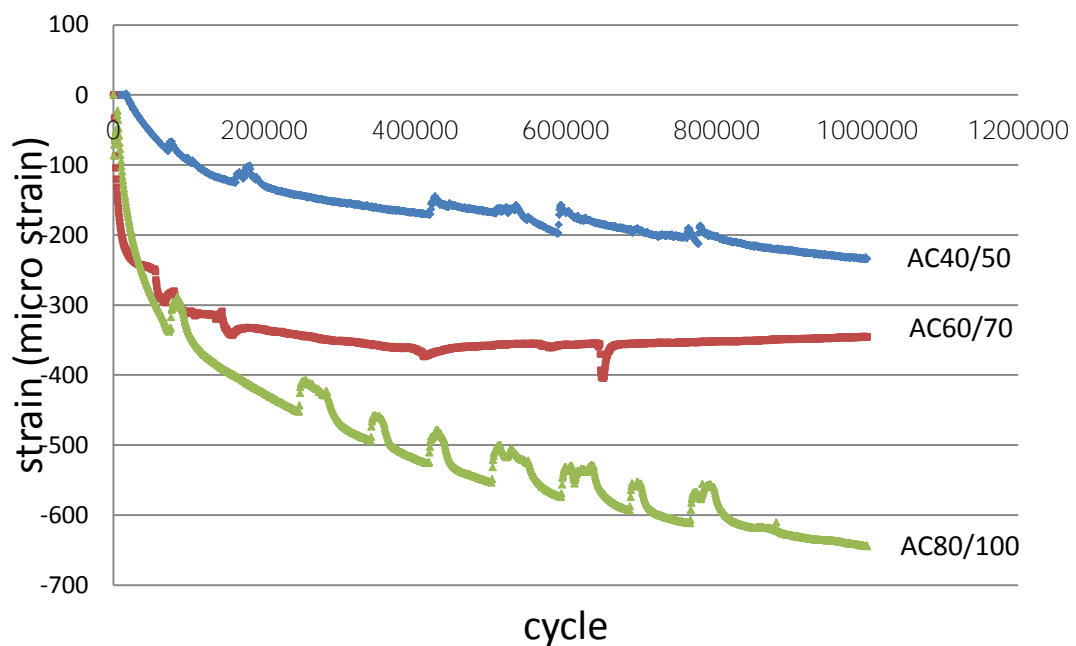
ตารางที่ 5.4 ตารางผลการทดสอบโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจากแช่น้ำ อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 24 ชม.

ชนิดตัวอย่าง	แรงกระทำ (N)	$M_r$ (MPa)	$M_r$ เฉลี่ย (MPa)
AC40/50(1)	148	1163.50	1317.38
AC40/50(2)		1471.25	
AC60/70(1)	145	1051.25	1097.00
AC60/70(2)		1142.75	
AC80/100(1)	141	966.25	809.89
AC80/100(2)		653.50	

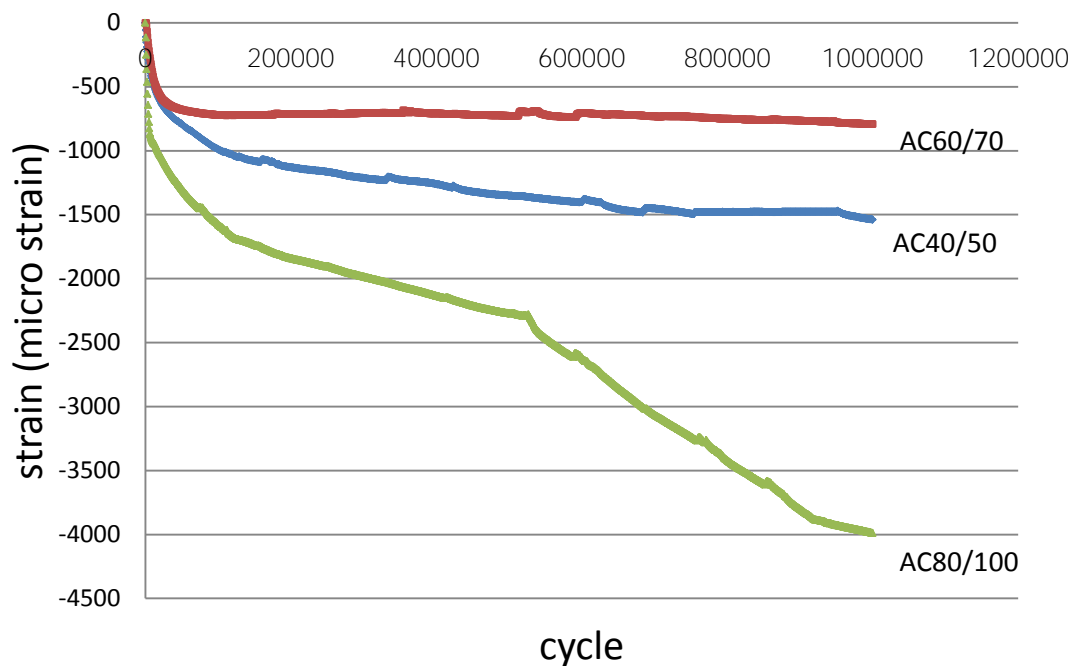
ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าเกรดการเจาะลึกน้อยกว่า จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวมากกว่าเมื่อทดสอบในอุณหภูมิเท่ากัน

#### 5.4 การทดสอบความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Fatigue Test)

ผลการทดสอบค่าความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตพบว่าที่อุณหภูมิ 10°C แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50 มีค่าความเครียดดึงสูงสุด ซึ่งรองลงมาคือ แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 และ AC 80/100 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 โดยค่าความเครียดดึงที่เกิดขึ้นที่รอบที่ 1,000,000 ของการทดสอบ แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 มีค่าเท่ากับ -233 - 345 และ -644 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 25 °C แล้วพบว่าค่าความเครียดดึงที่เกิดขึ้นกับแอสฟัลติก คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 และ AC 80/100 มีค่าเท่ากับ -1539 -791 และ -3989 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึง กับจำนวนครั้งที่กระทำในการทดสอบความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 10°C



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึง กับจำนวนครั้งที่กระทำในการทดสอบความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 25°C

จากการทดสอบการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตยังสามารถใช้ผลการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัวได้ โดยพบว่าที่ 10°C แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 80/100 มีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงสุด รองลงมาคือ AC 40/50 และ AC 60/70 คือมีค่าเท่ากับ 308 244 และ 349 MPa ตามลำดับ และที่ 25°C แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 มีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงสุด รองลงมาคือ AC 80/100 และ AC 40/50 คือมีค่าเท่ากับ 120 142 และ 124 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.5

เมื่อพิจารณาพบว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าเกรดการเจาะลึกสูงมีค่าการล้ามากกว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าเกรดการเจาะลึกต่ำ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำ ความชื้นจะมีผลต่อค่าการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 5.5 ตารางผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจากแช่น้ำ อุณหภูมิ 10 และ 25°C เป็นเวลา 24 ชม. ในการทดสอบการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต

ชนิดตัวอย่าง	แรงกระทำ (N)	$M_r$ (MPa)
10°C		
AC40/50	1506	308.459
AC60/70	1171	244.391
AC80/100	1642	349.594
25°C		
AC40/50	585	120.898
AC60/70	689	142.968
AC80/100	580	124.776

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 การทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Permanent Deformation Test)

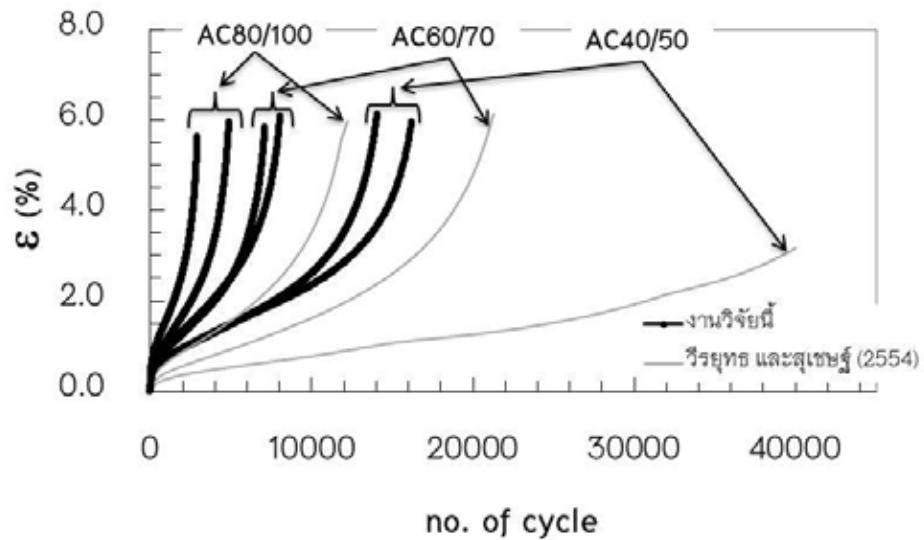
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของเกรดแอสฟัลต์ที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต ภายใต้ผลกระทบเนื่องจากความชื้นด้วยการประยุกต์ใช้การทดสอบการล้มแบบพลวัตจากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของความชื้นมีผลกระทบอย่างมากต่อการยุบตัวถาวรโดยกำลังต้านทานการยุบตัวถาวรจะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30-40 โดยจะสังเกตได้จากค่าแรงกระทำที่จุดเสียรูปทั้งนี้เพราะน้ำหรือความชื้นที่แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตและไม่สามารถไหลหรือซึมออกมาได้หมดอย่างอิสระ ทำให้ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตเสียหายก่อนเวลาอันควร

