

การศึกษาแบบจำลองความล้าภายใต้หน่วยแรงโก่งจากความลาดชัน
อุณหภูมิตนคอนกรีตประเทศไทยโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์

A STUDY OF FATIGUE MODELS UNDER WARPING STRESS
FOR CONCRETE ROAD IN THAILAND
USING ANALYTICAL METHOD

กฤษฎี เมลืองนนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาแบบจำลองความล่าช้าภายใต้หน่วยแรงโค้งจากความลาดชัน
อุณหภูมิตนคอนกรีตประเทศไทยโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์

กฤษฎี เมลืองนนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาแบบจำลองความล้าภายใต้หน่วยแรงโก่งจากความลาดชัน
อุณหภูมิในถนนคอนกรีตประเทศไทย โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์

A Study of Fatigue Models under Warping Stress for Concrete Road in
Thailand Using Analytical Method

ชื่อ - นามสกุล

นายกฤษฎี เมลืองนนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

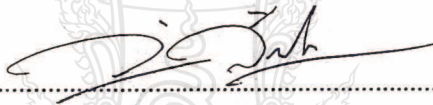
2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)



กรรมการ

(อาจารย์วัชร สัตยาประเสริฐ, D.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์ศุภสิทธิ์ พงศ์สิวะสถิตย์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 28 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองความล้าภายใต้หน่วยแรง โกงงอจากความลาดชัน อุณหภูมิในถนนคอนกรีตประเทศไทยโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์
ชื่อ - นามสกุล	นายกฤษฎี เมลืองนนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์คำ, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

ความเสียหายวิกฤตในถนนคอนกรีตประเภทมีรอยต่อตามขวางตามวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์คือรอยร้าวตามขวางเนื่องจากความล้า ซึ่งเกิดจากน้ำหนักปริมาณจราจรและความลาดชันอุณหภูมิร่วมกัน ในขณะที่วิธีการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยยังคงยึดเอาวิธีเชิงประจักษ์มาใช้ ซึ่งไม่ได้แยกพิจารณาผลจากความลาดชันอุณหภูมิในกระบวนการวิเคราะห์ความล้า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาแบบจำลองความล้าภายใต้หน่วยแรง โกงงอจากความลาดชันอุณหภูมิ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีต เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทยด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตเชิงประจักษ์ในประเทศไทย และวิเคราะห์ความล้าด้วยแบบจำลองความล้าที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาพบว่าหน่วยแรง โกงงอจากความลาดชันอุณหภูมิที่สถานะวิกฤตของ Eisenmann ให้ค่าเกินกว่าหน่วยแรงเทียบเท่าจากวิธีเชิงประจักษ์ของกรมทางหลวง ขณะที่ผลการวิเคราะห์ความล้าด้วยแบบจำลองความล้าจากฐานข้อมูลโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความล้าจากวิธีเชิงประจักษ์ของกรมทางหลวงเฉพาะในกรณีที่ไม่พิจารณาหน่วยแรง โกงงอจากความลาดชันอุณหภูมิ

คำสำคัญ: แบบจำลองความล้า ความลาดชันอุณหภูมิ หน่วยแรง โกงงอจากความลาดชันอุณหภูมิ ถนนคอนกรีต

Thesis Title	A Study of Fatigue Models under Warping Stress for Concrete Road in Thailand Using Analytical Method
Name - Surname	Mr. Krit Maluangnont
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Puttapon Thongindam, Dr.-Ing.
Academic Year	2015

ABSTRACT

In mechanistic-empirical design method, one of the distresses in jointed concrete roads is the transverse fatigue cracking. These cracks usually occur as a result of both repeated load applications from traffic and warping due to temperature gradient. Currently, the design standard for Portland cement concrete roads of the Department of Highway in Thailand is based on empirical design method. In this method, the effect of temperature gradient is not separately analyzed.

Hence, this research aimed to study fatigue models under warping stress for concrete roads in Thailand. The temperature data from the test section were analyzed to find out the responses of the concrete road structure by using analytical method and compared with the results from the empirical method. In addition, the responses were analyzed for fatigue analysis procedures in different fatigue models.

The results showed that the maximum warping stress at critical point based on Eisenmann method was greater than equivalent edge stress using the empirical design method. However, the results from the fatigue analysis using fatigue models from the database of commercial computer software were consistent with the results from the fatigue analysis using empirical method without including the effects of warping stress.

Keywords: fatigue models, temperature gradient, warping stress, concrete road

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.บุญชัย ผึ้งไฝงาม ประธานกรรมการสอบ ดร.ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย์ กรรมการสอบ และ ดร.วัชรระ สัตยาประเสริฐ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในจุดที่ข้าพเจ้าบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และมีคุณค่าในองค์ความรู้ทางวิศวกรรม ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องด้วยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการดำรงรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางแบบแกร่งภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย” ซึ่งมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประภาส ทองประไพ เป็นหัวหน้าโครงการฯ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ เป็นผู้ร่วมวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่อนุมัติทุนสนับสนุนทุนวิจัยโครงการดังกล่าว

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและความรู้ทางวิศวกรรมจนผู้วิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTR) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตลอดจนถึงอำนวยความสะดวกและสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บุคลากร สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณ น้องณัชนาภรณ์ ชุ่มชวย (เนย) ที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างยิ่ง และน้องปิยฉัตร เขมาภิรักษ์ (นุ่น) สำหรับความรักและกำลังใจที่มีให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอมอบความดีและความสำเร็จทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ที่ล่วงลับ พี่น้อง รุ่งพีและรุ่งน้อมจากภาควิชาวิศวกรรมโยธาและคนรักของข้าพเจ้าทุกคน ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนจนทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี

กฤษฎี เมลืองนนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	11
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	14
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 โครงสร้างผิวทางถนนคอนกรีตในประเทศไทย.....	16
2.2 ลักษณะของสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย.....	20
2.3 พฤติกรรมโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิและการเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม.....	23
2.4 หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ (Warping stress).....	27
2.5 หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกจราจร (Loading stress).....	33
2.6 วิธีการออกแบบความหนาผิวทางคอนกรีตของ Portland Cement Association 1984..	36
2.7 การวิเคราะห์ความล้า (Fatigue analysis).....	43
2.8 แบบจำลองความล้า (Fatigue models).....	44
2.9 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างผิวทาง PAVERS.....	47
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 แปลงทดสอบในสนาม	51
3.3 วิธีการดำเนินงาน	53
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	59
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม	59
4.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงจากถนนจำลอง JRCP	67
4.3 ผลการวิเคราะห์ความด้า	71
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการศึกษา	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากแปลงทดสอบ.....	83
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม PAVERS 2.80.....	91
ภาคผนวก ค. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	101
ประวัติผู้เขียน	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในแต่ละฤดูกาล	21
ตารางที่ 2.2 สถิติอุณหภูมิสูงสุดของประเทศไทยในฤดูร้อน	22
ตารางที่ 2.3 ค่า k สำหรับชั้นรองพื้นทางวัสดุไม่มีความเชื่อมั่นแน่น	38
ตารางที่ 2.4 ค่า k สำหรับชั้นรองพื้นทางวัสดุมีความเชื่อมั่นแน่น	38
ตารางที่ 2.5 หน่วยแรงเทียบเท่า กรณีแผ่นพื้นมีไหล่ทางคอนกรีต	40
ตารางที่ 2.6 หน่วยแรงเทียบเท่า กรณีแผ่นพื้นไม่มีไหล่ทางคอนกรีต	41
ตารางที่ 2.7 ฐานข้อมูลแบบจำลองความด้าในโปรแกรม PAVERS	48
ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งการเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลา... 52	52
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลถนนจำลอง JRCP สำหรับ PAVERS 2.80.....	57
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลขนาดและตำแหน่งนำหน้าหนักเพลาดัดเดี่ยวมาตรฐานสำหรับ PAVERS 2.80	57
ตารางที่ 4.1 หน่วยแรงเทียบเท่าจากน้ำหนักเพลาดัดเดี่ยวในถนนจำลอง JRCP	71
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบจำนวนที่ขยับคืบที่ยอมรับได้ด้วยอัตราส่วนของหน่วยแรงจากการวิเคราะห์ ด้วยทฤษฎี Westergaard และ Eisenmann.....	72
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความด้าในถนนจำลอง JRCP.....	74

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 รอยร้าวตามขวางในผิวทางคอนกรีต	12
รูปที่ 1.1 การกระจายน้ำหนักลงชั้นฐานรองรับของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต	17
รูปที่ 2.2 ถนนประเภทไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง	18
รูปที่ 2.3 ถนนประเภทเสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง	19
รูปที่ 2.4 สถิติอุณหภูมิสูงสุดของระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงมิถุนายนของพื้นที่จังหวัดปทุมธานี.....	22
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีต.....	23
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการโก่งงอเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่าง	24
รูปที่ 2.7 ผลจากการศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอของผิวทางคอนกรีตของ Sidique และคณะ	25
รูปที่ 2.8 แผ่นพื้นสำหรับคำนวณหน่วยแรงด้วยทฤษฎีของ Bradbury	29
รูปที่ 2.9 แผนภูมิสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C.....	30
รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการโก่งงอของ Eisenmann	31
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการพิจารณาหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรจรด้วยทฤษฎี Westergaard	34
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตกับค่าโมดูลัสการแตกหัก	37
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งหน่วยแรงค้ดวิกฤตเมื่อน้ำหนักเพลากระทำแผ่นพื้น	39
รูปที่ 2.14 แผนภูมิสำหรับวิเคราะห์จำนวนเที่ยวรถที่ข้อมให้จากการวิเคราะห์ความล้า	42
รูปที่ 2.15 ตำแหน่งค่าการทรุดตัววิกฤตเมื่อน้ำหนักเพลากระทำแผ่นพื้น	43
รูปที่ 3.1 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลารุ่น HIOKI LR8400-20.....	50
รูปที่ 3.2 แปลงทดสอบในสนาม.....	51
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ	52
รูปที่ 3.4 การนำเข้าความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิในโปรแกรม PAVERS 2.80....	53
รูปที่ 3.5 ถนนจำลอง JRCP กรณีมีรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่น	55
รูปที่ 3.6 ขนาดของน้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดังมาตรฐานกระทำที่กึ่งกลางขอบอิสระสำหรับวิเคราะห์ ด้วยทฤษฎีของ Westergaard	56
รูปที่ 3.7 รูปแบบการจำลองถนน JRCP มีรอยร้าวตามขวางในโปรแกรม PAVERS 2.80.....	58
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบในสนาม.....	59
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิพื้นผิวที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบในสนาม	60

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 แนวโน้มของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศในวันที่ 24 สิงหาคม	61
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศกับความลาดชันอุณหภูมิ	64
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับความลาดชันอุณหภูมิ.....	65
รูปที่ 4.6 สรุปการจำแนกความถี่การกระจายตัว.....	66
รูปที่ 4.7 แนวโน้มของหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ.....	68
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการโค้งงอของผิวทางจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี Eisenmann.....	68
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ	69
รูปที่ 4.10 แนวโน้มของหน่วยแรงโดยรวมในวันที่พบความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด	70
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความถี่จากหน่วยแรงในทฤษฎี Eisenman และ Westergaard.....	71
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี PCA 1984	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เป็นเวลากว่าครึ่งศตวรรษที่โครงสร้างผิวทางคอนกรีตเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ของประเทศไทยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ถนน ทางหลวงและชนบท, ผิวทางสนามบิน, ลานจอดรถ และท่าเรือ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในด้านการคมนาคมขนส่งทางบกหรือทางถนน ซึ่งถือได้ว่าเป็นเส้นทางหลักสำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างพื้นที่ห่างไกล อีกทั้งยังเป็นเส้นทางหลักสำหรับขนส่งสินค้าทั้งภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่หล่อเลี้ยงเศรษฐกิจของประเทศให้ดียิ่งขึ้น กรมทางหลวง (Department of Highways) ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักที่ดูแลรับผิดชอบด้านงานทางของประเทศไทยมีถนนคอนกรีต (ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง) อยู่ในความดูแลและรับผิดชอบเป็นระยะทางถึง 1,764 กม. [1] ด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีความแข็งแรง (Rigidity) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ถนนคอนกรีตจึงถูกนำมาใช้เป็นเส้นทางรองรับการสัญจรของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักสูงในย่านอุตสาหกรรม แม้ว่าถนนคอนกรีตจะมีงบประมาณในการก่อสร้างสูงกว่าถนนแอสฟัลต์คอนกรีต แต่เมื่อเปรียบเทียบในระยะยาวแล้ว ถนนคอนกรีตจะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำกว่า [2] และยังมีอายุการใช้งานโดยประมาณ 25 ถึง 40 ปี หรือประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่าของอายุการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต [3]

ถนนคอนกรีตในประเทศไทยนิยมใช้ถนนประเภทเสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP) [4] เนื่องจากถนน JRCP มีระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางที่มากกว่าถนนประเภทไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง (Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP) ทำให้ลดความถี่ของจำนวนรอยต่อตามขวาง ส่งผลให้ต้นทุนและระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถนน JPCP แต่ในทางกลับกันพบว่าหนึ่งในความเสียหายวิกฤตของถนนประเภทมีรอยต่อตามขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถนน JRCP คือรอยร้าวจากความล้าตามขวางบริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้น (Transverse crack) [5],[6] ดังรูปที่ 1.1 เหล็กเสริมในถนน JRCP ทำหน้าที่เพียงแค่อพยรรอยร้าวดังกล่าวไม่ให้แยกออกจากกัน ซึ่งไม่สามารถทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักข้ามรอยร้าวได้เพียงพอ ทำให้ในระยะยาวรอยร้าวจะเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน (Faulting) นำไปสู่อายุการใช้งานที่สั้นลงได้



รูปที่ 1.1 รอยร้าวตามขวางในผิวทางคอนกรีต

จากการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ถึงสาเหตุของรอยร้าวตามขวางพบว่ามีสาเหตุมาจากน้ำหนักบรรทุกจรกระทำซ้ำๆร่วมกับพฤติกรรมการโก่งงอของผิวทางคอนกรีตภายใต้ความลาดชันอุณหภูมิ (Temperature gradient) [7] หรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างในช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิผิวบนของแผ่นคอนกรีตที่สูงทำให้ผิวบนของแผ่นคอนกรีตเกิดการขยายตัว ในขณะที่ผิวล่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการหดตัวและส่งผลให้แผ่นพื้นโก่งงอ แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักที่สูง ทำให้น้ำหนักผิวทางคอนกรีตทิ้งลงตามแรงโน้มถ่วงและเกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างในที่สุด [8]

ในปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบดูแลด้านงานทางในประเทศไทยยังคงใช้วิธีเชิงประจักษ์ (Empirical design method) ของ Portland Cement Association ฉบับปี ค.ศ. 1984 (PCA 1984) สำหรับออกแบบถนนคอนกรีต โดยที่วิธีดังกล่าวต้องอาศัยข้อมูลเชิงประสบการณ์เป็นระยะเวลานาน อาทิเช่น ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ, การทดสอบพฤติกรรมของถนนทดสอบขนาดจริงในสนาม เพื่อสร้างแผนภูมิสำหรับออกแบบความหนาของถนนคอนกรีต โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความล้าจากน้ำหนักบรรทุกจร (Fatigue analysis) และการวิเคราะห์การสึกกร่อนของผิวทางจากปัจจัยอื่นๆ โดยรวม (Erosion analysis) มาพิจารณาในการออกแบบร่วมกัน ในขณะที่อายุการใช้งานของโครงสร้างผิวทางคอนกรีตที่สั้นลงเกิดได้จากหลากหลายสาเหตุเช่น การก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน, การคัดเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสม รวมถึงปัญหาจากการออกแบบโครงสร้าง [3] โดยกระบวนการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่มีการแยกพิจารณาผลกระทบจากการโก่งงอของผิวทางเนื่องจากความลาดชัน

อุณหภูมิแต่อย่างใด ดังนั้นการคำนึงถึงผลกระทบจากความลาดชันอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับถนนคอนกรีตในประเทศไทยที่ต้องเผชิญกับสภาพอากาศที่ค่อนข้างร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปีประมาณ 27 °ซ. และสามารถเพิ่มสูงกว่า 40 °ซ. ในฤดูร้อน [9] มีความจำเป็นและไม่อาจละเลยได้ใน การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างผิวทางคอนกรีต

จากทฤษฎีการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างผิวทางจากความลาดชันอุณหภูมิเชิงวิเคราะห์ เช่น Westergaard, Eisenmann หรือการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทำให้หลายประเทศได้เลือกใช้วิธีเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ (Mechanistic-empirical design method) ในการออกแบบโครงสร้างผิวทางคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงด้วยทฤษฎีทางกลศาสตร์ร่วมกับแบบจำลองความล้า (Fatigue model) ที่เป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างผิวทางในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกจากปริมาณจราจรและจากความลาดชันอุณหภูมิตลอดอายุการใช้งาน โดยในปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้มีการค้นคว้าและพัฒนาแบบจำลองความล้าสำหรับออกแบบโครงสร้างผิวทางเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้มีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อศึกษาแบบจำลองความล้าของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต ภายใต้หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมของประเทศไทยโดยใช้ฐานข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีต ในการศึกษาของประกาศ และพุทธพล [10] ตลอดระยะเวลาหนึ่งปี และใช้ทฤษฎีของ Eisenmann ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถจำแนกพฤติกรรมการโค้งงอได้หลายกรณี และเป็นหนึ่งในทฤษฎีสำหรับวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิตามวิธีการออกแบบของเนเธอร์แลนด์ (Dutch design method) โดยส่วนหนึ่งของการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ PAVERS ซึ่งสามารถวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิได้ ผลการศึกษาที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ความล้าตามวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตของกรมทางหลวง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโค้งงอของผิวทางคอนกรีตภายใต้ความลาดชันอุณหภูมิตลอดระยะเวลาหนึ่งปี

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิในวิธี Eisenmann กับหน่วยแรงเทียบเท่าจากน้ำหนักเพลาดียวในวิธีการออกแบบของ PCA 1984

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ความล้าด้วยแบบจำลองความล้าจากหน่วยแรงในทฤษฎี Westergaard กับการวิเคราะห์ความล้าด้วยวิธี PCA 1984 โดยใช้แบบจำลองความล้าในฐานข้อมูลโปรแกรม PAVERS 2.80

1.2.4 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากการพิจารณาความลาดชันอุณหภูมิในกระบวนการวิเคราะห์ความล้า

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบระหว่างวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2558 ถึง 23 มกราคม พ.ศ. 2559

1.3.2 ใช้โครงสร้างถนนคอนกรีตประเภท JRCP ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง และจำลองให้ถนนคอนกรีตเกิดรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่น โดยที่แผ่นคอนกรีตถูกรองรับด้วยชั้นฐานรองรับดินซีเมนต์ในระบบโครงสร้าง 2 ชั้นทาง

1.3.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงคดของคอนกรีตเป็นไปตามงานศึกษาวิจัยของประกาศ และพุทธพล [10] และวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตของกรมทางหลวง [11]

1.3.4 กำหนดให้โครงสร้างถนนจำลอง JRCP รองรับน้ำหนักเพลาดเดี่ยวมาตรฐานขนาด 10 ตัน และความลาดชันอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างรอยต่อตามขวางและรอยร้าวตามขวาง

1.3.5 กำหนดให้โครงสร้างถนนคอนกรีตไม่มีไหล่ทางคอนกรีต ในขั้นตอนการวิเคราะห์หน่วยแรงของ PCA 1984

1.3.6 เลือกใช้แบบจำลองความล้าที่ระบุไว้ในฐานข้อมูลของโปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80 เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษารวบรวมเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตในสนามเป็นระยะเวลาหนึ่งปี

1.4.3 กำหนดถนนจำลองประเภท JRCP ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง

1.4.4 วิเคราะห์ข้อมูลจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีต และสรุปความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิตั้ง 11 ระดับขึ้น เพื่อนำเข้าข้อมูลในโปรแกรม PAVERS 2.80

1.4.5 วิเคราะห์หน่วยแรงจากถนนจำลอง JRCP ด้วยวิธีเชิงประจักษ์ของ PCA 1984 เปรียบเทียบกับหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิตั้งด้วยวิธี Eisenmann และจากโปรแกรม PAVERS 2.80

1.4.6 วิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรจากถนนจำลอง JRCP ด้วยวิธี Westergaard และจากโปรแกรม PAVERS 2.80

1.4.7 วิเคราะห์จำนวนที่ขูดตบที่ยอมให้จากแบบจำลองความล้าในฐานข้อมูลของโปรแกรม PAVERS 2.80 ด้วยหน่วยแรงจากทฤษฎี Westergaard และ Eisenmann และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PAVERS 2.80 และผลการวิเคราะห์จากวิธี PCA1984

1.4.8 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา

1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และตีพิมพ์งานวิจัยเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อสร้างฐานข้อมูลอุณหภูมิตั้งผิวทางที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิตั้งในผิวทางคอนกรีต

1.5.2 ทราบถึงผลกระทบจากหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิตั้งที่เกิดขึ้นต่อถนนคอนกรีตตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง ภายใต้สภาพอากาศของประเทศไทยตลอดทั้งปี

1.5.3 ทราบถึงความแตกต่างระหว่างวิธีเชิงวิเคราะห์ของ Eisenmann กับวิธีการออกแบบเชิงประจักษ์ของ PCA 1984

1.5.4 ทราบถึงความแตกต่างของความล้าที่เกิดขึ้นภายใต้ฐานข้อมูลของแบบจำลองความล้าที่แตกต่างกัน

1.5.5 สามารถนำข้อมูลอุณหภูมิตั้งจากแปลงทดสอบในสนามใช้ในการออกแบบผิวทางคอนกรีตในประเทศไทยด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

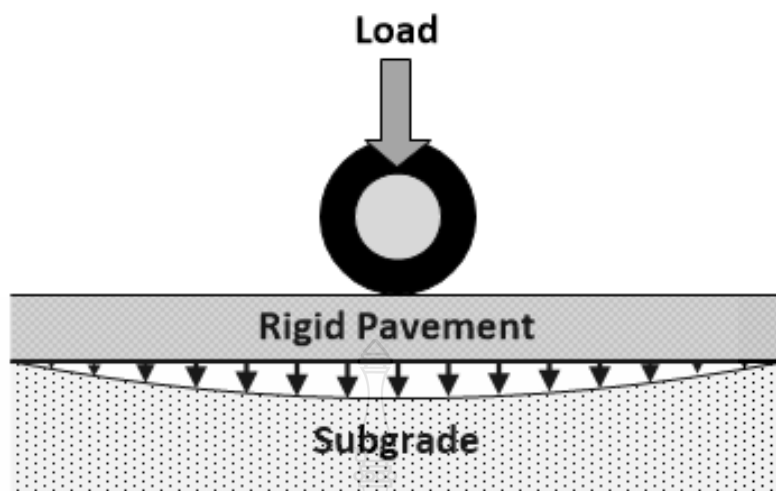
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผิวทางถนนคอนกรีตในประเทศไทย

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต

ตั้งแต่อดีตกาลพบว่าโครงสร้างผิวทางมีการพัฒนาที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละยุคสมัย จนกระทั่งมีการนำเอาวัสดุคอนกรีตมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างผิวทางครั้งแรกที่ Bellefontaine ช่วงปลายศตวรรษปี ค.ศ.1889 โดย Bartholomew [3] ทำให้ในเวลาต่อมาก็ได้มีการก่อสร้างผิวทางคอนกรีตเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เขตอุตสาหกรรมหรือพื้นที่ที่ต้องรองรับการสัญจรของปริมาณรถบรรทุกหนักค่อนข้างมากอย่างทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ [4] ในขณะที่ประเทศไทยได้มีการนำเอาวัสดุคอนกรีตมาใช้ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตเป็นระยะเวลาอันยาวนานกว่า 50 ปีมาแล้ว โดยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2507 กรมทางหลวงได้เปิดใช้งานถนนพหลโยธิน ช่วงอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิถึงลาดพร้าว ซึ่งเป็นถนนคอนกรีตสายแรกภายใต้การออกแบบและก่อสร้างตามหลักวิศวกรรม ถนนช่วงดังกล่าวมีระยะทางรวมทั้งสิ้น 6 กม. เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่าถนนคอนกรีตถูกนำมาใช้ในระบบทางหลวงของประเทศมากยิ่งขึ้น ดังเห็นได้จากถนนสายสำคัญต่างๆ เช่น ถนนสายกรุงเทพถึงสระบุรี, ถนนจรัญสนิทวงศ์ เป็นต้น [11] จากรายงานของกรมทางหลวงพบว่า ถนนคอนกรีตในปัจจุบันมีระยะทางรวมทั้งสิ้นกว่า 1,764 กม. [1]

ด้วยคุณสมบัติของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต ที่จัดว่าเป็นโครงสร้างผิวทางแบบแกร่ง (Rigid Pavement Structure) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่อนข้างสูง ทำให้การรองรับน้ำหนักบรรทุกจากปริมาณจราจรเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นในชั้นผิวทางคอนกรีต และกระจายน้ำหนักลงสู่ชั้นฐานรองรับเพื่อออกเป็นพื้นที่กว้างดังรูปที่ 2.1 ทำให้โครงสร้างฐานรองรับได้แก่ ชั้นพื้นทาง (Base course) หรือรองพื้นทาง (Subbase course) และดินคั่นทาง (Subgrade) ที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าชั้นผิวทางคอนกรีตเกิดหน่วยแรงไม่มากนัก ดังนั้นความแปรผันของความแข็งแรงจากโครงสร้างฐานรองรับจะมีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางคอนกรีตเพียงเล็กน้อย [13] ซึ่งหากโครงสร้างผิวทางคอนกรีตมีการก่อสร้างและบำรุงรักษาอย่างถูกต้องและเหมาะสมอาจทำให้อายุการใช้งานยาวนานมากกว่า 25 ถึง 40 ปี [3]



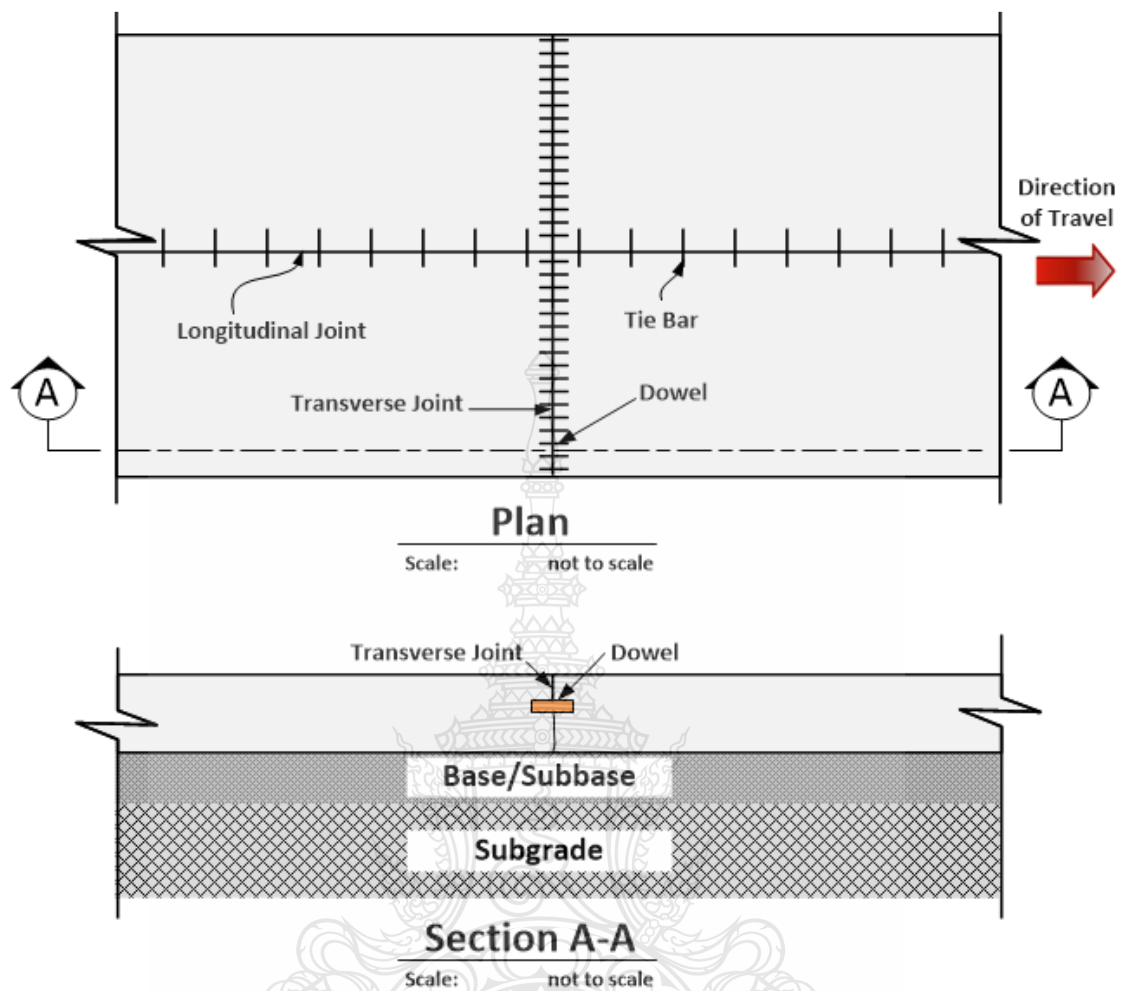
รูปที่ 2.1 การกระจายน้ำหนักลงชั้นฐานรองรับของ โครงสร้างผิวทางคอนกรีต [12]

2.1.2 ประเภทของถนนคอนกรีตในประเทศไทย

แม้ว่าโครงสร้างผิวทางคอนกรีตจะสามารถจำแนกได้หลายประเภท แต่เนื่องจากข้อจำกัดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นทุนในการก่อสร้าง ในโครงสร้างผิวทางชนิดเสริมเหล็กและไม่มีรอยต่อตามขวาง (Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP) ที่มีปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า ทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเริ่มต้นค่อนข้างสูง [14] โดยโครงสร้างผิวทางคอนกรีตที่พบเห็นในปัจจุบันจะนำมาอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ถนนประเภทไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง (Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP)

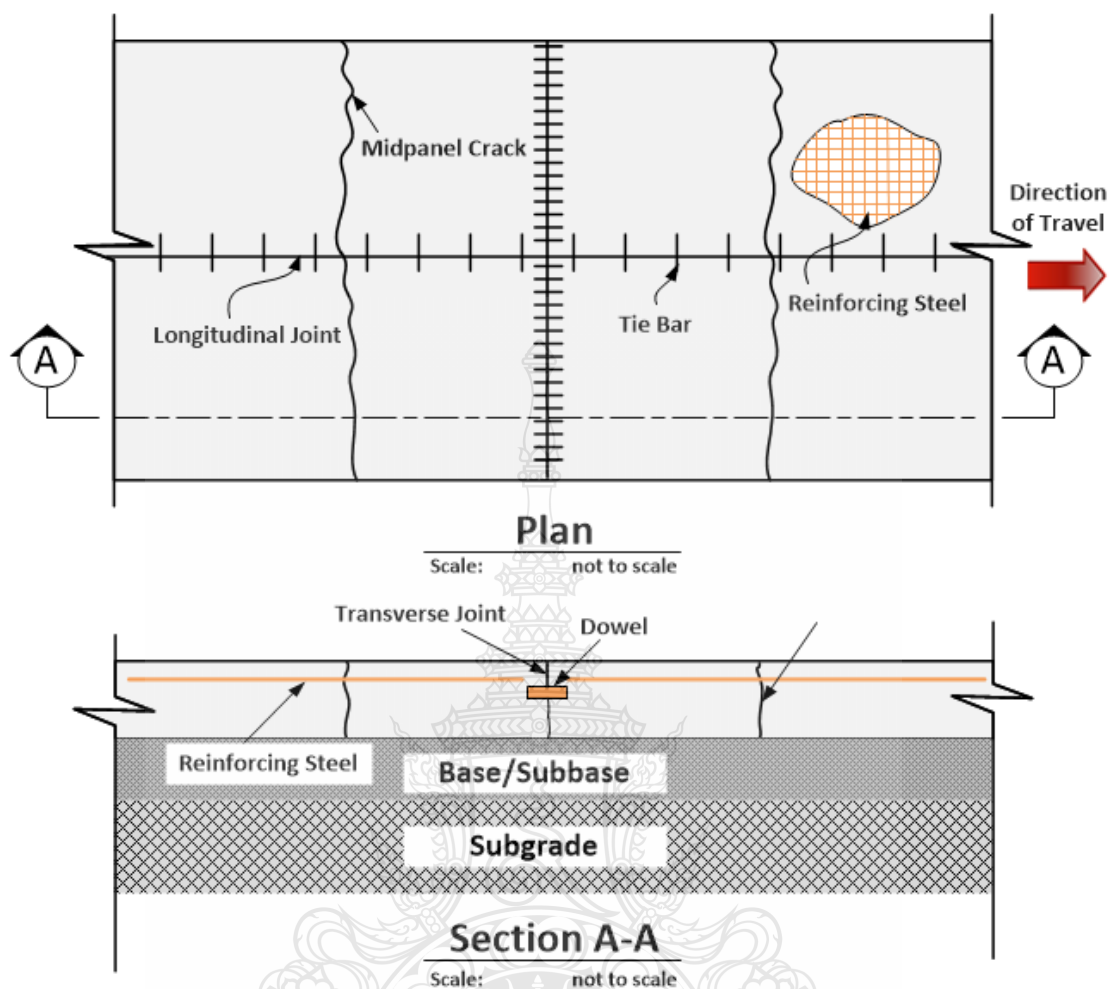
เป็นโครงสร้างผิวทางคอนกรีตที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป โดยเฉพาะในเขตชนบท ในเขตเมืองและหมู่บ้านจัดสรรทั่วไป [4] ถนน JPCP จะออกแบบให้ปราศจากการเสริมเหล็กเพื่อยืดรอยร้าวจากอุณหภูมิ แต่ป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิด้วยการลดระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวาง (Joint spacing) ทำให้ถนนประเภทนี้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางเพียง 4 ถึง 6 ม. เท่านั้น [11] ในขณะที่รอยต่อตามขวางอาจมีการติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel) เพื่อถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นหรือใช้วิธีการขัดเหลี่ยมประสานของวัสดุมวลรวม (Aggregate interlock) แทนที่ก็ได้ โดยโครงสร้างถนน JPCP แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ถนนประเภทไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง [12]

2. ถนนประเภทเสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP)

ถนนประเภท JRCP เป็นถนนที่มีโครงสร้างคล้ายกับถนนประเภท JPCP อย่างมาก โดยมีข้อแตกต่างเพียงเล็กน้อยได้แก่ การเสริมเหล็กเพื่อยึดร็อยร้าวภายใต้ความผันผวนของอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งจะช่วยให้ระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางเพิ่มและสูงสุดถึง 12 ม. หรือประมาณ 3 เท่าของถนนประเภท JPCP นอกจากนี้แล้วยังพบว่าถนนประเภท JRCP เป็นถนนคอนกรีตที่มีการใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะกับทางหลวงขนาด 4 ถึง 6 ช่องจราจร หรือในภาคกลางของประเทศไทย [4] จากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงพบว่า ถนน JRCP ที่ใช้ก่อสร้างจะมีขนาดความกว้าง 3.5 ม. ยาว 10 ม. และหนา 23 ถึง 25 ซม. [11] โดยโครงสร้างถนน JRCP แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ถนนประเภทเสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวาง [12]

2.1.3 รอยร้าวตามขวางในถนนประเภทมีรอยต่อตามขวาง

ความเสียหายที่มักพบเห็นได้ง่ายในถนนประเภทมีรอยต่อตามขวางโดยเฉพาะกับถนน JRCP ได้แก่รอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่นพื้น เนื่องจากหน่วยแรงที่ค่อนข้างสูงบริเวณกึ่งกลางแผ่น รวมถึงระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางที่มากขึ้นจะทำให้รอยร้าวตามขวางเพิ่มมากยิ่งขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปอาจทำให้รอยร้าวดังกล่าวเกิดการทรุดตัวต่างระดับ (Faulting) และยังสามารถแตกหักของผิวทางคอนกรีตได้ [3]

ตลอดเวลาที่ผ่านมาของการศึกษาได้มีความพยายามที่จะหาสาเหตุของความเสียหายด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Lab experiments), การเก็บข้อมูลในสนามระยะยาว (Long-term field test) รวมถึงการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) ในงาน

ศึกษาวิจัยของ Chen และคณะในปี ค.ศ. 2002 [7] ได้มีการรวบรวมสาเหตุของการเกิดรอยร้าวตามขวาง และพบว่าความเสียหายดังกล่าวเกิดจากความล้าของผิวทางที่รองรับหน่วยแรงจากน้ำหนักภายนอกกระทำซ้ำๆเนื่องมาจากพฤติกรรมการโก่งงอของผิวทางจากความลาดชันอุณหภูมิร่วมกับน้ำหนักบรรทุกจราจร [3],[8] นอกจากนี้ปัญหาจากการควบคุมการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ขณะที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวในระยะแรกของการก่อสร้างก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีความเสียหายได้

2.2 ลักษณะของสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร อยู่ที่ตำแหน่งระหว่างเส้นรุ้ง (Longitude) ที่ 97 องศา 21 ลิปดาตะวันออกถึง 105 องศา 37 ลิปดาตะวันออก และเส้นแวง (Latitude) ที่ 5 องศา 37 ลิปดาเหนือถึง 20 องศา 28 ลิปดาเหนือ โดยมีพื้นที่โดยรวมมากกว่า 500,000 กม.² ซึ่งมีอาณาเขตเชื่อมต่อกับประเทศต่างๆ ได้แก่ ประเทศพม่าและลาวทางทิศเหนือ ประเทศลาวและกัมพูชาทางทิศตะวันออก ประเทศพม่าทางทิศตะวันตก และติดกับประเทศมาเลเซียทางทิศใต้ นอกจากนี้ทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกยังเชื่อมต่อกับอ่าวไทยและทะเลอันดามันตามลำดับ ซึ่งพื้นที่โดยรอบนี้ส่งผลให้ประเทศไทยมีสภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

เนื่องจากที่ตั้งของประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น ทำให้สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยร้อนอบอ้าวตลอดทั้งปี โดยที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีอยู่ที่ประมาณ 27 °ซ. สามารถแบ่งฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดู ได้แก่ ฤดูร้อนช่วงระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ [9]

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการรวบรวมสถิติอุณหภูมิในแต่ละฤดูกาลไว้ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 พบว่าพื้นที่ภาคกลางมีอุณหภูมิเฉลี่ย และอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในฤดูร้อนสูงกว่าภาคอื่นๆ ในขณะที่สถิติอุณหภูมิสูงสุดของประเทศไทยในแต่ละพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 40 °ซ. โดยที่อุณหภูมิสูงสุดในภาคกลางมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดในภาคเหนือเพียง 1 °ซ. เนื่องจากประเทศไทยได้มีการศึกษาเก็บรวบรวมสถิติอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิของแผ่นดินคอนกรีตในปี พ.ศ. 2558 ณ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี [10] จึงได้มีการรวบรวมข้อมูลสภาพอากาศของพื้นที่ใกล้เคียงซึ่งอยู่ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาการเกษตร อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าได้มีการทำลายสถิติของอุณหภูมิในเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2558 โดยมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิในช่วงฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม) [15]

ตารางที่ 2.1 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในแต่ละฤดูกาล [9]

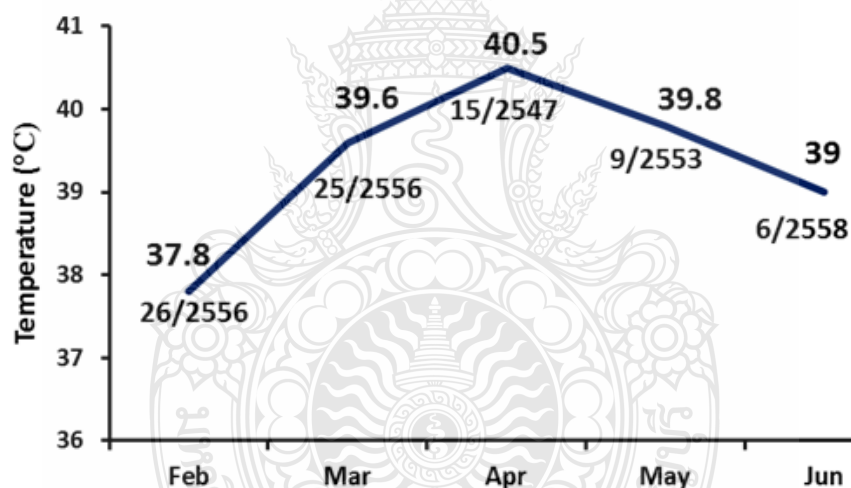
อุณหภูมิ	ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
เฉลี่ย	เหนือ	23.4	28.1	27.3
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	24.2	28.6	27.6
	กลาง	26.2	29.7	28.2
	ตะวันออก	26.7	29.1	28.3
	ใต้ฝั่งตะวันออก	26.3	28.2	27.8
	ใต้ฝั่งตะวันตก	27	28.4	27.5
	สูงสุดเฉลี่ย	เหนือ	31.1	36.1
ตะวันออกเฉียงเหนือ		30.6	35.2	32.6
กลาง		32.3	36.2	33.4
ตะวันออก		32	34.1	32.3
ใต้ฝั่งตะวันออก		30.4	33	32.7
ใต้ฝั่งตะวันตก		32	34.1	31.6
ต่ำสุดเฉลี่ย		เหนือ	17.5	21.8
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	18.7	23.2	24.4
	กลาง	21.2	24.6	24.8
	ตะวันออก	22.3	25.2	25.2
	ใต้ฝั่งตะวันออก	22.8	24.1	24.4
	ใต้ฝั่งตะวันตก	23.2	24	24.3

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2524 -2553)

ตารางที่ 2.2 สถิติอุณหภูมิสูงสุดของประเทศไทยในฤดูร้อน [9]

ภาค	อุณหภูมิสูงสุด	วันที่	เดือน	พ.ศ.	จังหวัด
เหนือ	44.5	27	เม.ย.	2503	อุตรดิตถ์
ตะวันออกเฉียงเหนือ	43.9	28	เม.ย.	2503	อุดรธานี
กลาง	43.5	20	เม.ย.	2535	กาญจนบุรี
ตะวันออก	42.9	23	เม.ย.	2533	ปราจีนบุรี (อ.กบินทร์บุรี)
- ใต้ฝั่งตะวันออก	41.2	15	เม.ย.	2541	ประจวบคีรีขันธ์ (สภ.หนองพลับ อ.หัวหิน)
- ใต้ฝั่งตะวันตก	40.5	29	มี.ค.	2535	ตรัง

หมายเหตุ 1.สภ. หมายถึง สถานีอากาศเกษตร 2.ข้อมูลในคาบปี พ.ศ.2494 - 2558

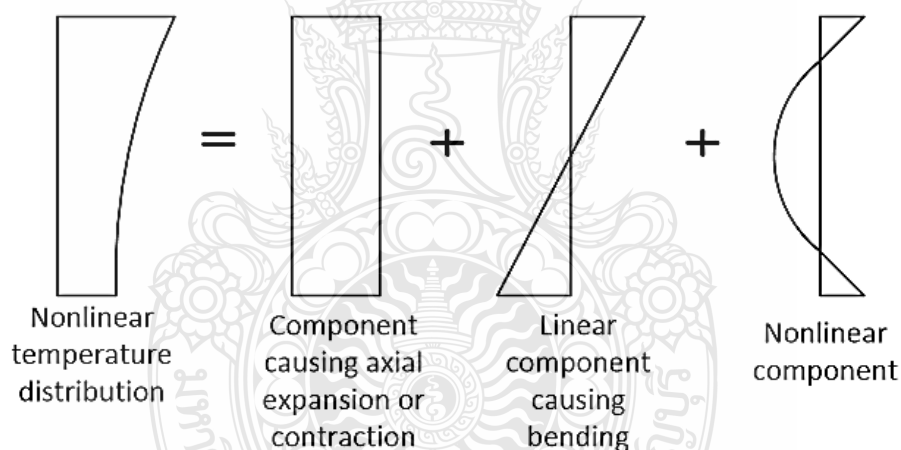


รูปที่ 2.4 สถิติอุณหภูมิสูงสุดของระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงมิถุนายนของพื้นที่จังหวัดปทุมธานี

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความแปรผันอย่างมากของสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่และฤดูกาล นอกจากนั้นสำนักพัฒนาอูดุณิยมหาวิทยาลัยได้รายงานว่าคุณุณหภูมินี้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 4 ถึง 5 °ซ. เนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อน [16] จึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการเก็บรวบรวมอุณหภูมิในพื้นที่ทำการศึกษา เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบการศึกษาและการวิเคราะห์ผลกระทบของคุณุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อผิวทางคอนกรีตโดยจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

2.3 พฤติกรรมโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิและการเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม

อุณหภูมิแวดล้อมมีอิทธิพลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายในผิวทางคอนกรีต โดยในช่วงแรกของการศึกษาได้อธิบายไว้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (Linear) ตลอดความหนา แต่จากการศึกษามากมายเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1935 ได้ค้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีตมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยในอีก 5 ปีต่อมา Thomlinson สามารถแบ่งองค์ประกอบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมีย่อยออกมาเป็น 3 กรณี ดังรูปที่ 2.5 [6] ทั้งนี้การวิเคราะห์หน่วยแรงจากอุณหภูมิมักจะพิจารณาในส่วนขององค์ประกอบแบบเชิงเส้นเนื่องจากการคิดเป็นหลัก (Linear component causing bending) โดยที่พฤติกรรมการคดหรือการโค้งงอดังกล่าวเป็นผลอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างของแผ่นพื้น (Temperature different, ΔT) โดยจะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

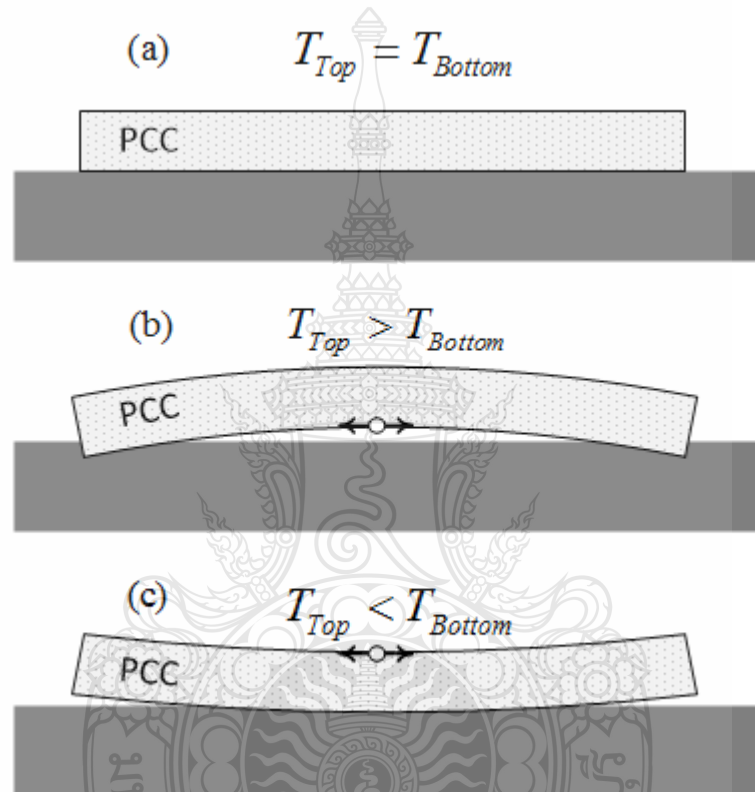


รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีต[12]

2.3.1 พฤติกรรมการโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิในผิวทางคอนกรีต

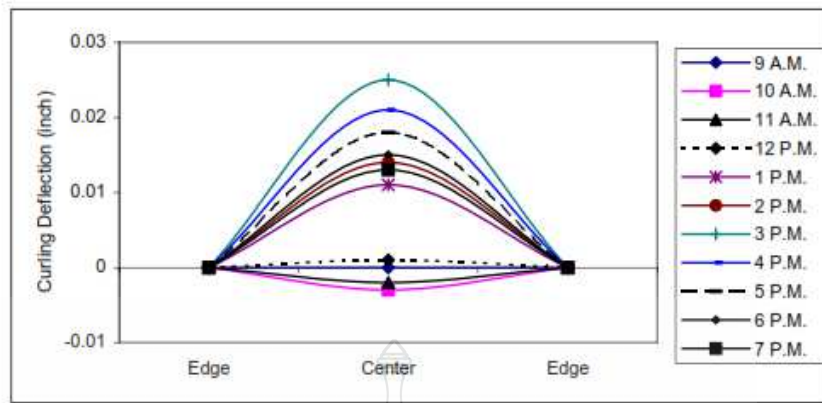
ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างของแผ่นพื้น หรืออาจกล่าวในเทอมของความลาดชันอุณหภูมิ (Temperature gradient, Δt) ส่งผลให้แผ่นคอนกรีตเกิดหน่วยแรงขึ้นแม้ไม่มีน้ำหนักบรรทุกภายนอกใดๆกระทำก็ตาม จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการโค้งงอของแผ่นพื้นคอนกรีตจากความลาดชันอุณหภูมิ ในกรณีที่แผ่นพื้นไม่มีการโค้งงอใดๆเนื่องจากอุณหภูมิผิวบน (T_{Top}) เท่ากับอุณหภูมิผิวล่างของแผ่นพื้น (T_{Bottom}) ดังรูปที่ 2.6 (a) เมื่ออุณหภูมิอากาศสูงมากจนทำให้

อุณหภูมิผิวบนสูงกว่าอุณหภูมิผิวล่างของแผ่นพื้นในช่วงเวลากลางวัน ผิวบนของแผ่นพื้นจะขยายตัว ในขณะที่ผิวล่างจะหดตัวทำให้พฤติกรรมการโก่งงอเป็นไปดังรูปที่ 2.6 (b) แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักค่อนข้างสูงจึงทำให้ส่วนที่โก่งงอขึ้นถูกน้ำหนักตัวเองทิ้งลงตามแรงโน้มถ่วง และทำให้เกิดหน่วยแรงดึงจากการดัด (Flexural tensile stress) ขึ้นที่ผิวล่าง ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิผิวบนต่ำกว่าผิวล่างในเวลากลางคืนจะทำให้เกิดพฤติกรรมการโก่งงอดังรูปที่ 2.6 (c)

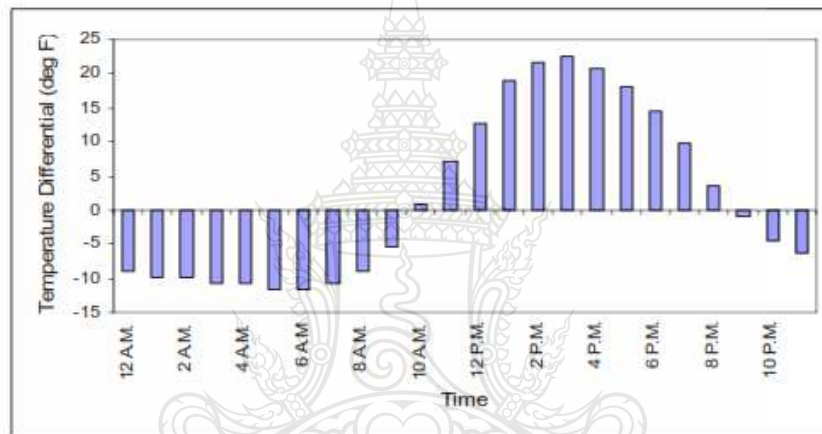


รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการโก่งงอเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่าง[12]

จากการศึกษาของ Siddique และคณะในปี ค.ศ. 2005 [17] ได้นำเสนอพฤติกรรมการโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา โดยใช้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ซึ่งวัดได้ด้วยโครงอลูมิเนียมที่มีความยาวฐานรองรับเท่ากับระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางและมีการติดตั้งเครื่องวัดระยะยืด (Extensometer) ที่ช่วงกึ่งกลางโครงอลูมิเนียม ซึ่งผลที่ได้จากรูปที่ 2.7 (a) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจะอยู่ที่เวลา 15 นาฬิกา และยังเป็นช่วงที่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างมากที่สุดดังรูปที่ 2.7 (b)



(a) Measured curling



(b) Temperature differential

รูปที่ 2.7 ผลจากการศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอของผิวทางคอนกรีตของ Sidique และคณะ [17]

จากที่กล่าวมาข้างต้นอาจจำแนกพฤติกรรมการโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิออกเป็น 2 แบบได้แก่ ผลจากความลาดชันอุณหภูมิแบบบวก (Positive temperature gradient) และ ความลาดชันอุณหภูมิแบบลบ (Negative temperature gradient) โดยตัวแปรชี้วัดทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{h} = \frac{T_{\text{Top}} - T_{\text{Bottom}}}{h} \quad (2.1)$$

เมื่อ Δt คือความลาดชันอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.)