นอกจากนั้นผลการทดสอบยังสามารถสรุปได้อีกว่าอิทธิพลของเกรดแอสฟัลต์มีผลต่อการยุบตัวแบบถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้ผลกระทบเนื่องจากความชื้นด้วยซึ่งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC 40/50 สามารถต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวรได้มากที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างผสมด้วย AC 60/70 และ AC80/100 ตามลำดับ โดยสังเกตจากค่าของแรงกระทำที่จุดเสียรูปของตัวอย่างผสมด้วย AC 40/50 จะมีค่าสูงที่สุด และค่าพารามิเตอร์  $b$  ของตัวอย่างผสมด้วย AC 80/100 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างผสมด้วย AC 60/70 และ AC 40/50 ตามลำดับ

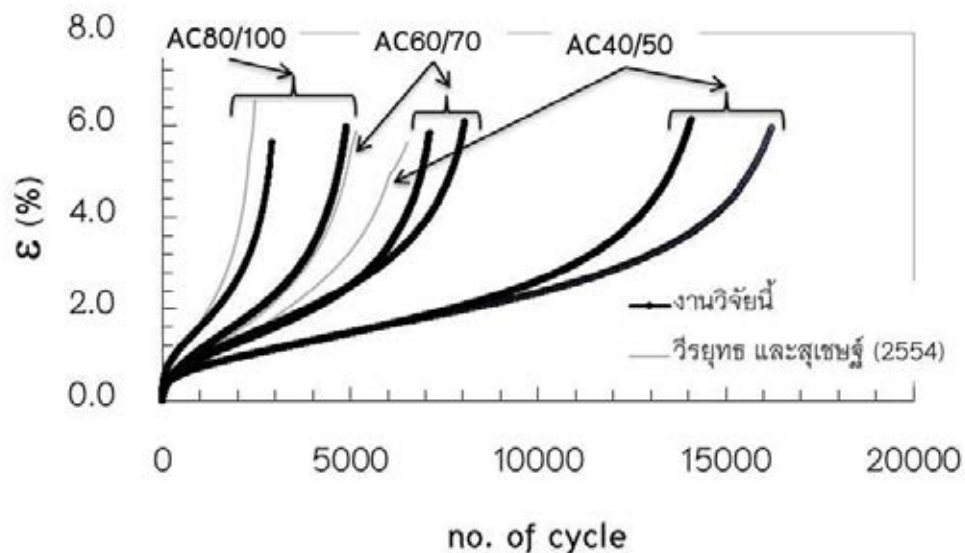
ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าการเจาะลึกต่ำกว่าจะสามารถต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวรได้มากกว่าตัวอย่างผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าการเจาะลึกสูงกว่าเมื่อถูกแรงกระทำในระดับที่เท่ากันและภายใต้ผลของความชื้นและอุณหภูมิเดียวกัน

เมื่อนำผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการต้านทานการยุบตัวถาวรแบบแห้งของ วีรยุทธและสุเชษฐ์ (2554) ที่ทำการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมยาง AC 40/50 AC60/70 และ AC80/100 โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการทดสอบการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 40°C และ 50°C ซึ่งเมื่อนำผลการยุบตัวถาวรเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับผลการยุบตัวถาวรแบบแห้งที่ 40°C ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จะพบว่าการต้านทานการยุบตัวถาวรจะลดลงประมาณร้อยละ 30-40 แต่ถ้าในกรณีนำผลเดียวกันนี้มาเปรียบเทียบกับผลการยุบตัวถาวรแบบแห้งที่ 50°C ดังแสดงในรูปที่ 6.2 พบว่าการต้านทานการ

ยุบตัวถาวรอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นยังคงมีค่ามากกว่า ทั้งนี้อาจสรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิความชื้น (อุณหภูมิน้ำ) นั้นมีผลต่อการยุบตัวถาวร



รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรงกระทำของการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตแบบแห้งและการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้น 40°C



รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรงกระทำของการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตแบบแห้งและการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้น 50°C

## 6.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test)

จากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความชื้นของแอสฟัลติกคอนกรีตมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต คือในขณะที่มีอุณหภูมิเดียวของความชื้นเดียวกัน แอสฟัลติกคอนกรีตที่มีเกรดการเจาะลึกต่างกัน ก็จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่างกันด้วย ซึ่งการทดสอบ ระหว่างตัวอย่างที่อุณหภูมิ 55°C ทั้งแช่น้ำและไม่แช่น้ำแล้ว พบว่าตัวอย่างที่มีการแช่ลงในน้ำมีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมมากกว่าอย่างตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการผลของความชื้นที่อยู่ภายในตัวอย่างเมื่อได้รับการทดสอบ และการที่ตัวอย่างมีผลการอายุของส่วนผสมมากขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ วีรยุทธ (2553) พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของงานวิจัยนี้ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำอุณหภูมิ 55°C มีค่ามากกว่างานวิจัยที่ผ่านมาทุกชนิดเกรดแอสฟัลต์ซีเมนต์ สรุปได้ดังตารางที่ 6.1 และนำค่ามาสรุปเพื่อเปรียบเทียบ Retaining Strength Index (RSI) ระหว่างแช่น้ำกับไม่แช่น้ำ ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อม

ชนิดตัวอย่าง	งานวิจัยนี้		วีรยุทธ (2553)
	$\sigma_{xy}$ (kPa) แช่น้ำ 55 °C	$\sigma_{xy}$ (kPa)แห้ง 55°C	$\sigma_{xy}$ (kPa)แห้ง 55°C
AC 40/50	141.801	104.564	142
AC 60/70	139.733	97.550	169
AC 80/100	133.664	99.680	197

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่า Retaining Strength Index (RSI) ระหว่างแช่น้ำกับไม่แช่น้ำ

ชนิดตัวอย่าง	$RSI = \frac{S_{water}}{S_{air}} \times 100\%$ ที่อุณหภูมิ 55°C	
	เปรียบเทียบในงานวิจัยนี้	เปรียบเทียบวีรยุทธ (2553)
AC 40/50	134.85	99.86
AC 60/70	143.24	82.68
AC 80/100	134.0	67.85

### 6.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)

จากผลการทดสอบพบว่าเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลติกคอนกรีตและความชื้นมีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัว คือแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าการเจาะลึกน้อยจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวมากที่อุณหภูมิสูง และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบกับงานวิจัยอื่นพบว่า ที่อุณหภูมิเดียว 55 °C แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผ่านการแช่น้ำมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าที่ไม่ได้แช่น้ำก่อนการทดสอบทุกเกรดการเจาะลึก จึงอาจสรุปได้ว่า ความชื้นมีผลทำให้แอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสคืนตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิอื่นที่ต่ำกว่า พบว่าที่อุณหภูมิมิมีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวมากกว่าความชื้น ความแตกต่างกันของค่าโมดูลัสคืนตัวนี้อาจมีผลเนื่องมาจากปัจจัยหลายตัวด้วยกัน เช่น วิธีการผสมตัวอย่าง ลักษณะของหิน อุณหภูมิทดสอบ และความชื้น เป็นต้น

ตารางที่ 6.3 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตภายหลังจากแช่น้ำ อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 24 ชม. ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

ชนิดตัวอย่าง	ผู้วิจัย	$M_r$ (MPa)					
		10°C	20°C	25°C	35°C	40°C	55°C
AC 40/50	วีรยุทธและสุเชษฐ (2554)	13,942	-	4,964	-	967	442
	กันวิน และคณะ (2552)	-	8,310	-	1,566	-	-
	งานวิจัยนี้ (แช่น้ำ)	-	-	-	-	-	1317
AC 60/70	วีรยุทธและสุเชษฐ (2554)	14,832	-	6,911	-	1,143	532
	ธนกร และคณะ (2552)	14,765	-	5,479	-	745	319
	กันวิน และคณะ (2552)	-	5,267	-	872	-	-
	งานวิจัยนี้ (แช่น้ำ)	-	-	-	-	-	1097
AC 80/100	วีรยุทธและสุเชษฐ (2554)	14,721	-	5,261	-	1,139	498
	งานวิจัยนี้ (แช่น้ำ)	-	-	-	-	-	810



#### 6.4 การทดสอบความต้านทานความล้าของแอสฟัลติกคอนกรีต (Indirect Tensile Fatigue Test)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าเกรดการเจาะลึกต่ำมีค่าความต้านทานการล้ามากกว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าเกรดการเจาะลึกสูง แสดงว่าที่อุณหภูมิที่ความชื้นจะมีผลต่อค่าการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นอย่างมาก

#### 6.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีต

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบค่าคุณสมบัติความต้านทานการยุบตัวถาวร การต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าปัจจัยทางด้านอุณหภูมิส่งผลกระทบเป็นอย่างมากกับตัวอย่าง คือที่อุณหภูมิสูง (55°C) ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าเกรดการเจาะลึกต่ำจะมีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า แอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าเกรดการเจาะลึกสูง มีความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรและค่าโมดูลัสคืนตัวมากกว่าเช่นเดียวกัน แต่จะมีค่าลดลงเมื่อแต่เมื่อเทียบกับแอสฟัลติกคอนกรีตเกรดการเจาะลึกเดียวกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าลงไปเรื่อยๆ โดยจะส่งผลกระทบต่อค่าการยุบตัวถาวรและค่าโมดูลัสคืนตัวมาก

เมื่อพิจารณาแอสฟัลติกคอนกรีตส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (10°C) ซึ่งแอสฟัลติก คอนกรีต จะเกิดพฤติกรรมการล้าขึ้น โดยแอสฟัลติกคอนกรีตที่สามารถต้านทานความล้าได้ดีที่สุดคือแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าการเจาะลึกต่ำกว่า แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานการล้าของแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าเกรดการเจาะลึกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการล้า

ปัจจัยด้านความชื้นก็เป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นเดียวกัน แอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้รับความชื้นจะส่งผลกระทบต่อความต้านทานการยุบตัวถาวรมากที่สุด และหากมีปัจจัยด้านอุณหภูมิมาช่วยด้วยแล้ว ยิ่งทำให้ค่าคุณสมบัติความต้านทานการยุบตัวลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีเกรดการเจาะลึกต่ำกว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้าไปซังอยู่ด้านใน ไม่สามารถไหลไปมาได้ อย่างอิสระ

## 6.6 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับแอสฟัลต์ชนิดเกรดเจาะลึกที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ทิปโก้ แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) โดยแอสฟัลต์เกรด AC60/70 และ AC80/100 เป็นแอสฟัลต์ที่ทางบริษัทได้ผลิตเพื่อจัดจำหน่ายในประเทศไทยและต่างประเทศอยู่แล้ว ส่วนแอสฟัลต์เกรด AC 40/50 นั้นปกติทางบริษัทไม่ได้ทำการผลิตดังนั้นทางบริษัทดังกล่าวจึงได้นำแอสฟัลต์เกรด AC60/70 ไปผ่านกระบวนการเป่า (Blow) ในอากาศเพื่อเร่งอายุ (Aging) ของแอสฟัลต์ให้มีความแข็งมากขึ้นจนได้ค่าเจาะลึกอยู่ในช่วงของเกณฑ์ของ AC 40/50 เป็นผลทำให้ผลการทดสอบของแอสฟัลต์ค้อนกริตที่ผสมแอสฟัลต์เกรด AC 40/50 อาจมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง

2) ตัวอย่างที่ใช้เนื่องจากมีการผสมทิ้งไว้เป็นจำนวนมาก และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน จึงอาจเกิดค่าคลาดเคลื่อนในการทดสอบเนื่องจากอายุของส่วนผสม

3) งานวิจัยนี้พยายามสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวทางของถนนจากฐานข้อมูลการวัดอุณหภูมิผิวทางในอดีต (เมื่อเกือบ 20 ปีที่แล้ว) โดยอ้างอิงวิธีการศึกษาของระบบซูเปอร์เพฟ อย่างไรก็ตามการนำสมการดังกล่าวไปใช้งานต้องพิจารณาว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานยังอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง (มากกว่า  $3^{\circ}\text{C}$ ) และค่าความแม่นยำในการทำนายผลค่อนข้างต่ำ ( $R^2 < 0.5$ )

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ชยธันธ์ พรหมศร, เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศิลาลารมย์ และวราภัทร เกตุนุติ. คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย.

2546สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

ธนกร ชมภูรัตน์,สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง และกฤษฎา ภูมิ. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต. 2551. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนกร ชมภูรัตน์,สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง และเนื่อง เหล็กขนาย. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต. 2552. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประสิทธิ์ ภูประทุม. อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวง. 2539. สำนักวิจัยและพัฒนา  
งานทาง กรมทางหลวง

วัชรินทร์ วิทย์กุล. 2551. เทคโนโลยียางมะตอยในประเทศไทย. สำนักพิมพ์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วีรยุทธ โกมลวิลาส. 2553. การศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติก คอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชา  
วิศวกรรมธรณีเทคนิค, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย

เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, ธันวิน สวัสดิ์ศานต์ และธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก. คุณสมบัติด้านการต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม. 2549. สำนักวิจัยและพัฒนา  
งานทาง กรมทางหลวง

อุตุนิยมวิทยา, กรม. สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา. 2553. สภาพภูมิอากาศประเทศไทย.

### ภาษาอังกฤษ

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1995) Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage. Washington. D.C, United State of America.

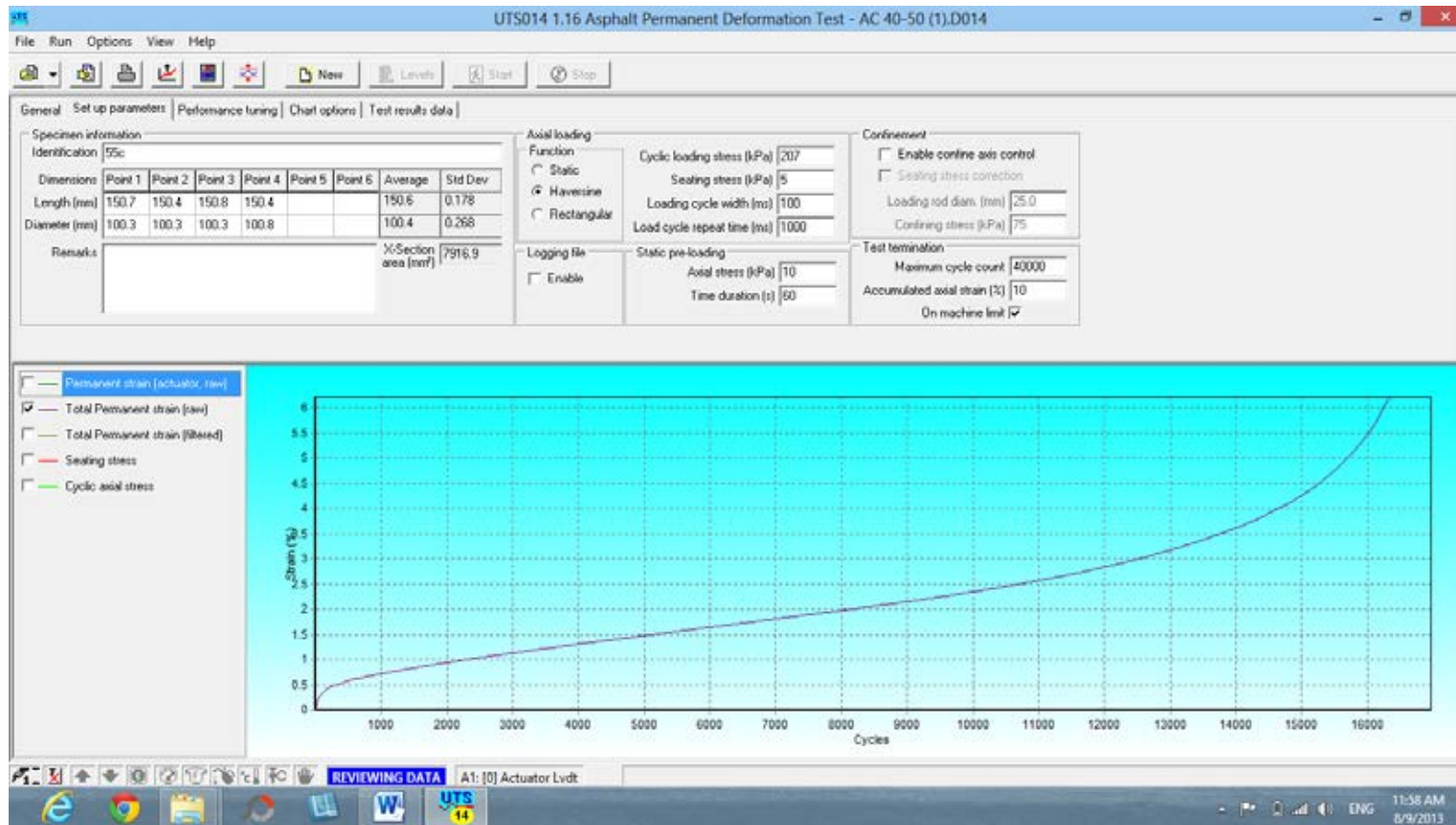
- Annual Book of ASTM Standards. 1995. 1<sup>st</sup> ed. Vol 04.03. Detroit: American Society for Testing and Materials.
- Asphalt Institute. 1995. Superpave level 1 mix design. Superpave series No. 2 (SP-1). Kentucky.
- Bosscher, P.J., Bahia, H.U., Thomas, S., Russel, J.S. 1998. Relationship Between Pavement Temperature and Weather Data: Wisconsin Field Study to Verify Superpave Algorithm. Transportation Research Record 1609, Paper No. 98-0944.
- Chompoorat, T., Likitlersuang, S., Punyatara, S., and Komolvilas, V. (2011) "An examination of moisture damage in asphaltic concrete using dynamic creep test results" Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Road and Airfield Pavement Technology on "New Horizon of Pavement Technology, 3-5 August, Bangkok, Thailand.
- FHWA, 1997. LTPP Data Analysis: Improved Low Pavement Temperature Prediction. TechBrief Publication No. FHWA-RD-97-104. Federal Highway Administration, McLean, VA.
- Huang, Y.H. 2004. Pavement analysis and design. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Huber, G.A. 1994. Weather Database for the Superpave™ Mix Design System. Report No. SHRPA-684A, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- Kanitpong, K., Charoentham, N., and Likitlersuang, S. 2011. Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit. International Journal of Pavement Engineering, Vol.13, No.5, pp.541-458.
- McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U. 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069.