ΔT คือความแตกต่างของระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่าง ($^{\circ}\text{C}$.)

h คือความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต (mm.)

T_{Top} คืออุณหภูมิผิวบนของแผ่นพื้นคอนกรีต ($^{\circ}\text{C}$.)

T_{Bottom} คืออุณหภูมิผิวล่างของแผ่นพื้นคอนกรีต ($^{\circ}\text{C}$.)

2.3.2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม

เนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิอากาศที่มีความแปรผันอย่างมากในแต่ละพื้นที่ ทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผิวทางคอนกรีตมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเก็บข้อมูลในสนามจึงเป็นวิธีการที่ถูกลำมาไว้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอเนื่องจากความลาดชันอุณหภูมิ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าวด้วยการเก็บข้อมูลภาคสนามในพื้นที่ต่างๆ เช่น ขนาดของแปลงทดสอบ, คุณสมบัติของวัสดุผิวทางทดสอบ, ระยะเวลาและความถี่ในการเก็บข้อมูลรวมถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่แตกต่างกันออกไป เป็นต้น

ในปี ค.ศ.1987 Richardson และ Armaghani [18] ได้ทำแปลงทดสอบในรัฐฟลอริดาที่ไม่มีน้ำหนักรบรรทุกกระทำขนาดความกว้าง 0.37 ม. ยาว 0.61 ม. และหนา 0.23 ม. โดยทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ วัดระยะจากผิวบนลงมาได้แก่ ระยะ 2.5, 6.4, 11.4, 16.5 และ 20.3 ซม. สำหรับการเก็บข้อมูลจะดำเนินการทุกๆ 15 หรือ 30 นาที หรือทุกๆ 1 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับกรณีที่ต้องการศึกษา นอกจากนี้ในปีเดียวกันยังได้มีการนำข้อมูลจากแปลงทดสอบดังกล่าวไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวราบโดย Armaghani และคณะ [19] ตลอดจนการศึกษาวิเคราะห์หน่วยแรงต่างๆ โดย Choubane และ Tia ในปี ค.ศ. 1992 [20], 1995 [21] และการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์หน่วยแรงจากอุณหภูมิแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear temperature stress) โดย Zhang และคณะ [22]

หลังจากนั้นพบว่าแนวโน้มของการศึกษาและเก็บข้อมูลจากแปลงทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงในเชิงวัสดุ ซึ่งมีการนำวัสดุต่างๆ มาศึกษาเปรียบเทียบกับแปลงทดสอบคอนกรีตปกติ เช่น พอร์สเอสฟัลต์สำหรับเพิ่มแรงเสียดทานของผิวทางโดย Belshe และคณะ (2011) [23], วัสดุพอซโซลานได้แก่ เถ้าลอย โดย Harwalkar และ Awanti (2013) [24] เช่นเดียวกับ Dhananjay และ Abhilash (2014) [25] รวมไปถึงซิลิกาฟูมในงานศึกษาของ Math และคณะ (2015) [26] เป็นต้น โดยในปี ค.ศ. 2015 Chung และ Shin [27] ได้พบว่าอุณหภูมิผิวทางมีความสัมพันธ์พหุนามกำลังสองกับความลาดชันอุณหภูมิที่ดีกว่าอุณหภูมิอากาศ

จะเห็นได้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิผิวทางคอนกรีตด้วยการเก็บข้อมูลจากแปลงทดสอบในสนามในต่างประเทศมีการพัฒนามาโดยตลอดรวมถึงในทวีปเอเชีย แปลงทดสอบในสนามยุคแรกๆเกิดขึ้นที่ภาคตะวันออกเฉียงของประเทศซาอุดีอาระเบียในปี ค.ศ. 1997 โดย Ramadhan และ Wahhab [28] ได้สร้างแปลงทดสอบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและผิวทางคอนกรีตขึ้นเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความลาดชันอุณหภูมิ ขณะที่ประเทศไทยแม้ในระยะแรกของการศึกษาอุณหภูมิผิวทางคอนกรีตยังไม่เกิดขึ้นชัดเจนมากนัก โดยมีเพียงการศึกษาของกรมทางหลวงที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิมাত্রฐานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเท่านั้น [29] แต่ในปี พ.ศ. 2546 ได้มีความพยายามที่จะศึกษาผลกระทบของความลาดชันอุณหภูมิต่อการทดสอบผิวทางคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบการทรุดตัวด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ในประเทศไทยโดย ชยธันว์ และคณะ [4] ได้ทำการเจาะผิวทางคอนกรีตเพื่อวัดอุณหภูมิภายในแผ่นคอนกรีตก่อนเริ่มทำการทดสอบผิวทางด้วย FWD และนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวทางกับความลาดชันอุณหภูมิแบบเชิงเส้น จนกระทั่งปี พ.ศ. 2558 ได้มีการสร้างแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตขึ้นภายในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี โดย ประภาศ และ พุทธิพล [10] ซึ่งเป็นแปลงทดสอบที่ผู้วิจัยนำมาเลือกใช้ศึกษาต่อในงานวิจัยครั้งนี้และจะแสดงรายละเอียดของแปลงทดสอบไว้ในบทที่ 3

2.4 หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ (Warping stress)

ตลอดการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีต่างๆซึ่งล้วนมีแนวคิดและวิธีในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

2.4.1 ทฤษฎีแผ่นพื้นอนันต์

ในปี ค.ศ. 1927 Westergaard [8] ได้นำเสนอการวิเคราะห์แผ่นพื้นที่มีขนาดความกว้างและความยาวไม่สิ้นสุดขณะโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิได้อาศัยกฎของฮุกในการสร้างสมการความเครียด โดยความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นมีลักษณะที่แตกต่างจากคานเนื่องจากความเครียดในแผ่นพื้นเกิดขึ้นทั้งสองทิศทาง แสดงได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (2.3)$$

เมื่อ v คืออัตราส่วนเร็วของของคอนกรีต

E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

เนื่องจากสมมติให้แผ่นพื้นมีความกว้างไม่สิ้นสุดและมีการยึดรั้งอย่างดี เมื่อพิจารณาให้แผ่นพื้นถูกตัดจนโค้งงอรอบแกน x จะทำให้ความเครียดในทิศทาง y เท่ากับศูนย์ ดังนั้นหน่วยแรงดึงในทิศทาง x และ y สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$\sigma_y = v\sigma_x \quad (2.4)$$

$$\sigma_x = \frac{E\varepsilon_x}{1-v^2} \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาว่าแผ่นพื้นเกิดการโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากผลรวมของหน่วยแรงจากการโค้งงอแกน x และ y จะทำให้เกิดความเครียดแบบเชิงเส้นที่มีค่าดังสมการที่ 2.6 ซึ่งเมื่อแทนค่าลงสมการที่ 2.5 จะทำให้หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิเป็นไปดังสมการที่ 2.7

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta T}{2} \quad (2.6)$$

$$\sigma_x = \frac{E\alpha_t \Delta T}{2(1-v^2)} \quad (2.7)$$

เมื่อ α_t คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีต ($1/^\circ\text{C}$.)

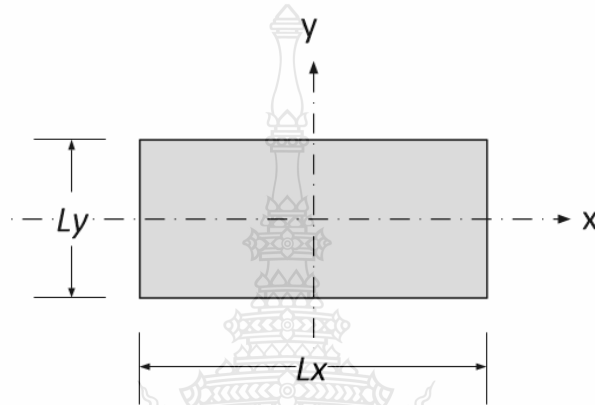
ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาการโค้งงอแกน y จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในทิศทาง x เพิ่มเติมดังสมการที่ 2.8 ดังนั้นหน่วยแรงดึงสูงสุดจากการโค้งงอทั้ง 2 ทิศทางจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\sigma_x = \frac{vE\alpha_t \Delta T}{2(1-v^2)} \quad (2.8)$$

$$\sigma_x = \frac{E\alpha_t \Delta T}{2(1-v^2)} + \frac{vE\alpha_t \Delta T}{2(1-v^2)} = \frac{E\alpha_t \Delta T}{2(1-v^2)}(1+v) = \frac{E\alpha_t \Delta T}{2(1-v)} \quad (2.9)$$

2.4.2 ทฤษฎีของ Bradbury

จากทฤษฎีข้างต้นในแผ่นพื้นอนันต์ของ Westergaard ได้ถูกนำมาปรับปรุงและพัฒนาโดย Bradbury ในปี ค.ศ. 1938 [8] และนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ห้อย่างแพร่หลาย โดยสิ่งที่แตกต่างจากทฤษฎีแผ่นพื้นอนันต์คือการเพิ่มตัวคูณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ (Correction factor, C) และกำหนดให้แผ่นพื้นมีขนาดความกว้างและความยาวที่แน่นอน (Finite slab) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผ่นพื้นสำหรับคำนวณหน่วยแรงด้วยทฤษฎีของ Bradbury [12]

หลักการวิเคราะห์หน่วยแรงจะทำการพิจารณาแผ่นพื้นออกเป็นแถบ (Strip) ความกว้างหนึ่งหน่วยในแต่ละทิศทาง โดยการคำนวณจะอาศัยสมการที่มีความคล้ายคลึงกับสมการของ Westergaard ดังสมการที่ 2.10 สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุดที่กึ่งกลางแผ่น (Interior) และสมการที่ 2.11 สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ขอบ (Edge)

$$\sigma = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu^2)} (C_1 + \nu C_2) \quad (2.10)$$

$$\sigma = \frac{CE\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} \quad (2.11)$$

เมื่อ C_1 คือตัวคูณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ในทิศทางของหน่วยแรงดึงที่พิจารณา

C_2 คือตัวคูณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ในทิศทางตั้งฉากกับหน่วยแรงดึงที่พิจารณา

$C = C_1 = C_2$ เมื่อแผ่นพื้นมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การคำนวณตัวคูณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของ Bradbury สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความยาวของด้านที่พิจารณาและรัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (Radius of relative stiffness, l) [7] ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 หรือสามารถหาได้จากแผนภูมิดังรูปที่ 2.9 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ทฤษฎีของ Bradbury เป็นวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical method)

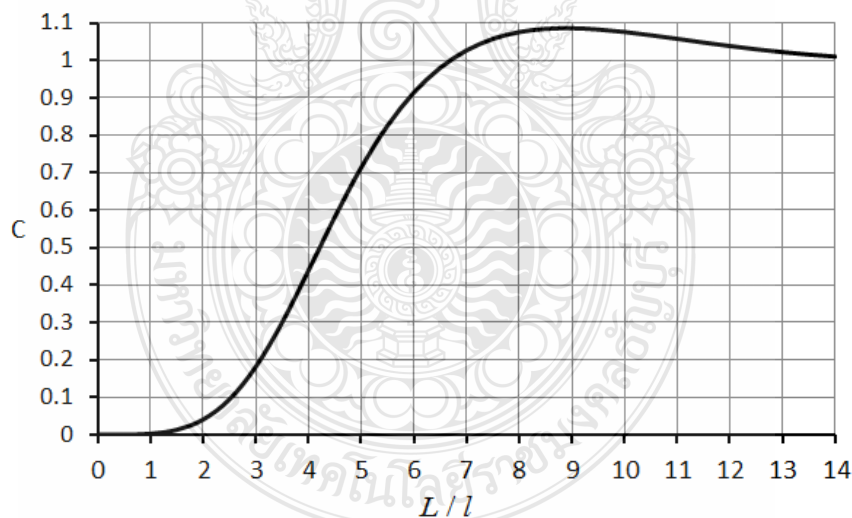
$$C = 1 - \frac{2 \cos\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right) \cosh\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right) \left(\tan\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right) + \tanh\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right) \right)}{\sin 2\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right) + \sinh 2\left(\frac{L}{l\sqrt{8}}\right)} \quad (2.12)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.13)$$

เมื่อ l คือรัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (มม.)

L คือความยาวของด้านที่พิจารณา (มม.)

k คือค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับ (เมกะปาสคาล/มม.)



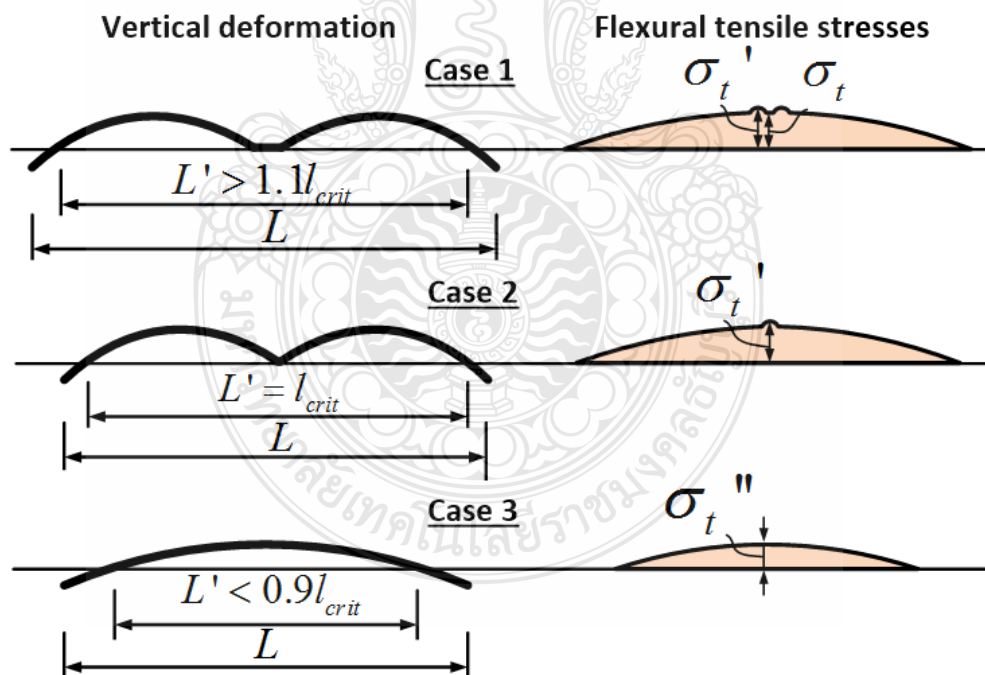
รูปที่ 2.9 แผนภูมิสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C [12]

เนื่องจากทฤษฎีของ Bradbury มีความสะดวกในการประมาณหน่วยแรงโค้งงอจาก ความลาดชันอนุกรม ทำให้พบว่าทฤษฎีดังกล่าวมักถูกนำมาศึกษามากมาย ตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1992 โดย

Choubane และ Tia [20] ได้ทำนายค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างของแผ่นพื้นด้วยสมการพหุนามและวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอด้วยทฤษฎี Bradbury เพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม FEACON IV ซึ่งผลที่ได้พบว่ายิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างมากขึ้น จะทำให้หน่วยแรงจากทฤษฎี Bradbury มีค่าสูงต่างจากโปรแกรม FEACON IV มากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นในการศึกษาของ Zhang และคณะ [22], Harwalkar และ Awanti [24] รวมทั้ง Khan และคณะ [30] พบว่าทฤษฎีของ Bradbury ให้ค่าหน่วยแรงที่สูงจนเกินไป (Over estimate)

2.4.3 ทฤษฎีของ Eisenmann

หนึ่งในทฤษฎีวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิในการออกแบบโครงสร้างผิวทางเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์คือทฤษฎีของ Eisenmann ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1979 [31] โดยมีแนวคิดสำหรับคำนวณหน่วยแรงที่แตกต่างจากทฤษฎีแผ่นพื้นอนันต์และทฤษฎีของ Bradbury ซึ่ง Eisenmann ได้จำแนกการวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกออกเป็น 3 กรณี ดังรูปที่ 2.10 พฤติกรรมของแผ่นพื้นนี้จะอยู่ในเทอมของค่าความยาววิกฤต (Critical length, l_{crit}) และขนาดของแผ่นพื้นดังสมการที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการโค้งงอของ Eisenmann [12]

แผ่นพื้นค้ำ $(L/W > 1.2 \text{ or } L/W < 0.8) : l_{crit} = 200h\sqrt{E\alpha_t\Delta t}$ (2.14)

แผ่นจตุรัส $(0.8 \leq L/W \leq 1.2) : l_{crit} = 228h\sqrt{E\alpha_t\Delta t}$ (2.15)

เมื่อ l_{crit} คือความยาววิกฤตของแผ่นพื้น(มม.)