- T. W. Kennedy, and A. S. Adedimila. Repeated Load Indirect Tensile Fatigue Characteristics of Asphalt Mixture. Transportation Research Record 595, Transportation Research Board, U.S.A., 1976.
- Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-basyouny, M., Tempe, A.Z., and Von quintus, H. 2001. Simple performance test for superpave mix design (NCHRP report 465). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

ภาคผนวก

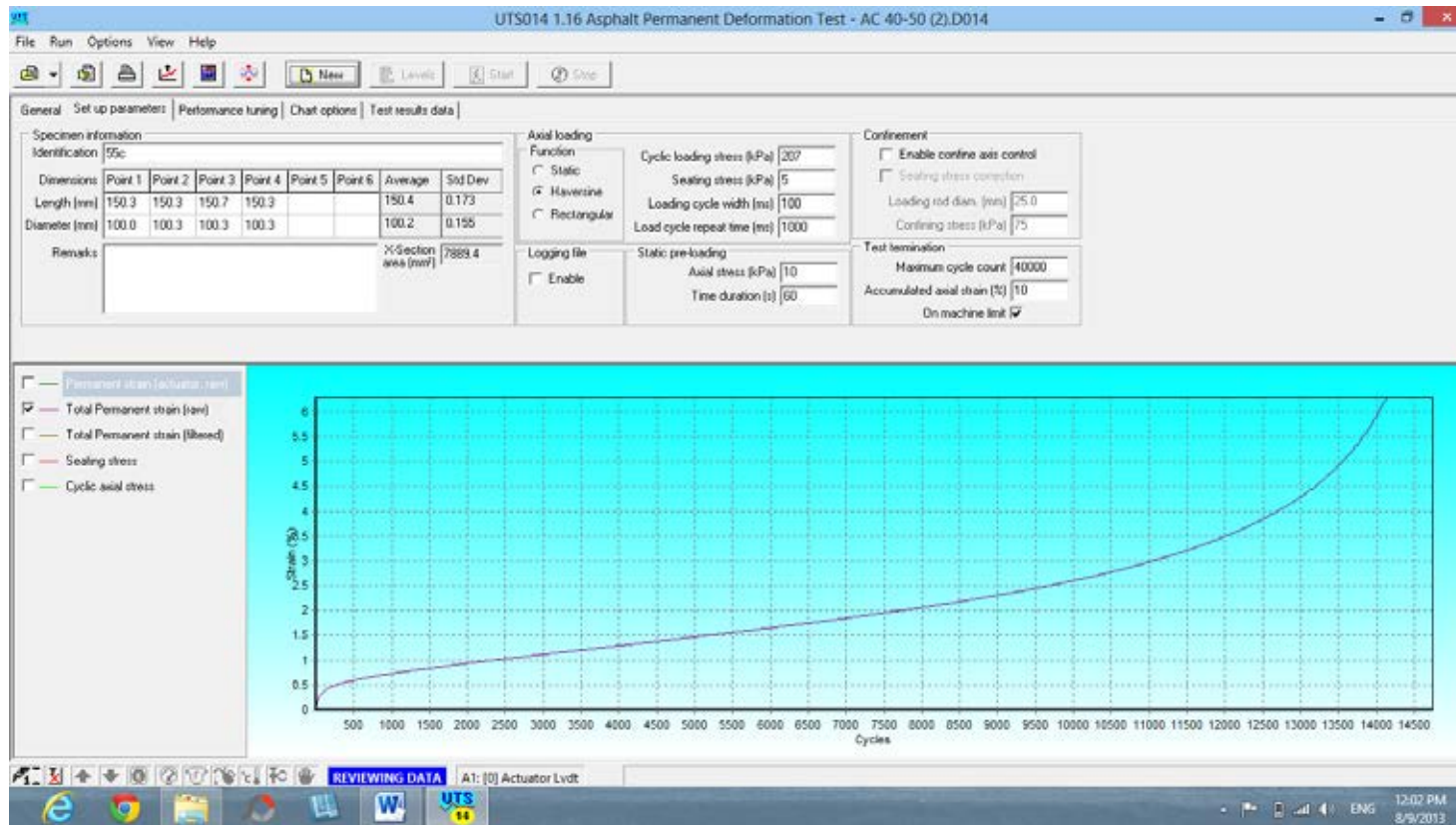
ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต

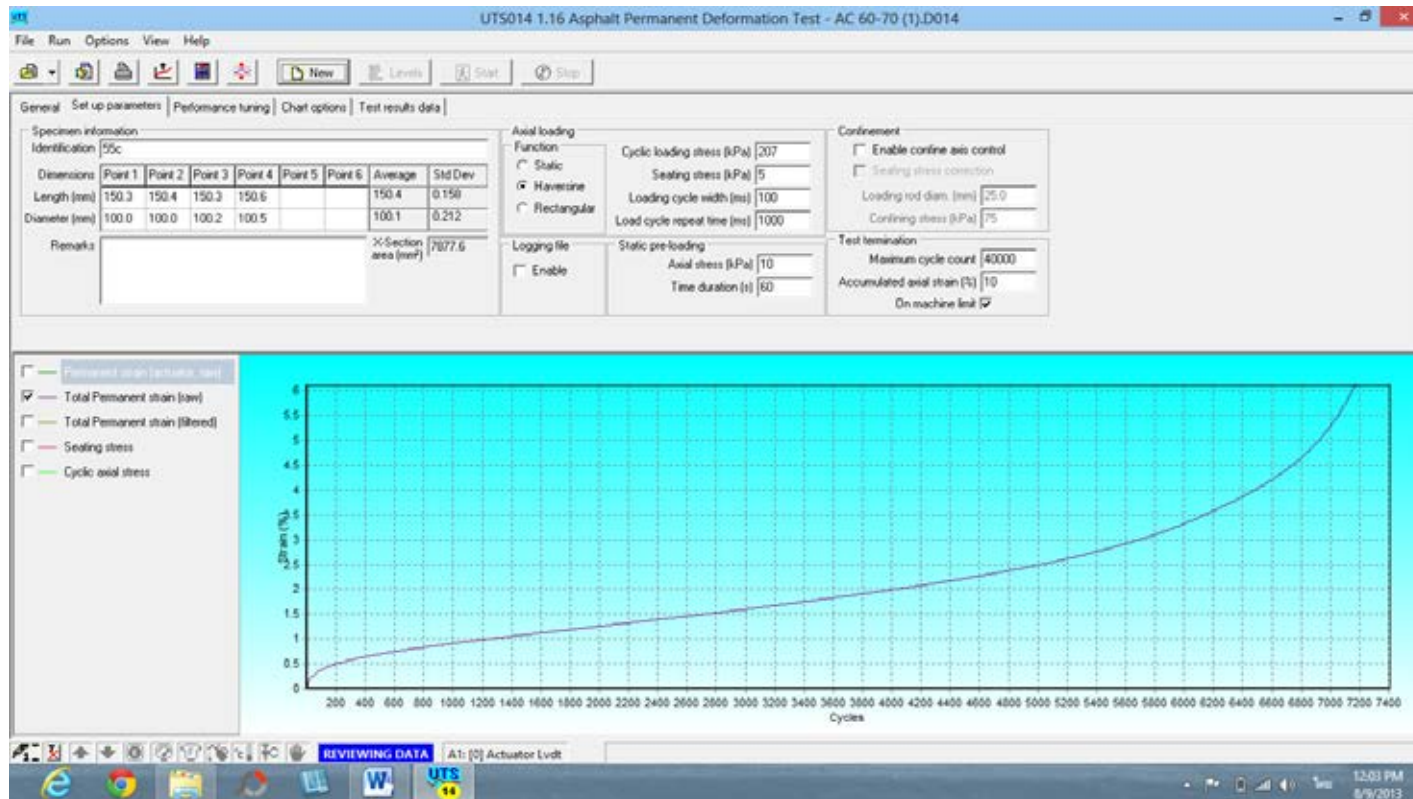


รูปที่ ก.1 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50 ตัวอย่างที่ 1

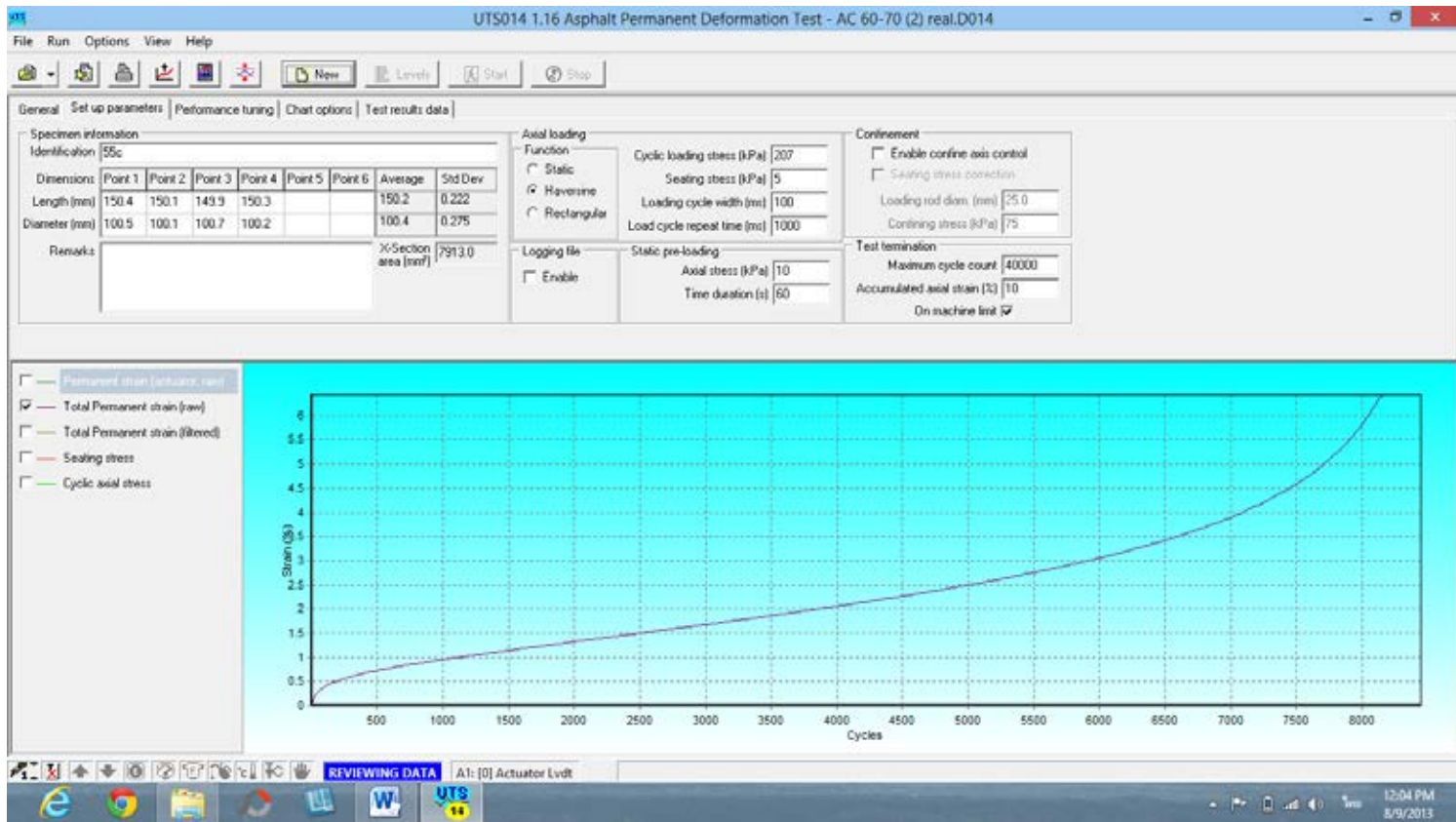




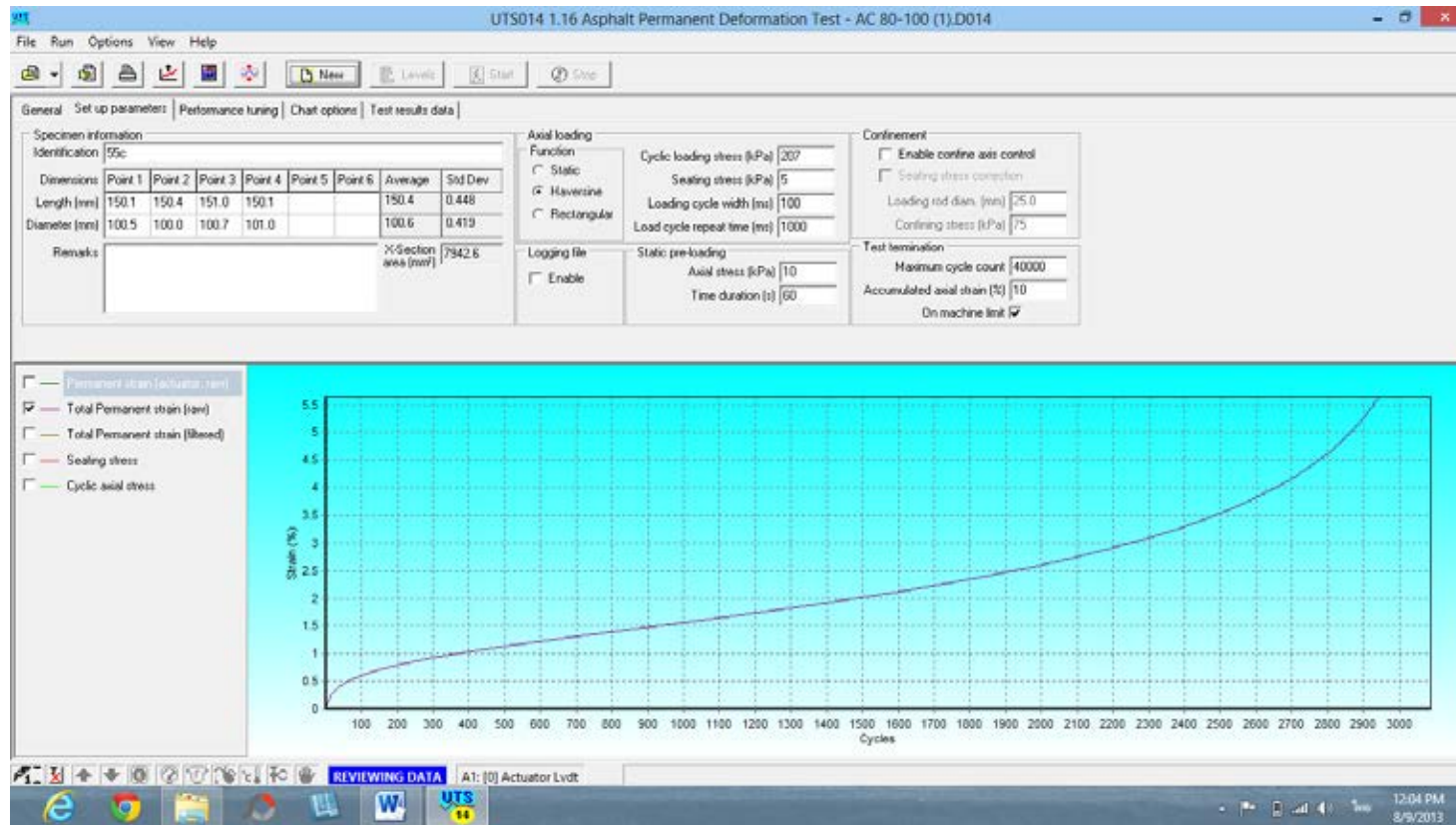
รูปที่ ก.2 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 40/50 ตัวอย่างที่ 2



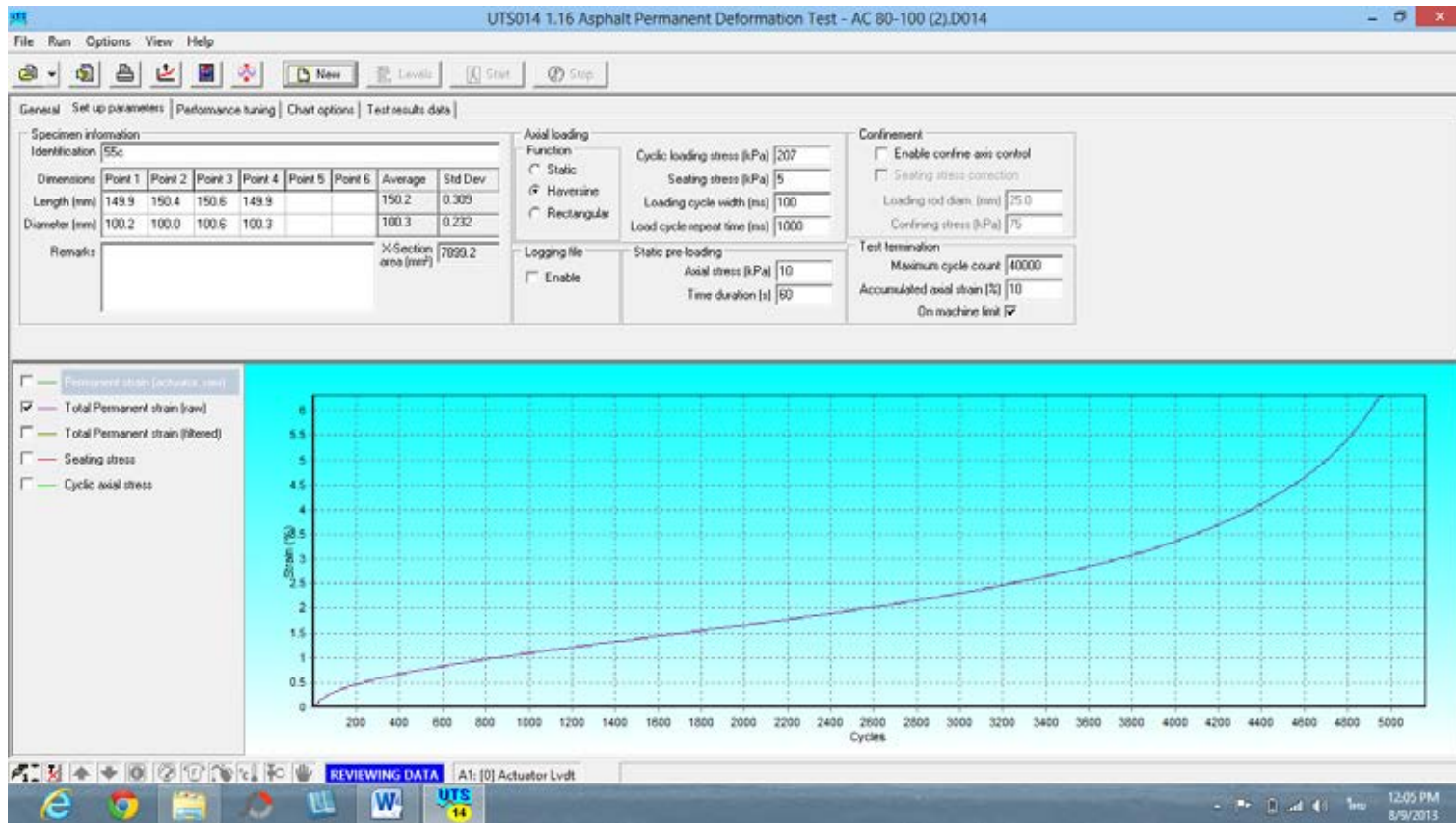
รูปที่ ก.3 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70 ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.4 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 60/70 ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ ก.5 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 80/100 ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.6 ข้อมูลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต AC 80/100 ตัวอย่างที่ 2