L, W คือความยาวและความกว้างของแผ่นพื้น(มม.)

นอกจากความยาววิกฤตที่ใช้สำหรับจำแนกพฤติกรรมของแผ่นพื้นแล้ว Eisenmann ยังได้เสนอตัวแปรสำหรับจำแนกพฤติกรรมของแผ่นพื้นเพิ่มเติมได้แก่ ความยาวช่วง (Slab span, L') และความกว้างช่วง (W') สำหรับหน่วยแรงดึงตามแนวขวาง โดยความยาวช่วงและความกว้างช่วงจะสัมพันธ์กับขนาดของแผ่นพื้นและความยาวช่วงรองรับ (Support length, C) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$L' = L - \frac{2}{3}C \quad (2.16)$$

ถ้า $C \ll L$

$$C = 4.5\sqrt{\frac{h}{k\Delta t}} \quad (2.17)$$

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายพฤติกรรมของแผ่นพื้นจากความลาดชันอนุกรมมิโดยละเอียดได้ดังนี้

1. กรณีที่ 1 เมื่อ $L' > 1.1/l_{crit}$ แถบของแผ่นพื้นจะโก่งงอขึ้นโดยมีช่วงกลางของแถบที่ตัวลงสัมผัสกับชั้นฐานรองรับส่วนหนึ่ง และมีหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ขอบของส่วนที่สัมผัสกับชั้นฐานรองรับ (σ_t') ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 เท่าของหน่วยแรงดึงที่กึ่งกลางแถบของแผ่นพื้น (σ_t) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$\sigma_t' = 1.2\sigma_t \quad (2.18)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{1-\nu} \frac{h\Delta t}{2} \alpha_t E \quad (2.19)$$

2. กรณี 2 เมื่อ $L' = l_{crit}$ แถบของแผ่นพื้นจะโก่งงอขึ้นโดยมีช่วงกึ่งกลางของแถบที่ตัวลงสัมผัสกับชั้นฐานเพียงตำแหน่งเดียว และเป็นตำแหน่งที่มีหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีที่ 1

3. กรณี 3 เมื่อ $L' < 0.9l_{crit}$ แถบของแผ่นพื้นจะโค้งงอขึ้น โดยที่ช่วงกึ่งกลางของแถบที่ตัวลงแต่ไม่สัมผัสกับชั้นฐาน และมีหน่วยแรงดึงสูงสุดที่กึ่งกลางของแถบแผ่นพื้น (σ_t'') สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20

$$\sigma_t'' = \left(\frac{L'}{0.9l_{crit}} \right)^2 \sigma_t \quad (2.20)$$

กรณีต้องการคำนวณหน่วยแรงดึงที่กึ่งกลางขอบแผ่นพื้น Eisenmann กำหนดให้หน่วยแรงดึงกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.85 เท่าของหน่วยแรงที่คำนวณได้จากทั้งสามกรณี และบริเวณดังกล่าวจะมีหน่วยแรงเพียงแกนเดียว (Uniaxial) ขนานกับแนวที่พิจารณา [32] สำหรับหน่วยแรงที่ตำแหน่งใดๆ ห่างจากกึ่งกลางของแผ่นพื้น สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันและให้คูณด้วยสัมประสิทธิ์ลดค่า (Reduction factor, R) ที่สัมพันธ์กับระยะตามยาว (x) และระยะตามขวาง (y) ดังสมการที่ 2.21 และ 2.22

ขอบตามยาว
$$R = \frac{4x(L'-x)}{L^2} \quad (2.21)$$

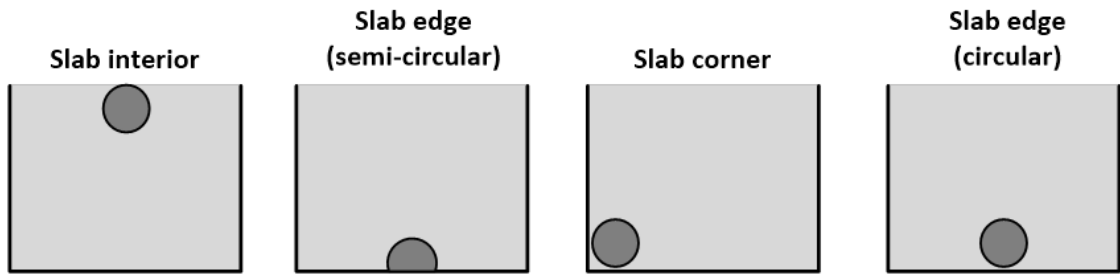
ขอบตามขวาง
$$R = \frac{4y(W'-y)}{W^2} \quad (2.22)$$

เมื่อ x คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่พิจารณาตามแนวยาวถึงขอบตามแนวขวางที่ใกล้ที่สุดลดด้วยระยะ 1/3 ของความยาวช่วงรองรับ(มม.)

y คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่พิจารณาตามแนวขวางถึงขอบตามแนวยาวที่ใกล้ที่สุดลดด้วยระยะ 1/3 ของความยาวช่วงรองรับ(มม.)

2.5 หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาจร (Loading stress)

เป็นที่ทราบกันดีว่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นคอนกรีตเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาจรเป็นหลัก ดังนั้นถนนคอนกรีตจึงถูกออกแบบมาเพื่อรองรับน้ำหนักดังกล่าวตลอดอายุการใช้งานซึ่งมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงเวลาและแต่ละพื้นที่ ในปี ค.ศ. 1926 Westergaard ได้สร้างสมการสำหรับหาหน่วยแรงดึงและค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆของแผ่นพื้นคอนกรีตได้แก่ ช่วงกลางแผ่น (Interior), ขอบแผ่น (Edge) และมุมแผ่น (Corner) [33] สำหรับออกแบบโครงสร้างผิวทางด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการพิจารณาหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรด้วยทฤษฎี Westergaard [8]

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาทั้ง Westergaard และนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาและปรับปรุงสมการวิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าวจนกระทั่งในปัจจุบันที่สมการของ Westergaard ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมผิวทางเป็นวงกว้าง โดยอาศัยสมมติฐานว่าแผ่นพื้นมีลักษณะเป็นแผ่นพื้นเดี่ยวที่ไม่มีส่วนใดของขอบเชื่อมต่อกับแผ่นพื้นอื่นๆ แผ่นพื้นวางบนชั้นฐานรองรับยืดหยุ่น (Elastic foundation) และสัมผัสกับชั้นฐานรองรับทั่วทุกพื้นที่ โดยแผ่นพื้นใหญ่มากพอที่จะทำให้ตำแหน่งขอบและมุมของแผ่นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อหน่วยแรงดึงและค่าการทรุดตัวสูงสุด

ทั้งนี้ตามวิธีการออกแบบผิวทางคอนกรีตมักพิจารณาตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่ขอบแผ่นเป็นหลัก เนื่องจากภาระที่แผ่นพื้นรองรับก่อให้เกิดหน่วยแรงดัดสูงสุดที่ผิวล่างของกึ่งกลางขอบแผ่นนำไปสู่รอยร้าวจากล่างสู่ผิวบนได้ (Bottom-up cracking) อีกทั้งยังสอดคล้องกับตำแหน่งวิกฤตสำหรับวิเคราะห์ความล้าที่บริเวณขอบแผ่นในวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ของเนเธอร์แลนด์ (Dutch design method) [31] และการศึกษาของ Setyawan และคณะ [34] ในปี ค.ศ. 2013 ที่สรุปไว้ว่าหน่วยแรงโดยรวมจากปริมาณจรและความลาดชันอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางขอบแผ่นในเวลากลางวันมีค่าสูงสุด ซึ่งการคำนวณหน่วยแรงที่ตำแหน่งดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังนี้ [35], [36]

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีดั้งเดิม, พื้นที่น้ำหนักกระทำครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{0.529P}{h^2}(1+0.54v) \left\{ \log \left(\frac{Eh^3}{ka_2^4} \right) - 0.71 \right\} \quad (2.23)$$

$$w = \frac{P}{\sqrt{6k}l^2}(1+0.4v) \quad (2.24)$$

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีใหม่, พื้นที่น้ำหนักกระทำวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-\nu)}{2} + 1.18(1+2\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.25)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76+0.4\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.26)$$

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีใหม่, พื้นที่น้ำหนักกระทำครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left(\frac{Eh^3}{100ka_2^4} \right) + 3.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-2\nu)}{2} \frac{a_2}{l} \right\} \quad (2.27)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76+0.4\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.28)$$

เมื่อ σ คือหน่วยแรงดึงจากน้ำหนักบรรทุกจร (เมกะปาสคาล)

w คือการทรุดตัว (มม.)

P คือน้ำหนักล้อเดี่ยว (นิวตัน)

a คือรัศมีของพื้นที่สัมผัสล้อแบบวงกลม (มม.)

a_2 คือรัศมีของพื้นที่สัมผัสล้อแบบครึ่งวงกลม (มม.)

p คือแรงดันลมยาง (เมกะปาสคาล)

เนื่องจากหน่วยแรงสูงสุดมักเกิดขึ้นที่บริเวณขอบแผ่นทั้งรอยต่อตามยาวและรอยต่อตามขวาง ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกกระทำที่วิเคราะห์จะต้องนำมาพิจารณาถึงประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักข้ามรอยต่อ (Load transfer efficiency, LTE) ด้วยสมการที่ 2.29 โดยหากพิจารณาที่กึ่งกลางขอบอิสระ (Free edge) จะกำหนดให้ค่า LTE เท่ากับร้อยละ 35 ตามวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ของเนเธอร์แลนด์ (Dutch design method) [32]

$$P = \left(1 - \frac{LTE}{200} \right) P_{act} \quad (2.29)$$

เมื่อ P_{act} คือน้ำหนักล้อเดี่ยวก่อนถูกลดทอนด้วยผลจาก LTE (นิวตัน)

2.6 วิธีการออกแบบความหนาผิวทางคอนกรีตของ Portland Cement Association 1984

การออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยยังคงใช้วิธีการออกแบบความหนาเชิงประจักษ์ของ Portland Cement Association ฉบับปี 1984 (PCA 1984) [11] ซึ่งอาศัยข้อมูลเชิงประสบการณ์จากหลากหลายแห่งและมีพื้นฐานการออกแบบมาจากทฤษฎีการศึกษาพฤติกรรมของผิวทางคอนกรีตโดยใช้ทฤษฎีของ Westergaard, Influence chart ของ Picklet และ Ray, การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์, ผิวทางทดสอบขนาดจริงของ PCA เช่น การทดสอบที่ Arlington เป็นต้น [37] วิธีดังกล่าวสามารถใช้ออกแบบถนนประเภท JPCP, JRCP และ CRCP ได้ โดยอาศัยปัจจัยต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องรวมถึงกระบวนการในการออกแบบความหนาขั้นต่ำสำหรับรองรับผลกระทบจากปริมาณจราจรและปัจจัยอื่นๆแบบเหมารวม

2.6.1 องค์ประกอบสำหรับออกแบบ (Design factor)

ในกระบวนการออกแบบด้วยวิธีของ PCA จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รองรับถนนคอนกรีต อายุการใช้งานของถนน และปริมาณการจราจรในพื้นที่นั้น ซึ่งสามารถนำมาอธิบายได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงคดของคอนกรีต (Flexural strength of concrete)

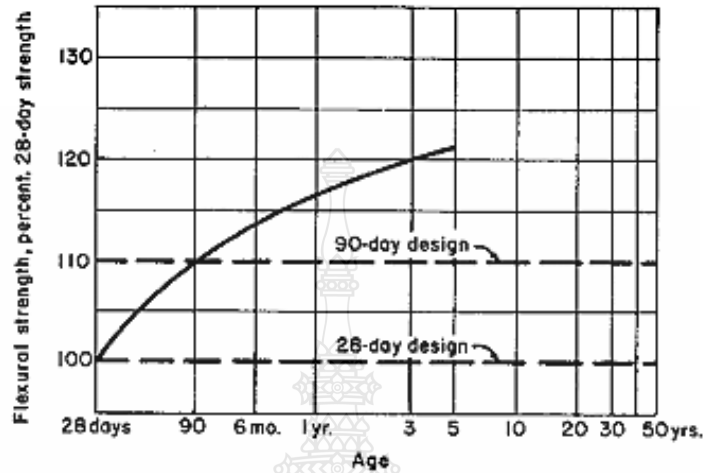
เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถรับแรงอัดได้ดี แต่ในทางกลับกันพบว่าคอนกรีตมีข้อด้อยอยู่ที่คุณสมบัติในการรับแรงดึง ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการบ่งบอกความแข็งแรงของแผ่นพื้นคอนกรีตคือ โมดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) ซึ่งหมายถึงค่าหน่วยแรงดึงขณะที่คานคอนกรีตรับแรงกระทำจนถึงช่วงที่เกิดการแตกร้าว การทดสอบสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การทดสอบแบบคานยื่น (Cantilever loading), การทดสอบแบบออกแรงกคกลางคานเพียงจุดเดียว (Midspan loading) และการทดสอบแบบออกแรงกค 2 จุด (Third point loading) ซึ่งวิธีหลังมักได้ค่าที่ต่ำสุดจึงนำมาใช้ในการออกแบบ [37]

การทดสอบ โมดูลัสการแตกหักโดยทั่วไปจะทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน โดยที่ค่าผลทดสอบที่อายุ 28 วัน มักถูกนำมาใช้อย่างมากในการออกแบบถนน ในขณะที่งานออกแบบผิวทางสนามบินจะเลือกใช้ค่าทดสอบที่อายุ 90 วัน ซึ่งความแข็งแรงของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับอายุของคอนกรีตดังรูปที่ 2.12 โดยกำหนดให้ผลการทดสอบที่อายุ 90 วันเป็น 1.2 เท่าของผลที่อายุ 28 วัน และมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงคดของคอนกรีตเป็นไปตามสมการที่ 2.30 [11]

$$f_r = 0.75\sqrt{f'_c} \quad (2.30)$$

เมื่อ f_r คือค่าโมดูลัสการแตกหักที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสคาล)

f'_c คือค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสคาล)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตกับค่าโมดูลัสการแตกหัก [37]

2. ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นฐานรองรับ

โครงสร้างที่ใช้รองรับถนนคอนกรีตได้แก่ ดินคันทาง และรองพื้นทาง ความแข็งแรงของชั้นทางทั้งสองกำหนดให้อยู่ในเทอมของค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับด้วย ทฤษฎีของ Westergaard ซึ่งหาได้จากผลการทดสอบในสนาม โดยการทดสอบ Plate bearing ตามมาตรฐาน AASHTO T235 [11] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.31

$$k = \frac{p}{w} \quad (2.31)$$

สำหรับการออกแบบถนน โดยทั่วไปมักเลือกใช้ชั้นรองพื้นทางในโครงสร้างผิวทางคอนกรีตร่วมด้วย ซึ่งวิธีของ PCA จะพิจารณาให้ค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับของดินคันทางมีค่าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากผลของชั้นรองพื้นทาง และได้จำแนกผลของการเพิ่มค่าดังกล่าวจากคุณสมบัติของชั้นรองพื้นทางออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ชั้นรองพื้นทางวัสดุไม่มีความเชื่อมแน่น (Untreated subbase) และชั้นรองพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ หรือวัสดุที่มีความเชื่อมแน่น

(Cement-treated subbase) ดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ภายใต้พื้นฐานการวิเคราะห์ของ Burmister และการทดสอบ Plate bearing บนชั้นดินคันทางและชั้นรองพื้นทางในถนนทดสอบขนาดจริง [37]

ตารางที่ 2.3 ค่า k สำหรับชั้นรองพื้นทางวัสดุไม่มีความเชื่อมแน่น [37]

Subgrade k value, pci	Subbase k value , pci			
	4 in	6 in	9 in	12 in
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

ตารางที่ 2.4 ค่า k สำหรับชั้นรองพื้นทางวัสดุมีความเชื่อมแน่น [37]

Subgrade k value, pci	Subbase k value , pci			
	4 in	6 in	9 in	12 in
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

3. อายุการใช้งาน

โครงสร้างถนนคอนกรีตหากได้รับการก่อสร้างและบำรุงรักษาที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมก็จะมีอายุการใช้งานที่ยืนยาว โดยทั่วไปถนนคอนกรีตจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานที่ 20 ปี แต่หากมีการรองรับปริมาณการจราจรที่สูงกว่าที่ออกแบบไว้หรือมีข้อบกพร่องจากการก่อสร้างก็อาจทำให้อายุการใช้งานต่ำกว่า 20 ปี ในบางครั้งอายุการใช้งานอาจสูงได้ถึง 40 ปี หากปัจจัยทุกอย่างที่กล่าวมาไม่มีข้อบกพร่องใดๆ

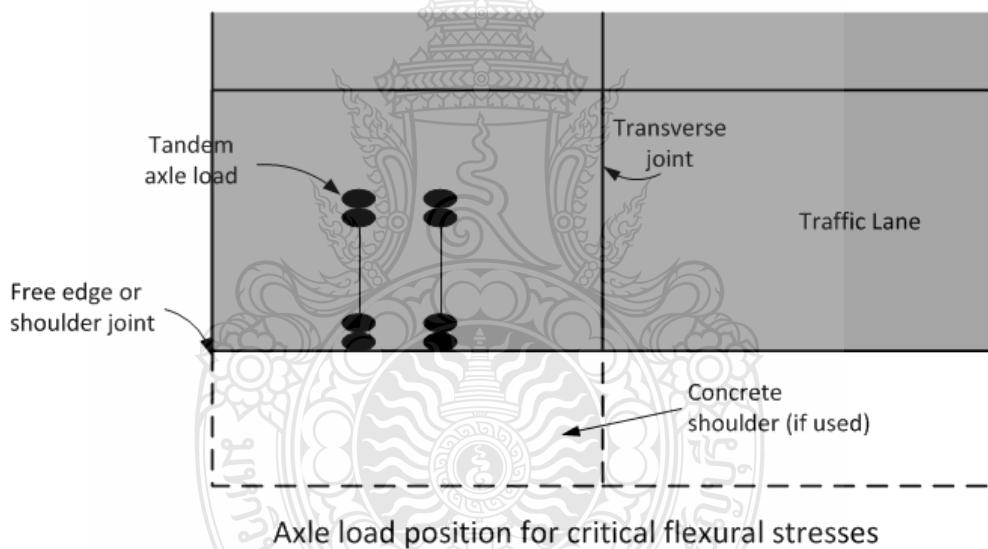
4. ปริมาณจราจร

การออกแบบจะใช้ปริมาณจราจรเป็นในการคาดการณ์การวิบัติของโครงสร้างถนนที่อาจเกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน โดยอาศัยผลการเก็บปริมาณจราจรแสดงดังค่าปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Traffic, ADT), ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักเฉลี่ยต่อ

วัน (Average Daily Truck Traffic, ADTT) รวมถึงข้อมูลการกระจายน้ำหนักบรรทุกลงเพลลา (Axle load distribution) ซึ่งหาได้จากด้านข้างน้ำหนักบรรทุกทุกตามหน่วยงานที่รับผิดชอบ

2.6.2 กระบวนการในการออกแบบ (Design procedure)

กระบวนการออกแบบอาศัยพื้นฐานจากการวิเคราะห์หน่วยแรงและค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีต ได้แก่ รอยต่อ, มุมแผ่น และขอบแผ่น ด้วยโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการออกแบบจะทำการกำหนดความหนาแผ่นพื้นเริ่มต้นด้วยวิธีการทดลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งแผ่นพื้นนี้จะต้องรองรับปริมาณจราจรที่เติบโตขึ้นได้ตลอดอายุการใช้งาน และต้องไม่เกิดความเสียหายจากการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue) รวมถึงความเสียหายจากการสึกกร่อน (Erosion) เช่น การอัดทะลักของวัสดุมวลรวมขนาดเล็กบริเวณรอยต่อ, การสึกกร่อนในชั้นฐานรองรับ รวมถึงการทรุดตัวต่างระดับบริเวณรอยต่อ เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งหน่วยแรงดัดวิกฤตเมื่อน้ำหนักเพลลากระทำแผ่นพื้น [12]

เมื่อพิจารณาในส่วนของการวิเคราะห์ความล้า วิธีของ PCA กำหนดให้น้ำหนักกระทำใกล้กับช่วงกึ่งกลางขอบแผ่นด้านนอก เป็นตำแหน่งที่เกิดค่าหน่วยแรงดัดวิกฤตที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ ดังรูปที่ 2.13 ผลกระทบจากระยะห่างของรอยต่อตามขวางและอุปกรณ์ถ่ายน้ำหนักบริเวณรอยต่อมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อหน่วยแรง ดังนั้น PCA จึงกำหนดตารางสำหรับกำหนดค่าหน่วยแรงเทียบเท่า (Equivalent stress) จากความล้าในกรณีที่โครงสร้างถนนคอนกรีตมีไหล่ทางและ

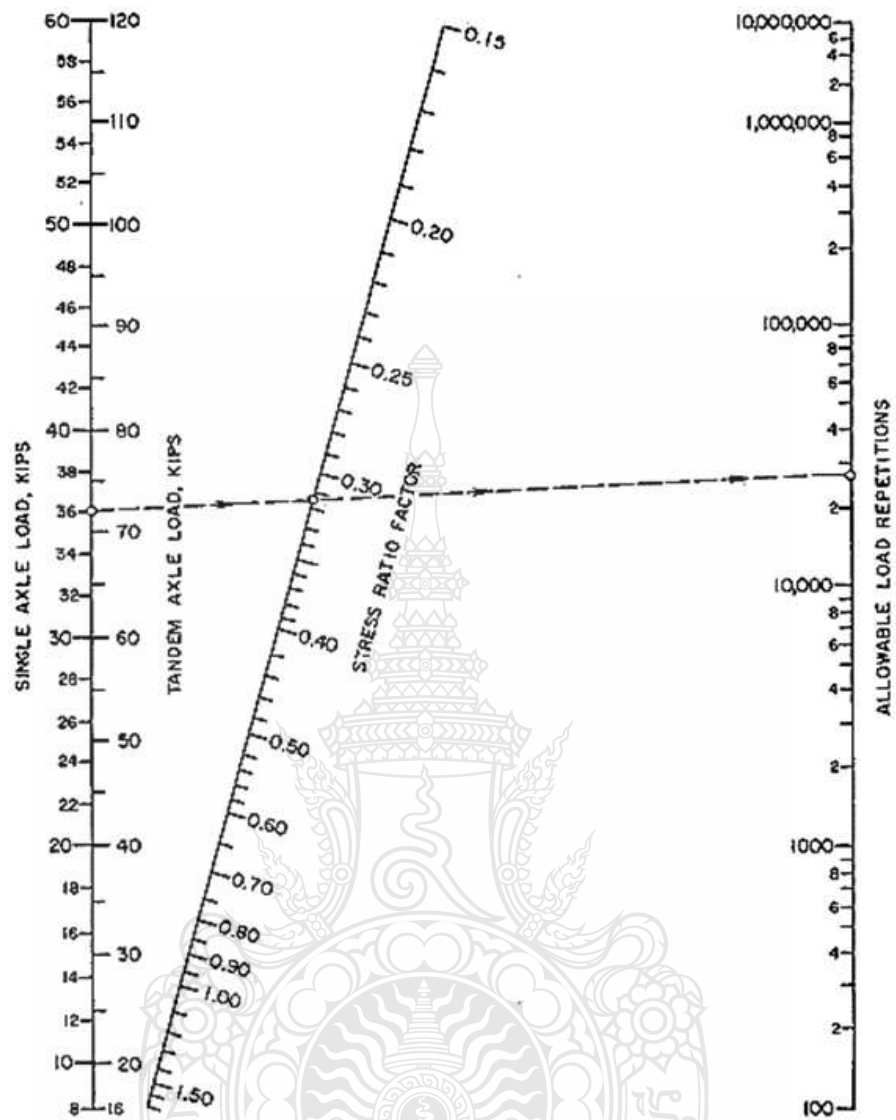
ไม่มีไหล่ทางคอนกรีตตัดตารางที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.6 โดยเฉพาะในกรณีหลัง การไม่ใช่ไหล่ทางคอนกรีตมีผลกระทบต่อหน่วยแรงอย่างมาก เนื่องจากแผ่นพื้นไม่สามารถถ่ายน้ำหนักข้ามไปยังไหล่ทางคอนกรีตได้จึงทำให้กรณีดังกล่าวมีหน่วยแรงเทียบเท่าสูง ปริมาณหน่วยแรงวิกฤตสามารถลดลงได้อย่างมากเมื่อถนนคอนกรีตที่ออกแบบกำหนดให้มีไหล่ทางคอนกรีต ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปหาค่าอัตราส่วนของหน่วยแรง (Stress ratio) ซึ่งในที่นี้หมายถึงอัตราส่วนของหน่วยแรงเทียบเท่าต่อกำลังรับแรงตัดของคอนกรีต ค่าดังกล่าวจะนำไปสู่การกำหนดจำนวนเที่ยวบดทับที่ยอมรับได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.5 หน่วยแรงเทียบเท่า กรณีแผ่นพื้นมีไหล่ทางคอนกรีต[8]

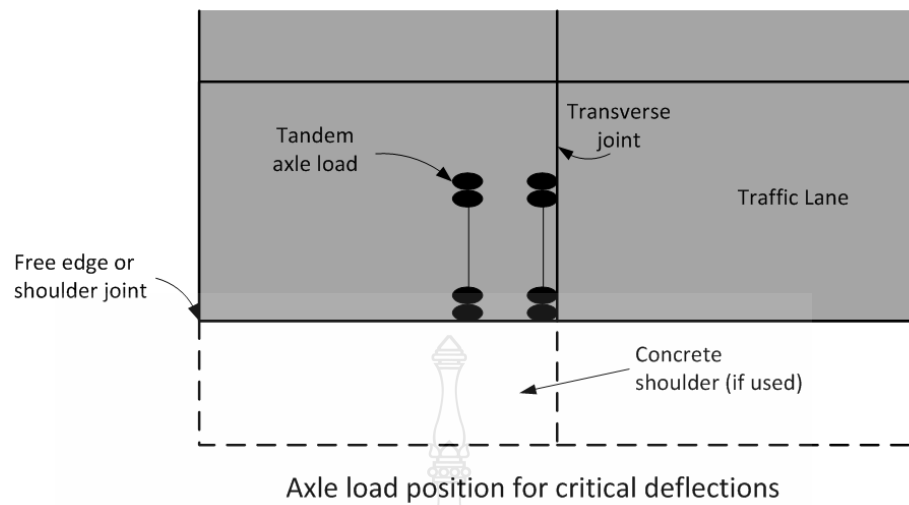
ความหนา (นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/173	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/93	93/87	87/79	81/71	77/67

ตารางที่ 2.6 หน่วยแรงเทียบเท่า กรณีแผ่นพื้นไม่มีไหล่ทางคอนกรีต[8]

ความหนา (นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78



รูปที่ 2.14 แผนภูมิสำหรับวิเคราะห์จำนวนที่ยาวค้ำที่ข้อมให้จากการวิเคราะห์ความล้า[37]



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งค่าการทรุดตัววิกฤตเมื่อน้ำหนักเพลากระทำแผ่นพื้น [12]

ในขณะที่การวิเคราะห์การสึกกร่อน มักพบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นมาจากค่าการทรุดตัวมากกว่าหน่วยแรงดัด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะกำหนดให้น้ำหนักเพลากระทำที่มุมแผ่นดังรูปที่ 2.15 และเป็นตำแหน่งที่มีค่าการทรุดตัววิกฤตที่สุด ทั้งนี้ในการวิเคราะห์การสึกกร่อนจะใช้ค่า Erosion factor ในการวิเคราะห์เป็นหลัก ทำให้ในขั้นตอนดังกล่าวจะไม่ถูกนำมากล่าวถึงในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากไม่มีผลต่อความล้าของถนนคอนกรีต

2.7 การวิเคราะห์ความล้า (Fatigue analysis)

Titus-Glover และคณะ [38] ได้อธิบายว่าโครงสร้างผิวทางคอนกรีตต้องรองรับปริมาณจราจรและความผันผวนของอุณหภูมิตลอดอายุการใช้งาน ในแต่ละเที่ยวของน้ำหนักระทำจะส่งผลให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracking) [39] ขึ้นทีละน้อย และเมื่อจำนวนครั้งของน้ำหนักระทำดังกล่าวมากขึ้นจะทำให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นและแพร่กระจายจากพื้นที่ที่มีหน่วยแรงดึงสูงสุด จากงานศึกษาของ Hiller [6] ในปี ค.ศ. 2007 ได้ระบุว่าวิธีการออกแบบผิวทางคอนกรีตเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ มักจะมุ่งเน้นพิจารณาความเสียหายรอยร้าวจากความล้า (Fatigue cracking) ตามขวางของผิวทางเนื่องจากน้ำหนักระทำที่กึ่งกลางของขอบแผ่น เช่นเดียวกับงานศึกษาของ Setyawan และคณะ [34] ที่พบว่าหน่วยแรงจากปริมาณจราจรและความลาดชันอุณหภูมิให้ค่าวิกฤตที่ขอบแผ่น จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความล้าต้องพิจารณาที่กึ่งกลางขอบตามยาวหรือขอบอิสระ

เป็นที่ทราบกันดีว่าพฤติกรรมความล้าของผิวทางคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อการคำนวณความเสียหายแบบความล้าสะสม (Cumulative fatigue damage) ในการออกแบบผิวทางคอนกรีต Miner ได้ตั้งกฎการวิเคราะห์ความล้าขึ้นภายใต้สมมติฐานของความเสียหายดังกล่าวว่าเกิดจากผลรวมของอัตราส่วนของจำนวนที่เย็บดทับที่เกิดขึ้นจริงต่อจำนวนที่เย็บดทับที่ยอมให้ด้วยแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง แสดงดังสมการที่ 2.32

$$FD = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i}{N_i} \quad (2.32)$$

เมื่อ FD คือความเสียหายแบบความล้าสะสม
 n_i คือจำนวนที่เย็บดทับที่เกิดขึ้นจริง
 N_i คือจำนวนที่เย็บดทับที่ยอมให้

ทั้งนี้จำนวนที่เย็บดทับสะสมที่ยอมให้สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองความล้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักปรากฏในรูปแบบสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของหน่วยแรงดึงสูงสุดและกำลังรับแรงดัด ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.8 แบบจำลองความล้า (Fatigue models)

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา นักวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจและศึกษาถึงแบบจำลองความล้าสำหรับคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต ในช่วงแรกของการศึกษาจำเป็นต้องอาศัยการสังเกตและสำรวจพฤติกรรมของโครงสร้างผิวทางจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตในช่วงระหว่างการให้บริการจนกระทั่งผิวทางเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งในเวลาต่อมาแบบจำลองความล้าสามารถกำหนดได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เช่นกัน [39]

รูปแบบความสัมพันธ์ทั่วไปของแบบจำลองความล้ามักถูกนำเสนอให้อยู่ในความสัมพันธ์แบบ S-N หรือ F-S ซึ่งหมายถึงแบบจำลองที่คาดการณ์จำนวนที่เย็บดทับที่ยอมให้ (N) โดยอาศัยการนำเข้าค่าอัตราส่วนของหน่วยแรง (S) จากหน่วยแรงดึงสูงสุดต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (F) เป็นฐานในการวิเคราะห์ดังสมการที่ 2.33

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_f} = A + B \log N_f \quad (2.33)$$

เมื่อ σ_{\max} คือหน่วยแรงสูงสุด (โดยทั่วไปหมายถึงผลรวมจากน้ำหนักบรรทุกจรจร และความลาดชันอุณหภูมิแบบบวก)
 A, B คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงตัวเลข
 N_f คือจำนวนเที่ยวคัทที่ข้อมให้
 f_f คือค่าโมดูลัสการแตกหักจากการทดสอบด้วยวิธีใช้แรงกดสองจุด

นอกจากนั้น Tepfers ได้เสนอให้พิจารณาหน่วยแรงขั้นต่ำซึ่งหมายถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นแม้ไม่ได้รับน้ำหนักกระทำเข้ามาใช้ประกอบการคาดการณ์จำนวนเที่ยวคัทที่ข้อมให้ โดยอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงขั้นต่ำต่อหน่วยแรงสูงสุด (R) ดังสมการที่ 2.34 และได้สร้างรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองความล้าขึ้นมาใหม่ที่มีความสัมพันธ์แบบ F-S-R ดังสมการที่ 2.35

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (2.34)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_f} = 1 - \beta(1-R) \log N_f \quad (2.35)$$

เมื่อ σ_{\min} คือหน่วยแรงขั้นต่ำ (โดยทั่วไปหมายถึงหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ)
 β คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงตัวเลข

Smith และคณะ [5] ได้อธิบายว่าแบบจำลองความล้าที่ถูกพัฒนาขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองความล้า เช่น ฐานข้อมูลทดสอบ, เงื่อนไขการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต, ตำแหน่งของหน่วยแรงวิกฤต, การพิจารณาหน่วยแรงในการคำนวณ, วิธีการคำนวณ, ผลกระทบจากปริมาณจรจร และช่วงของรอบการให้แรงกระทำขณะทดสอบ แบบจำลองความล้าที่นิยมใช้ในอดีตได้แก่ แบบจำลอง Zero-Maintenance ซึ่งถูกเสนอโดย Darter และ Barenberg ในปี ค.ศ. 1977 [5] ดังสมการที่ 2.36

$$\log N_f = 17.61 - 17.61 \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \quad (2.36)$$