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

ตาราง ข.1 ตารางข้อมูลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตชั้นน้ำอุณหภูมิตั้ง 55 องศาเซลเซียส

sample	dimeter (mm)				avg.(m.)	hight (mm)		avg. (m.)	weight (g)	W <sub>dry sat</sub> (g)	W <sub>in water</sub> (g)	load (kg)
AC 40/50 (1)	66.60	66.60	66.35	66.55	0.06653	100.00	100.00	0.10000	1209.08	1217.43	711.69	138.00
AC 40/50 (2)	66.90	66.20	66.35	66.20	0.06641	100.00	99.95	0.09998	1211.62	1217.98	715.64	157.00
AC 40/50 (3)	66.60	66.60	66.65	66.65	0.06663	100.00	100.00	0.10000	1226.04	1231.10	723.45	158.00
AC 60/70 (1)	66.10	66.00	66.20	66.25	0.06614	99.90	100.00	0.09995	1203.56	1211.36	707.83	135.00
AC 60/70 (2)	65.85	65.70	65.90	65.85	0.06583	100.10	100.00	0.10005	1219.61	1224.86	723.47	153.50
AC 60/70 (3)	65.85	65.75	65.85	66.00	0.06586	100.00	100.00	0.10000	1209.54	1214.06	713.23	154.00
AC 80/100 (1)	67.70	67.55	67.50	67.60	0.06759	100.00	100.00	0.10000	1242.56	1248.29	735.04	143.50
AC 80/100 (2)	67.70	67.70	67.70	67.90	0.06775	100.00	100.00	0.10000	1237.14	1244.53	728.56	151.50
AC 80/100 (3)	66.30	66.20	66.25	66.25	0.06625	100.00	100.00	0.10000	1212.55	1220.47	715.96	136.50
$S_t=2P_{max}/ptd$ (kg/m <sup>2</sup> )	St (kPa)	Stavg.	Max load (kN)	Max load avg.(kN)								
13212.79056	129.5732129	141.80	1.35	1.48								
15061.17165	147.6996394		1.54									
15104.98202	148.1292723		1.55									
13007.79078	127.5628518	139.73	1.32	1.45								
14845.70296	145.5866133		1.51									
14893.02288	146.0506633		1.51									
13523.39913	132.6192425	133.66	1.41	1.41								
14243.07237	139.676826		1.49									
13123.42267	128.6968133		1.34									

ตาราง ข.2 ตารางข้อมูลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีตอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

sample	dimeter (mm)				avg.(m.)	hight (mm)		avg. (m.)	weight (g)	W <sub>dry sat</sub> (g)	W <sub>in water</sub> (g)	load (kg)
AC 40/50 (1)	66.75	66.60	66.10	66.25	0.06643	100.00	100.00	0.10000	1205.57	1213.12	698.71	123.00
AC 40/50 (2)	66.90	66.80	66.55	66.20	0.06661	99.95	100.00	0.09998	1216.11	1224.23	709.53	119.00
AC 40/50 (3)	66.50	66.70	66.25	66.55	0.06650	100.00	100.00	0.10000	1222.85	1230.21	714.16	92.00
AC 60/70 (1)	66.15	66.40	66.20	61.90	0.06516	100.00	100.00	0.10000	1215.39	1222.04	709.26	100.00
AC 60/70 (2)	66.75	66.35	66.40	65.90	0.06635	100.00	99.85	0.09993	1220.74	1226.29	713.25	105.00
AC 60/70 (3)	66.60	66.15	66.40	66.35	0.06638	100.00	100.00	0.10000	1214.76	1222.86	713.45	104.00
AC 80/100 (1)	67.55	67.45	67.35	67.70	0.06751	100.00	100.00	0.10000	1237.46	1245.05	723.70	94.00
AC 80/100 (2)	67.40	67.15	67.10	66.95	0.06715	100.00	101.15	0.10058	1239.55	1244.45	723.89	113.50
AC 80/100 (3)	66.95	67.55	66.80	66.85	0.06704	100.10	100.00	0.10005	1242.39	1251.36	729.98	115.00
$S_t=2P_{max}/p_{td}$ (kg/m <sup>2</sup> )	St (kPa)	Stavg.	Max load (kN)	Max load avg.(kN)								
11794.34686	115.663032	104.56	1.21	1.09								
11381.51730	111.614557		1.17									
8811.83851	86.41461641		0.90									
9774.68138	95.8568794	97.55	0.98	1.01								
10087.29130	98.92253552		1.03									
9979.96809	97.87005438		1.02									
8868.37422	86.96904232	99.68	0.92	1.05								
10704.34631	104.973778		1.11									
10921.02208	107.0986415		1.13									



ภาคผนวก ค

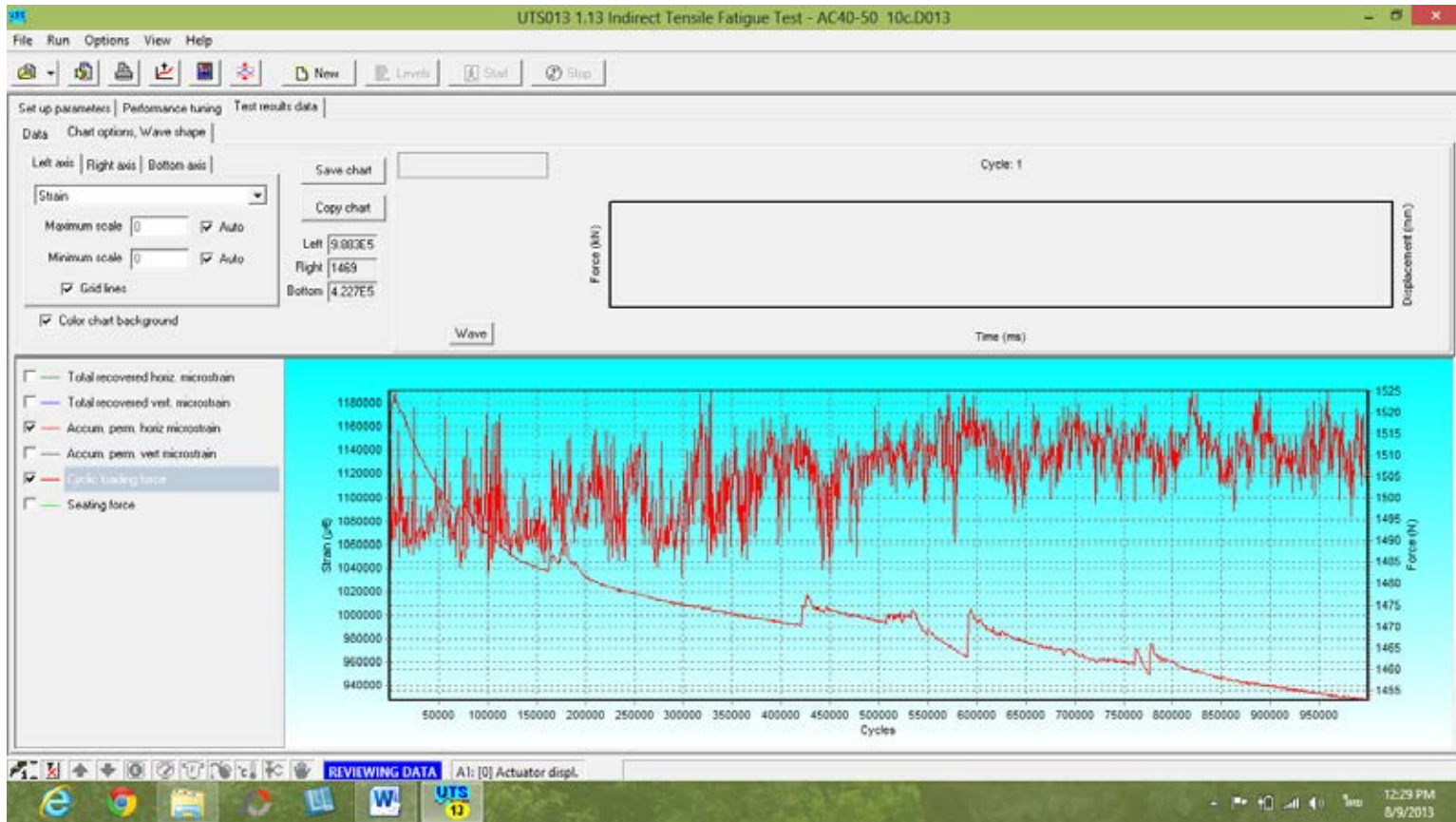
ข้อมูลการทดสอบโมดูลส์คืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต

ตาราง ค.1 ตารางข้อมูลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต แชน้ำอุณหภูมิตั้ง 55 องศาเซลเซียส