ต่อมา PCA ได้พัฒนาแบบจำลองความล้าที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในวิธีการออกแบบเชิงประจักษ์ โดยในปี ค.ศ. 1922 แบบจำลองความล้าชุดแรกของ PCA พัฒนาขึ้นจากข้อมูลทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตจำนวนมากของ Clemmer และได้มีการปรับแก้ในอีกหลายปีด้วยกัน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1985 แบบจำลองของ PCA ถูกเสนอโดย Packard และ Tayabji [8] ประกอบไปด้วย 3 เงื่อนไขดังสมการต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \geq 0.55; \quad \log N_f = 17.737 - 12.077 \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \quad (2.37)$$

$$\text{เมื่อ } 0.45 < \frac{\sigma_{\max}}{f_f} < 0.55; \quad N_f = \left(\frac{4.2577}{\left(\frac{\sigma_{\max}}{f_f} \right) - 0.4325} \right)^{3.268} \quad (2.38)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \leq 0.45; \quad N_f = \text{unlimited} \quad (2.39)$$

ทั้งนี้กระบวนการพัฒนาแบบจำลองความล้าดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากความลาดชันอุณหภูมิในกระบวนการพัฒนาแต่อย่างใด ทำให้ความหนาของผิวทางคอนกรีตที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบมีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้ได้มีการศึกษายืนยันว่าการไม่พิจารณาผลจากความลาดชันอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพในการรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลาดียวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Load, ESAL) ลดลงค่อนข้างมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการคาดการณ์ ESAL กรณีพิจารณาผลจากปริมาณจราจรร่วมกับความลาดชันอุณหภูมิกับกรณีพิจารณาผลจากปริมาณจราจรเท่านั้น พบว่าค่า ESAL ในกรณีแรกมีค่าต่ำกว่ากรณีหลังมากกว่า 10 เท่า [40] เช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในผิวทางสนามบินของ Kim และคณะ [41] ที่พบว่าเมื่อพิจารณาผลจากความลาดชันอุณหภูมิในการวิเคราะห์หน่วยแรงโดยรวม จะทำให้หน่วยแรงที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากหน่วยแรงจากน้ำหนักปริมาณจราจรมากกว่า 1 เมกะปาสคาล

แบบจำลองความล้าที่นำผลจากความลาดชันอุณหภูมิมาใช้ในการพิจารณาหน่วยแรงโดยรวมสูงสุดเพื่อพัฒนาแบบจำลองความล้าเป็นครั้งแรกเกิดขึ้นในโครงการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองความล้า NCHRP 1-26 โดย Thompson และ Barenberg [5] ในปี ค.ศ. 1992 โดยใช้ฐานข้อมูลของถนนทดสอบขนาดจริงของ Corps of Engineers (COE) และถนนทดสอบของ AASHTO เพื่อพัฒนาแบบจำลองความล้าขึ้น โดยที่แบบจำลองความล้าของ NCHRP 1-26 จะถูกแบ่งออกเป็น 2 สมการดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{\sigma_{\max}}{f_r} > 1.25 ; \quad \log N_f = -1.7136 \frac{\sigma_{\max}}{f_r} + 4.284 \quad (2.40)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\sigma_{\max}}{f_r} < 1.25 ; \quad \log N_f = 2.8127 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_r} \right)^{-1.2214} \quad (2.41)$$

เมื่อ N_f คือจำนวนที่เขยวคทับสะสมที่ทำให้ผิวทางเกิดรอยร้าวร้อยละ 50 ของพื้นที่ σ_{\max} คือหน่วยแรงสูงสุด คำนวณได้จากโปรแกรม ILLI-SLAB

2.9 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างผิวทาง PAVERS

โปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนามาจากโปรแกรม UEC-Slab โดย Van Cauwelaert และคณะ [42] โปรแกรมดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่อง FWD และคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ อีกทั้งยังสามารถออกแบบโครงสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นและผิวทางแบบเกร็งโดยการจำลองน้ำหนักของเครื่องบินหรือน้ำหนักจากรถบรรทุกได้ด้วยการพิจารณาให้แบบจำลองคอนกรีตรองรับโดยชั้นฐานรองรับที่มีพฤติกรรมแบบ Winkler หรือ Pasternak

นอกจากผลของน้ำหนักบรรทุกแล้ว โปรแกรม PAVERS ยังสามารถวิเคราะห์หน่วยแรงโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิได้ โดยนำเข้าข้อมูลความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในโปรแกรม และข้อมูลความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิ (Frequency distribution) 11 ระดับชั้น ในอีกกรณีหนึ่งผู้ใช้สามารถหาความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดได้จากการนำเข้า (Import) ความหนาของผิวทางคอนกรีตและทำนายความลาดชันอุณหภูมิด้วยสมการของ Van der Kreeft ซึ่งเป็นสมการที่ถูกพัฒนาในประเทศเบลเยียมดังสมการที่ 2.42

$$\Delta t_{\text{Van der Kreeft}} = 0.0995 - 0.00015h \quad (2.42)$$

การพิจารณาถึงศักยภาพในเชิงประจักษ์พบว่าโปรแกรม PAVERS สามารถคาดการณ์อายุการใช้งานของผิวทางคอนกรีตได้โดยการคำนวณจำนวนที่เขยวคทับที่ยอมให้ด้วยฐานข้อมูลแบบจำลองความล้าในรูปของความสัมพันธ์ทั่วไปดังสมการที่ 2.43 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในสมการ รวมถึงเกณฑ์การพิจารณาอัตราส่วนของหน่วยแรงระหว่างขีดจำกัดล่าง ($Limit_0$) และขีดจำกัดบน ($Limit_1$) สามารถหาได้จากตารางที่ 2.7

$$\text{เมื่อ } \text{Limit}_0 \leq \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \leq \text{Limit}_1; \quad \log N_f = \frac{C_0 \left(C_1 - C_2 \frac{\sigma_{\max}}{f_f} \right)}{C_3 - C_4 \frac{\sigma_{\min}}{f_f} - C_5 \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}} \quad (2.43)$$

จากแบบจำลองที่แสดงในโปรแกรม PAVERS จะถูกเลือกมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ โดยรายละเอียดเช่น ข้อมูลถนนจำลอง ขนาดของน้ำหนักรถกระทำ ข้อมูลความลาดชัน อุณหภูมิ รวมทั้งวิธีการดำเนินงานจะถูกเสนออย่างละเอียดอีกครั้งในบทที่ 3

ตารางที่ 2.7 ฐานข้อมูลแบบจำลองความถี่ในโปรแกรม PAVERS [42]

Relation	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	Limit ₀	Limit ₁
CE-Westergaard	11.111	1.000	0.909	1.000	0.00	0.00	0.50	1.00
Dominichini	10.480	1.000	1.000	1.000	0.00	1.00	0.50	1.00
Eisenmann	11.790	1.000	1.029	1.000	0.00	0.00	0.50	1.00
Iwama	16.720	1.000	0.965	1.000	0.00	0.00	0.50	1.00
PCA	11.730	1.000	1.030	1.000	0.00	0.00	0.55	1.00
Tepfers-Kutti	14.599	1.000	1.000	1.000	0.00	1.00	0.50	1.00
UEC	12.903	0.996	1.000	1.000	0.75	0.00	0.50	0.83
Vencon 1992	16.800	0.900	1.000	1.067	1.00	0.00	0.50	0.83
Yao	13.020	0.944	1.000	1.000	0.00	1.00	0.50	1.00

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาแบบจำลองความล่าช้าภายใต้หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิจนเพื่อให้พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีตมีความสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงในประเทศไทย จึงจำเป็นต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิของผิวทางคอนกรีตจากแปลงทดสอบในสนามเป็นระยะเวลาหนึ่งปี เพื่อให้ฐานข้อมูลครอบคลุมครบทุกฤดูกาล เช่นเดียวกับงานวิจัยในต่างประเทศที่ผ่านมาหลายฉบับ โดยขั้นตอนการศึกษาในครั้งนี้จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษารวบรวมเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตในสนามเป็นระยะเวลาหนึ่งปี
3. กำหนดถนนจำลองประเภท JRCP ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง
4. วิเคราะห์ข้อมูลจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีต และสรุปความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิจน 11 ระดับชั้น เพื่อนำเข้าข้อมูลในโปรแกรม PAVERS 2.80
5. วิเคราะห์หน่วยแรงจากถนนจำลอง JRCP ด้วยวิธีเชิงประจักษ์ของ PCA 1984 เปรียบเทียบกับหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิจนด้วยวิธี Eisenmann และจากโปรแกรม PAVERS 2.80
6. วิเคราะห์หน่วยแรงจากหน้าหน้าบรทุกจรจรจากถนนจำลอง JRCP ด้วยวิธี Westergaard และจากโปรแกรม PAVERS 2.80
7. วิเคราะห์จำนวนเที่ยวรถที่ข้อมาให้จากแบบจำลองความล่าช้าในฐานข้อมูลของโปรแกรม PAVERS 2.80 ด้วยหน่วยแรงจากทฤษฎี Westergaard และ Eisenmann และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PAVERS 2.80 และผลการวิเคราะห์จากวิธี PCA1984
8. สรุปผลที่ได้จากการศึกษา
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และตีพิมพ์งานวิจัยเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ

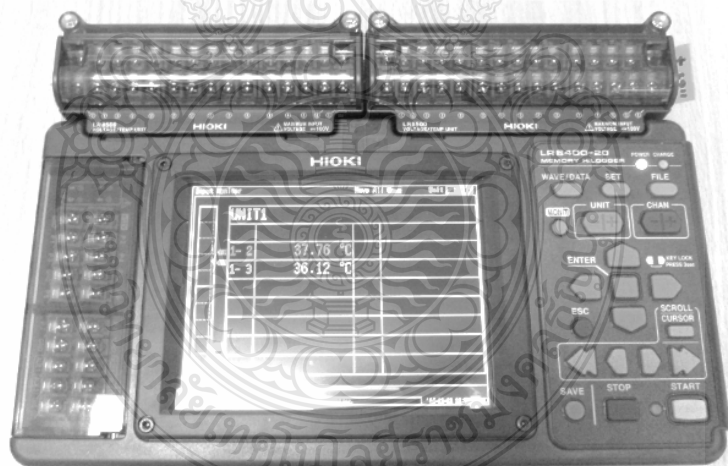
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.1.1 สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด K ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีตจากแปลงทดสอบในสนามจากปลายด้านหนึ่งของสาย ขณะที่ปลายอีกด้านจะเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลา

3.1.2 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลา (Data logger thermometer) รุ่น HIOKI LR8400-20 ดังรูปที่ 3.1 คือเครื่องมือสำหรับบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้จากสายวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถตั้งค่าให้เก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องหรือหยุดอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนดได้ และสามารถกำหนดช่วงความถี่ของการเก็บข้อมูลได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้เก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 1 ชั่วโมง

3.1.3 โปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80 คือโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างผิวทาง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวรถที่สะสมภายใต้หน้ารถบรรทุกจากรและ ความลาดชันอุณหภูมิที่มีการจำแนกความถี่การกระจายตัวตลอดระยะเวลาหนึ่งปี



รูปที่ 3.1 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลารุ่น HIOKI LR8400-20

3.2 แปลงทดสอบในสนาม

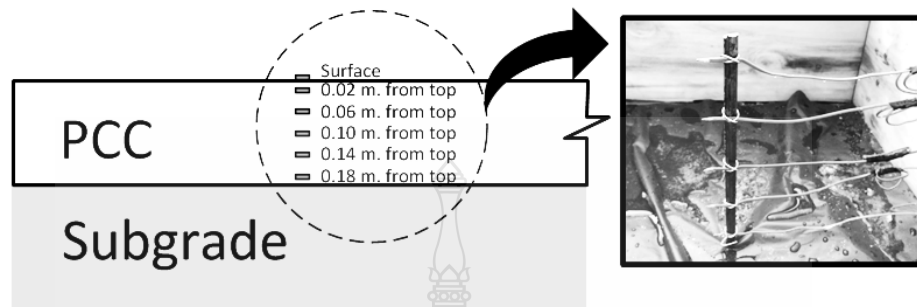
การเก็บข้อมูลของอุณหภูมิจากแปลงทดสอบ จะใช้ข้อมูลจากแปลงทดสอบชุดเดียวกับงานวิจัยของประกาศ และพุทธิพล [10] ที่มีการศึกษารวบรวมข้อมูลสิ้นสุดในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558 โดยที่แปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตถูกสร้างขึ้นภายในพื้นที่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี แสดงดังรูปที่ 3.2 แผ่นพื้นคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 เมกะปาสคาล (280 กก./ซม.²) และ 41.2 เมกะปาสคาล (420 กก./ซม.²) แผ่นพื้นมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.50 × 0.50 ม. เช่นเดียวกับแปลงทดสอบจากงานวิจัยในต่างประเทศ [24],[25],[26] โดยแผ่นพื้นคอนกรีตหนา 0.20 ม. ใช้เป็นตัวแทนของผิวทางถนน และแผ่นพื้นคอนกรีตหนา 0.60 ม. ใช้เป็นตัวแทนของผิวทางสนามบิน ที่ผิวล่างระหว่างชั้นฐานรองรับกับแผ่นพื้นคอนกรีตได้ใช้แผ่นพลาสติกปูรองพื้นผิวก่อนทำการเทคอนกรีตเพื่อเป็นการป้องกันการผลกระทบจากความชื้นของดินที่มีผลต่อคอนกรีต



รูปที่ 3.2 แปลงทดสอบในสนาม

การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ สายสำหรับวัดอุณหภูมิอากาศหนึ่งตำแหน่ง และสายสำหรับวัดอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีต จากการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลเฉพาะแผ่นพื้นหนา 0.20 ม. โดยมีรายละเอียดของตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิประกอบไปด้วยตำแหน่งพื้นผิว, ระยะความลึกที่ 0.02, 0.06, 0.10, 0.14 และ 0.18 ม. จากระดับผิวบนของแผ่นพื้น ดัง

รูปที่ 3.3 โดยที่สายวัดอุณหภูมิจะผูกยึดตำแหน่งเข้ากับเหล็กเส้นกลมและไม่ให้มีการสัมผัสกันกับ ส่วนปลายของสายวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ

สายวัดอุณหภูมิทุกเส้นจะถูกร้อยผ่านท่อพีวีซีสำหรับร้อยสายไฟที่ได้ทำการเดินท่อเข้ากับห้องทดสอบข้างเคียงกับพื้นที่แปลงทดสอบในสนาม โดยสายวัดอุณหภูมิทุกเส้นจะเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลา ดังตารางที่ 3.1 หลังจากทำการเทคอนกรีตเสร็จสิ้นจนคอนกรีตมีอายุครบ 28 วันในวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2558 จึงเริ่มทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีต

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งการเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามช่วงเวลา

Unit 1 ^a				Unit 2 ^b			
Chanel	ตำแหน่งสายวัดอุณหภูมิ	Chanel	ตำแหน่งสายวัดอุณหภูมิ	Chanel	ตำแหน่งสายวัดอุณหภูมิ	Chanel	ตำแหน่งสายวัดอุณหภูมิ
1-1 ^c	0.02	1-9 ^d	0.26	2-1 ^c	0.02	2-9 ^d	0.26
1-2 ^c	0.06	1-10 ^d	0.34	2-2 ^c	0.06	2-10 ^d	0.34
1-3 ^c	0.10	1-11 ^d	0.42	2-3 ^c	0.10	2-11 ^d	0.42
1-4 ^c	0.14	1-12 ^d	0.50	2-4 ^c	0.14	2-12 ^d	0.50
1-5 ^c	0.18	1-13 ^d	0.58	2-5 ^c	0.18	2-13 ^d	0.58
1-6 ^d	0.02			2-6 ^d	0.02	2-14	อุณหภูมิพื้นผิว
1-7 ^d	0.10			2-7 ^d	0.10	2-15	อุณหภูมิอากาศ
1-8 ^d	0.18			2-8 ^d	0.18		

^aUnit 1 แผ่นพื้นคอนกรีตค่ากำลังรับแรงอัด 27.5 เมกะปาสกาล, ^bUnit 2 แผ่นพื้นคอนกรีตค่ากำลังรับแรงอัด 41.2 เมกะปาสกาล

^cแผ่นพื้นหนา 0.20 ม., ^dแผ่นพื้นหนา 0.60 ม.

3.3 วิธีการดำเนินงาน

3.3.1 เก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีต หลังจากคอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน ตั้งแต่วันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2558 จนถึงวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2559 เป็นระยะเวลาหนึ่งปี หลังจากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติรายเดือนและรายปี รวมถึงการคำนวณค่าความลาดชันอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาหนึ่งปี

3.3.2 สรุปความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิตลอดระยะเวลาหนึ่งปี

นำค่าความลาดชันอุณหภูมิตลอดระยะเวลาหนึ่งปีที่ได้มาจำแนกความถี่การกระจายตัว โดยใช้เกณฑ์การจำแนกที่แสดงในโปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80 จำนวน 11 ระดับชั้นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละระดับชั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด ดังนั้นการจำแนกความถี่จะดำเนินการภายใต้ 2 เงื่อนไขดังนี้

1. ความถี่การกระจายตัวโดยใช้ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากสมการ Van der Kreeft (เลือกการนำเข้าข้อมูลด้วยฟังก์ชันความหนา) ดังสมการที่ 2.42 สำหรับถนนจำลอง JRCp หนา 0.23 ม. จะได้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.065 °ซ./มม.