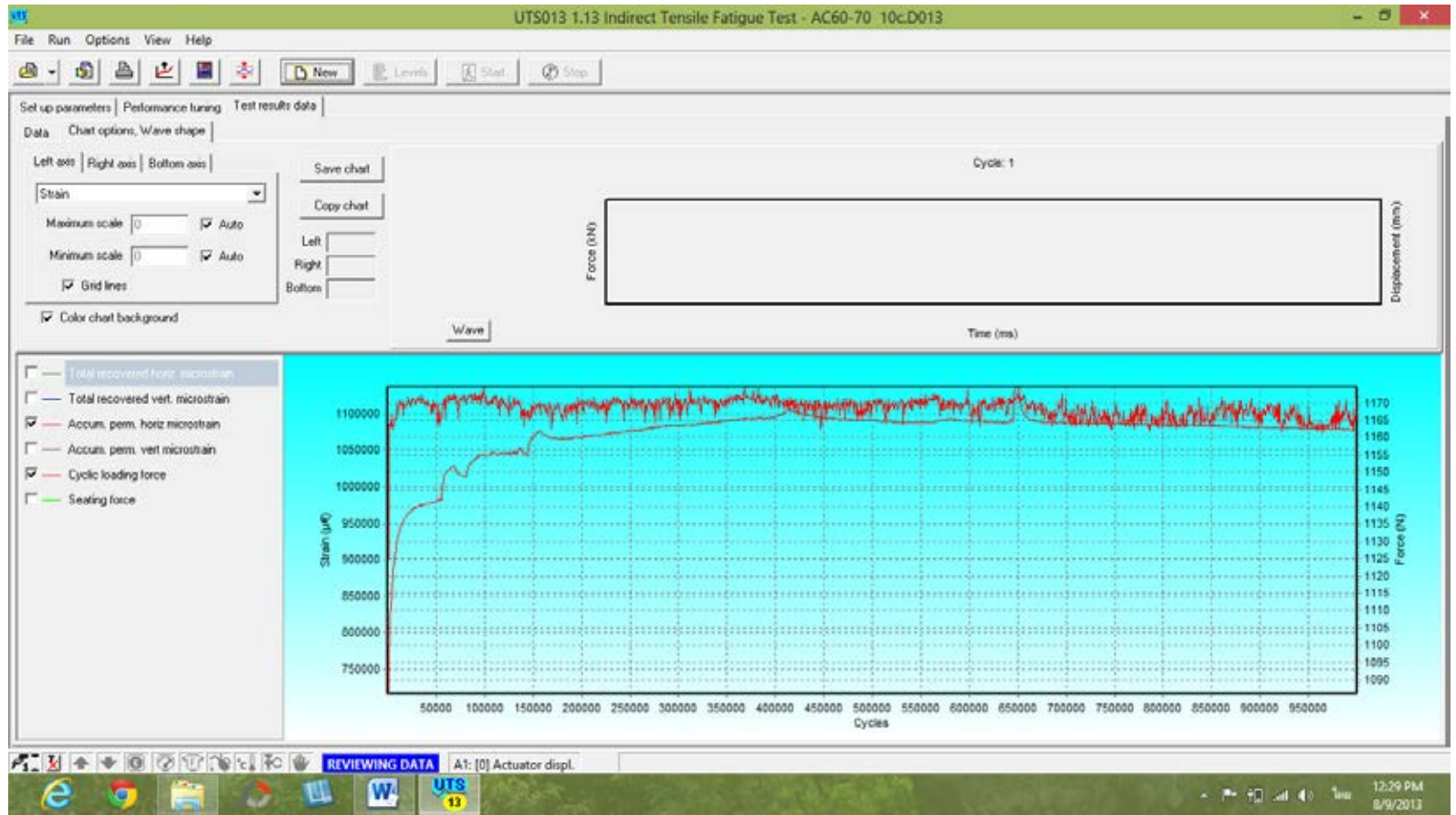
AC 40/50 (1)								ac 40/50 (2)							
Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%
1277	1320	1320	1294	1242	1291	29.31	2.27	2426	2258	2228	2225	2035	2234	124.12	5.55
1195	1148	1082	1175	1114	1143	40.67	3.56	1552	1495	1446	1418	1457	1473	46.27	3.14
1349	1299	1237	1173	1155	1243	73.66	5.93	1195	1096	1090	1039	1089	1102	51.17	4.64
1060	925	1015	887	999	977	62.62	6.41	1087	1183	1058	1044	1009	1076	58.78	5.46
11.7	19.5	10.9	16.3	10.6	13.8	3.51	25.42	21.1	8.6	10	16.5	17.7	14.8	4.75	32.14
AC 60/70 (1)								ac 60/70 (2)							
Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%
1931	1817	1807	1836	1853	1849	44.23	2.39	1629	1605	1461	1525	1463	1536	70.11	4.56
907	829	837	830	838	848	29.45	3.47	1341	1197	1310	1337	1284	1294	52.34	4.05
835	753	734	730	702	751	45.27	6.03	1066	980	938	920	902	961	58.29	6.06
851	789	732	716	698	757	55.99	7.39	868	802	744	746	742	780	49.3	6.32
AC 80/100 (1)								ac 80/100 (2)							
Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	SD	CV%
1465	1417	1425	1414	1362	1417	32.87	2.32	877	866	848	881	836	861	16.92	1.96
1033	891	881	941	884	926	57.71	6.23	799	704	694	686	661	709	47.11	6.65
837	746	771	765	732	770	36.13	4.69	546	512	491	508	496	511	19.37	3.79
851	752	725	723	707	752	51.86	6.9	561	527	523	522	533	533	14.27	2.68

ภาคผนวก ง

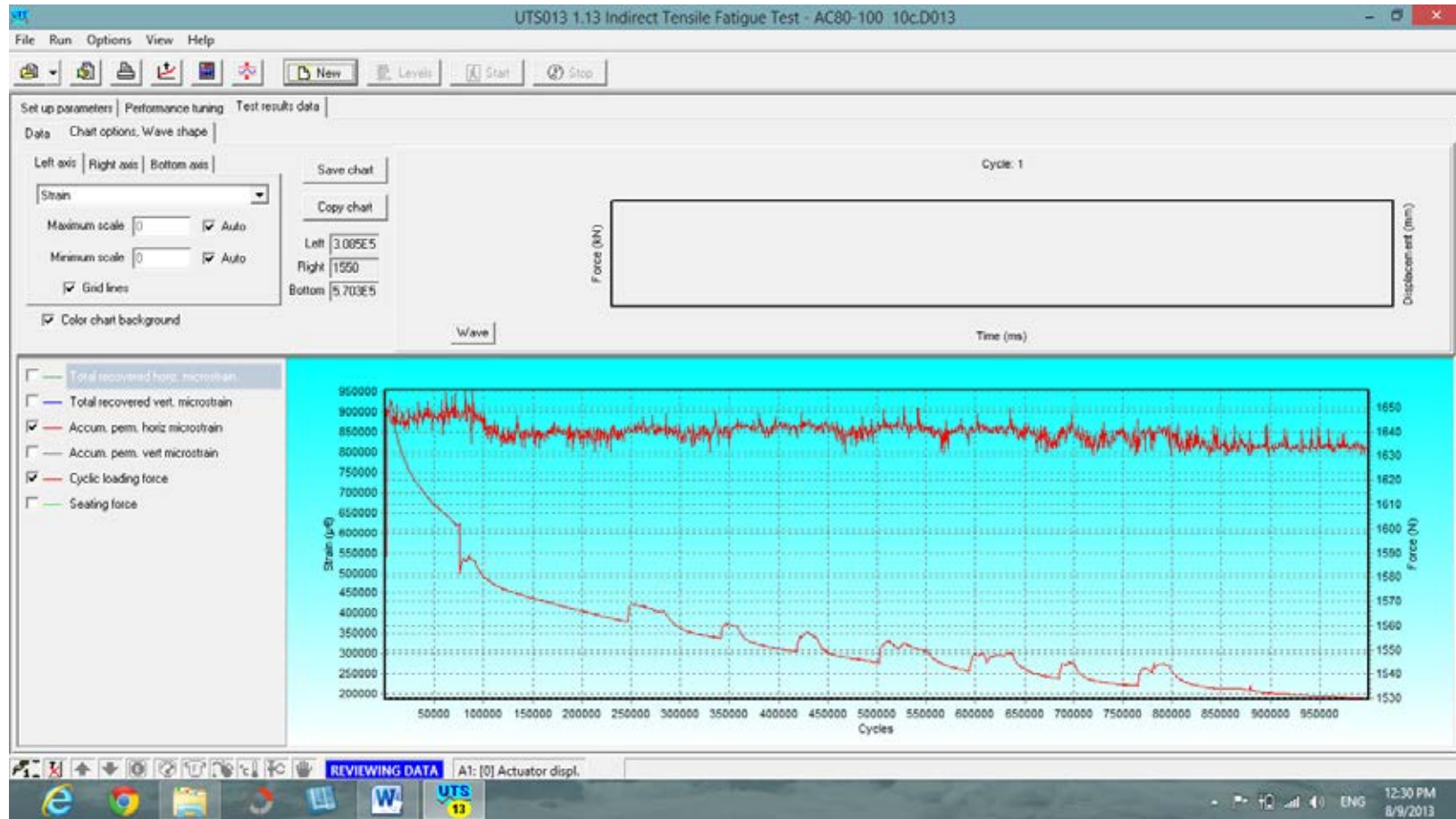
ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้า



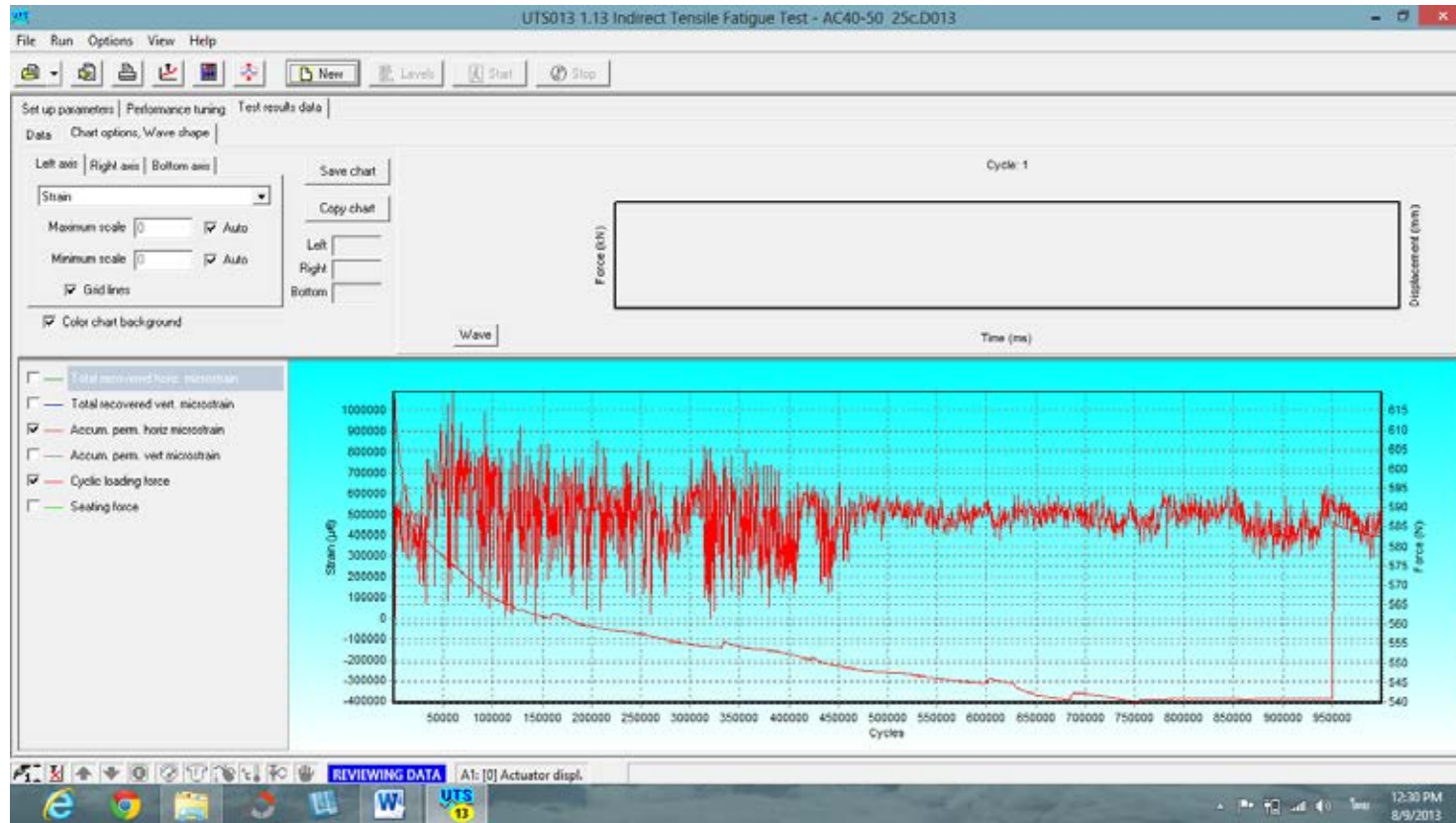
รูปที่ ง.1 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิทดสอบ 10 องศาเซลเซียส AC 40/50



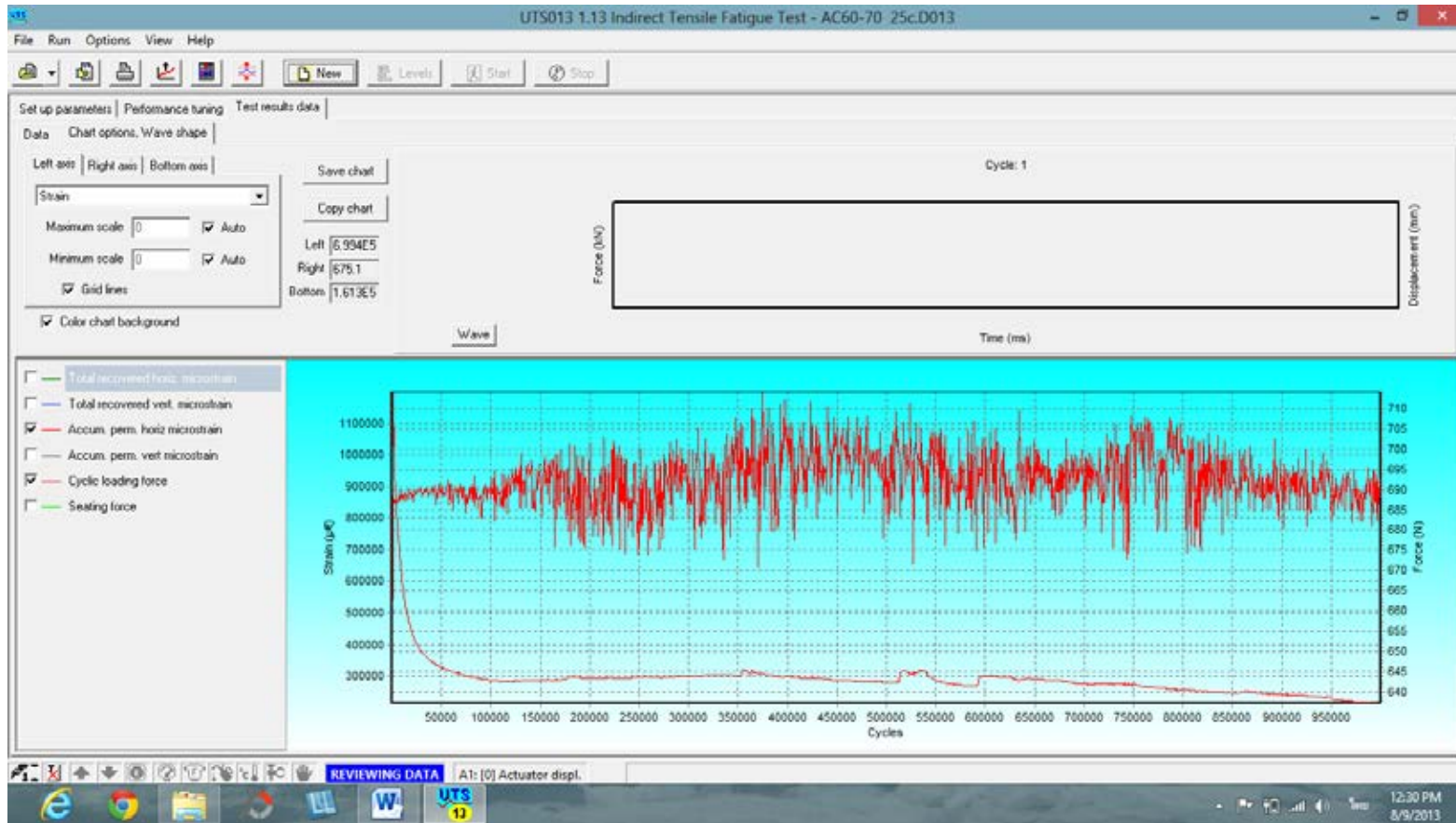
รูปที่ 1.2 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟัลติกคอนกรีตอุณหภูมิทดสอบ 10 องศาเซลเซียส AC 60/70



รูปที่ ง.3 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟัลติกคอนกรีตอุณหภูมิทดสอบ 10 องศาเซลเซียส AC 80/100

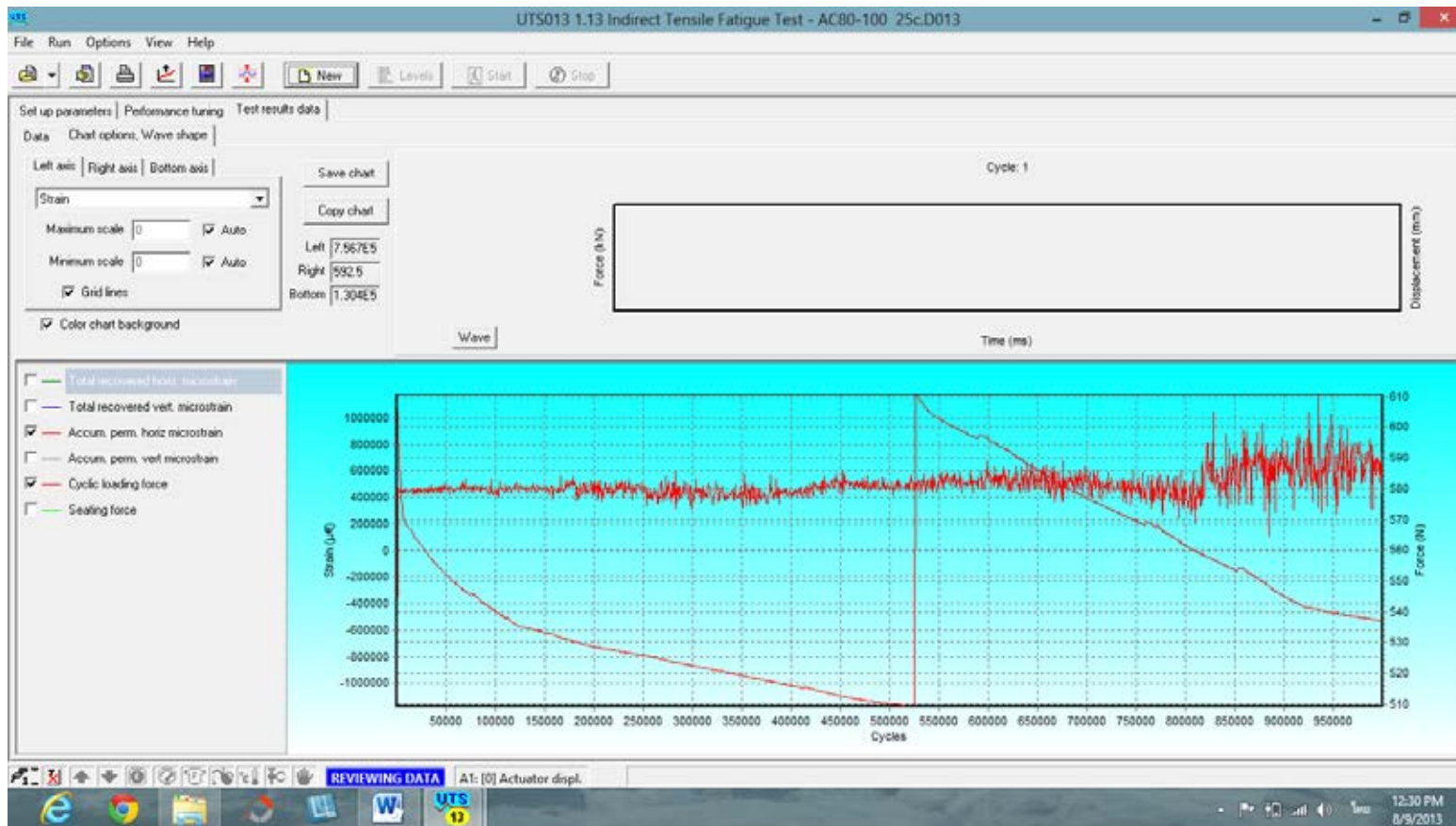


รูปที่ ง.4 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟัลติกคอนกรีตอุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส AC 40/50



รูปที่ 5.5 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟัลติกคอนกรีตคุณภาพทดสอบ 25 องศาเซลเซียส AC 60/70





รูปที่ ง.6 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานความล้าแอสฟ้าติกคอนกรีตอุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส AC 80/100

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ศิริลักษณ์ จักรเพชร เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร แต่ได้รับการเลี้ยงดูที่จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2552