2. ความถี่การกระจายตัวโดยใช้ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตในสนาม โดยมีเงื่อนไขว่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่โปรแกรม PAVERS วิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.100 °ซ./มม.

Gradient	Percentage
No Gradient	65.0
0.010	7.6
0.020	6.0
0.030	5.2
0.040	4.5
0.050	4.2
0.060	3.2
0.070	1.8
0.080	1.2
0.090	0.8
0.100	0.5

รูปที่ 3.4 การนำเข้าความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิในโปรแกรม PAVERS 2.80

3.3.3 กำหนดถนนจำลอง JRCP เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้าง

สร้างถนนจำลอง JRCP จากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง และมีการสมมติให้ถนน JRCP มีรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่นดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากถนนประเภทนี้มักเกิดความเสียหายในลักษณะดังกล่าวบริเวณกึ่งกลางแผ่น โดยถนนจำลอง JRCP มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

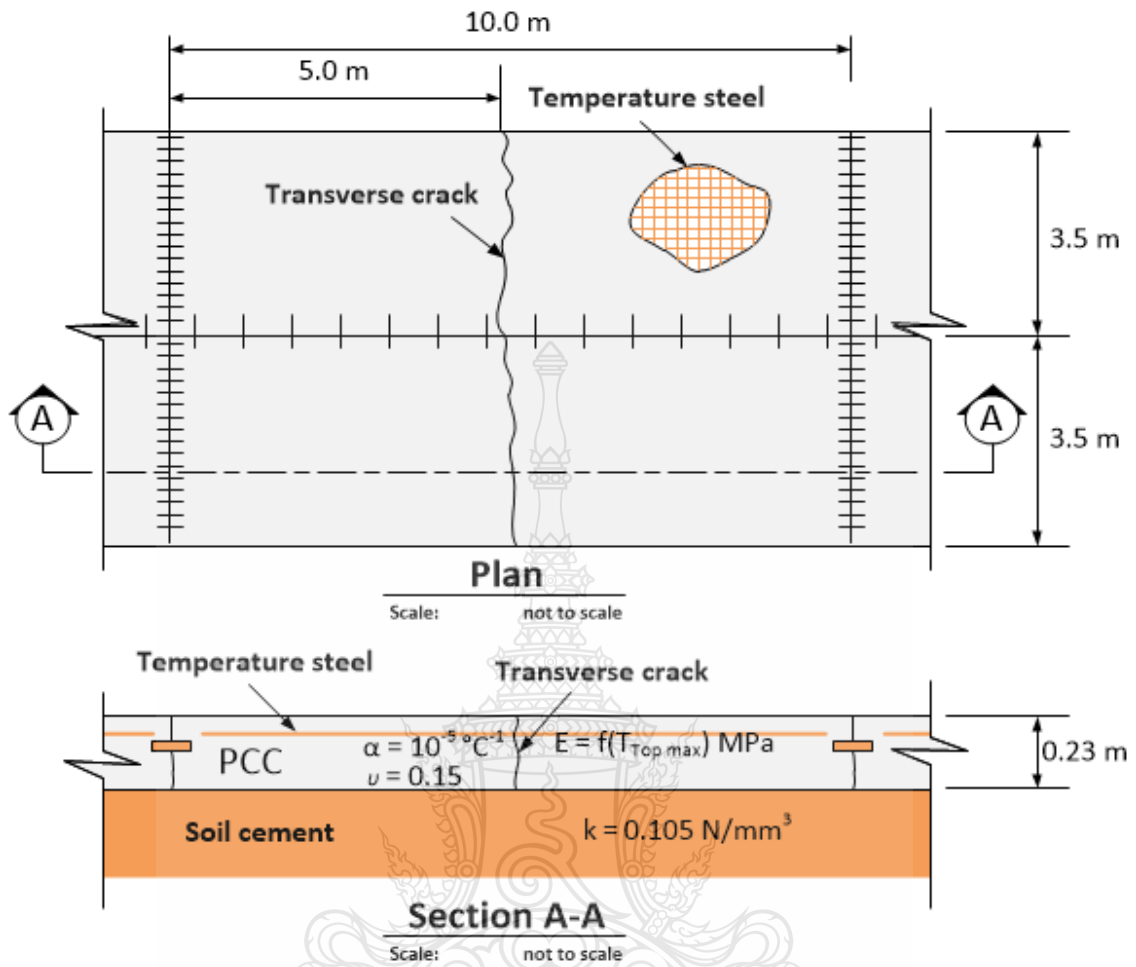
1. ถนน JRCP มีความกว้างช่องจราจร 3.5 ม. ระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวาง 10 ม. และมีความหนา 0.23 ม. โดยกำหนดให้ถนน JRCP เกิดรอยร้าวตามขวางขึ้นที่กึ่งกลางแผ่นและถูกยึดรั้งไม่ให้แยกออกจากกันด้วยเหล็กเสริม รอยร้าวนี้สามารถถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นได้ดีเยี่ยม (ค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นพื้นร้อยละ 100)

2. ถนนจำลอง JRCP อยู่ในระบบโครงสร้าง 2 ชั้นทาง โดยผิวทางคอนกรีตถูกรองรับด้วยชั้นฐานรองรับดินซีเมนต์ ที่มีค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับ เท่ากับ 0.105 เมกะปาสกาล/มม. ทั้งนี้ได้มีการศึกษาโดย Moody [43] ว่าถนนทดสอบ 42 จุดที่ก่อสร้างบนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ พบรอยร้าวตามขวางถึงร้อยละ 33

3. ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.15, ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตเท่ากับ 10^{-5} /°ซ กำลังรับแรงดัดเป็นไปตามสมการที่ 2.30 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1 [10] กรณีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 27.5 เมกะปาสกาล โดยที่อุณหภูมิที่แสดงในสมการได้แก่อุณหภูมิพื้นผิวคอนกรีตสูงสุดที่วัดได้ตลอดระยะเวลาหนึ่งปี

$$E = -193.26T + 43,819 \quad (3.1)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิสูงสุดของผิวทางคอนกรีตที่วัดได้ตลอดระยะเวลา 1 ปี (°ซ.)



รูปที่ 3.5 ถนนจำลอง JRCP กรณีมีรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่น

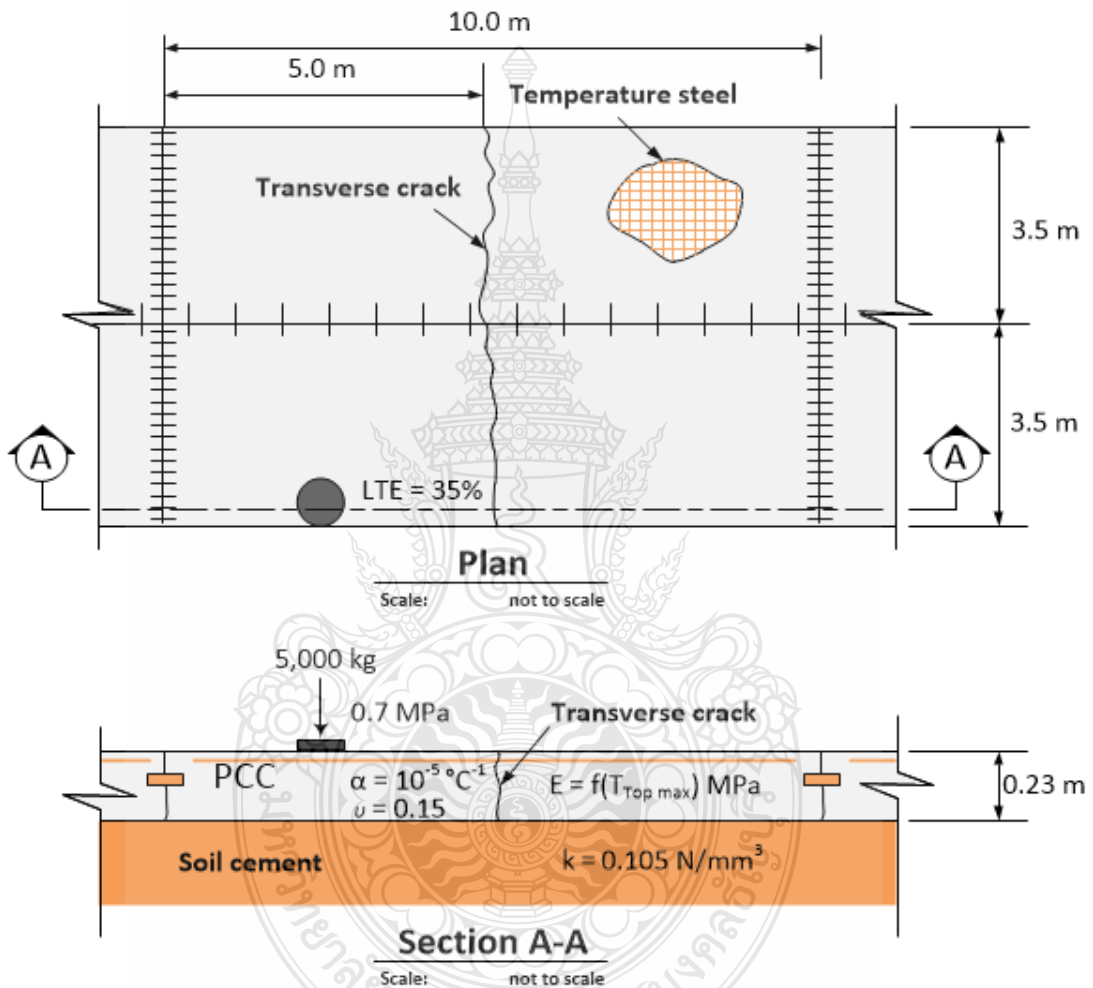
3.3.4 วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้าง

นำถนนจำลอง JRCP ที่กำหนดไว้มาวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น โดยวิธีสำหรับการวิเคราะห์จะแสดงดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักลงเพลาเดี่ยวด้วยวิธี PCA 1984 โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักลงเพลาเดี่ยวจะพิจารณาว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางขอบอิสระ และในขั้นตอนนี้จะกำหนดให้ถนนจำลอง JRCP ไม่มีไหล่ทางคอนกรีตเนื่องจากกรณีดังกล่าวจะให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่ากรณีถนน JRCP มีไหล่ทางคอนกรีต

2. วิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอที่กึ่งกลางขอบอิสระด้วยทฤษฎี Eisenmann ที่สภาวะวิกฤต (ความลาดชันอนุกรมสูงสุด)

3. วิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรที่กึ่งกลางขอบอิสระ ด้วยทฤษฎี Westergaard โดยกำหนดให้แรงดันกระทำที่ขอบอิสระขนาด 0.7 เมกะปาสคาล (น้ำหนักเพลลาเดี่ยวมาตรฐานขนาด 10 ตัน) และค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นพื้น (LTE) ที่ขอบอิสระมีค่าร้อยละ 35 [32] ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขนาดของน้ำหนักบรรทุกทุกเพลลาเดี่ยวมาตรฐานกระทำที่กึ่งกลางขอบอิสระสำหรับวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Westergaard

3.3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธี PCA 1984 กับทฤษฎีของ Eisenmann

ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากวิธีเชิงประจักษ์ของ PCA 1984 ซึ่งเป็นหน่วยแรงจากน้ำหนักเพลาดูเดียวกับหน่วยแรงโก่งงอซึ่งเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสถานะที่ถนนคอนกรีตไม่มีการรองรับน้ำหนักบรรทุกจร

3.3.6 วิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างด้วยโปรแกรม PAVERS 2.80

โปรแกรม PAVERS มีวิธีการพิจารณาพฤติกรรมตอบสนองรวมทั้งการนำเข้าข้อมูลที่แตกต่างกันจากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น ข้อมูลที่สำคัญและจำเป็นในการนำเข้าโปรแกรมได้แก่คุณสมบัติโดยทั่วไปของถนนจำลอง JRCP ขนาดและตำแหน่งของน้ำหนักเพลาดูมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

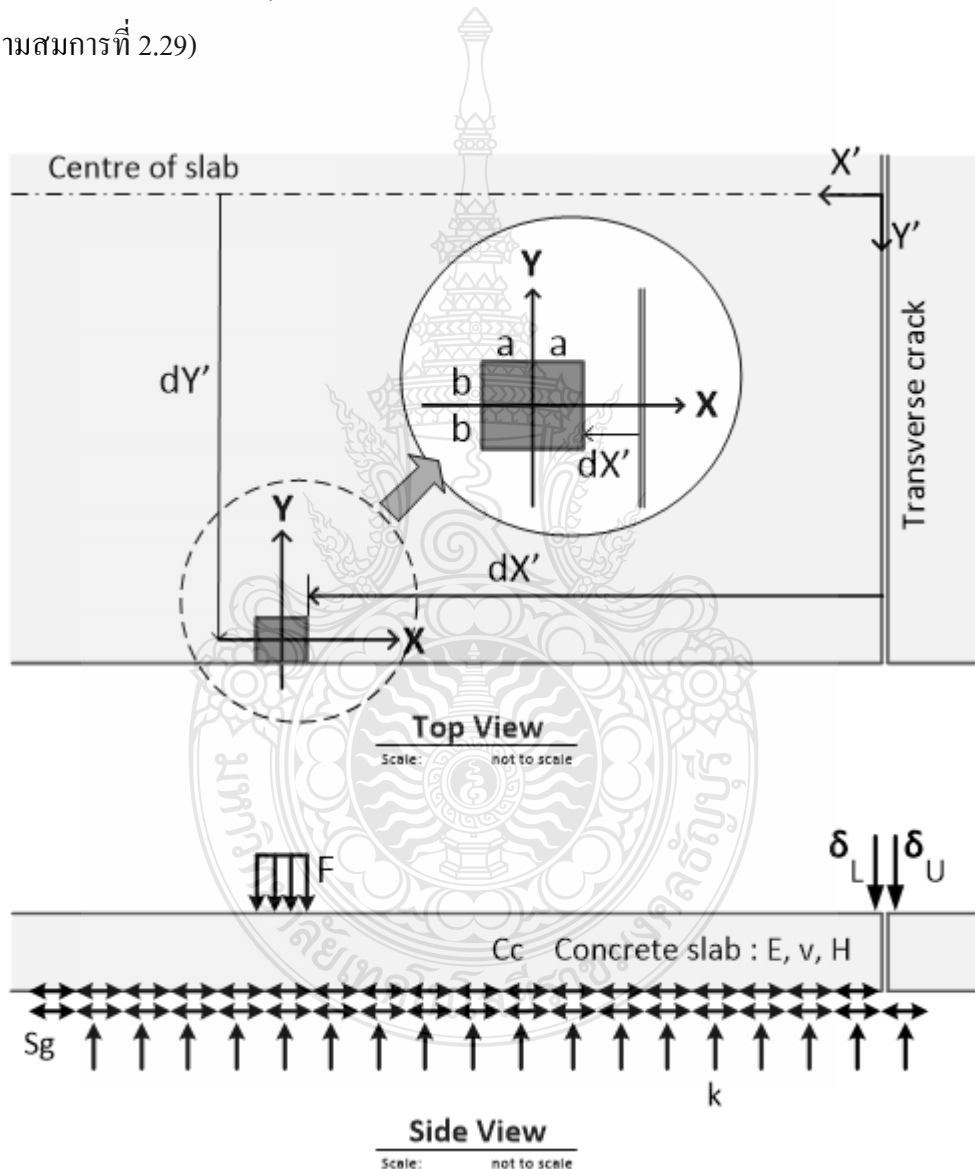
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลถนนจำลอง JRCP สำหรับ PAVERS 2.80

Parameters	Values
Length of the slab	5,000 mm
Width of the slab	3,500 mm
Slab thickness	230 mm
Concrete properties	Poisson's ratio = 0.15 Compressive strength = 27.5 MPa Flexural strength = 3.9 MPa
Modulus of subgrade reaction	0.105 MPa/mm

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลขนาดและตำแหน่งน้ำหนักเพลาดูมาตรฐานสำหรับ PAVERS 2.80

Parameters	Values
2a and ab	240 mm
Contact pressure	0.7 MPa
Load coordinates	X = 0 mm Y = 0 mm
Distance from joint (dX')	2,380 mm
Distance from center (dY')	1,630 mm

การจำลองถนน JRPC ที่มีรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่นใน PAVERS โดยใช้ข้อมูลดังตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าขนาดความยาวของแผ่นที่ใช้เท่ากับ 5 ม. เนื่องจากโปรแกรม PAVERS ไม่สามารถกำหนดรอยร้าวดังกล่าวได้ ดังนั้นการจำลองถนน JRPC จะดำเนินการดังรูปที่ 3.7 โดยสมมติว่ารอยต่อตามขวางเปรียบเสมือนรอยร้าวตามขวางที่มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นพื้นร้อยละ 100 ที่กึ่งกลางแผ่น และน้ำหนักกระทำพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสกระทำที่ขอบอิสระระหว่างรอยต่อและรอยร้าวตามขวาง (คิดค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นพื้นที่ขอบอิสระร้อยละ 35 [32] ตามสมการที่ 2.29)



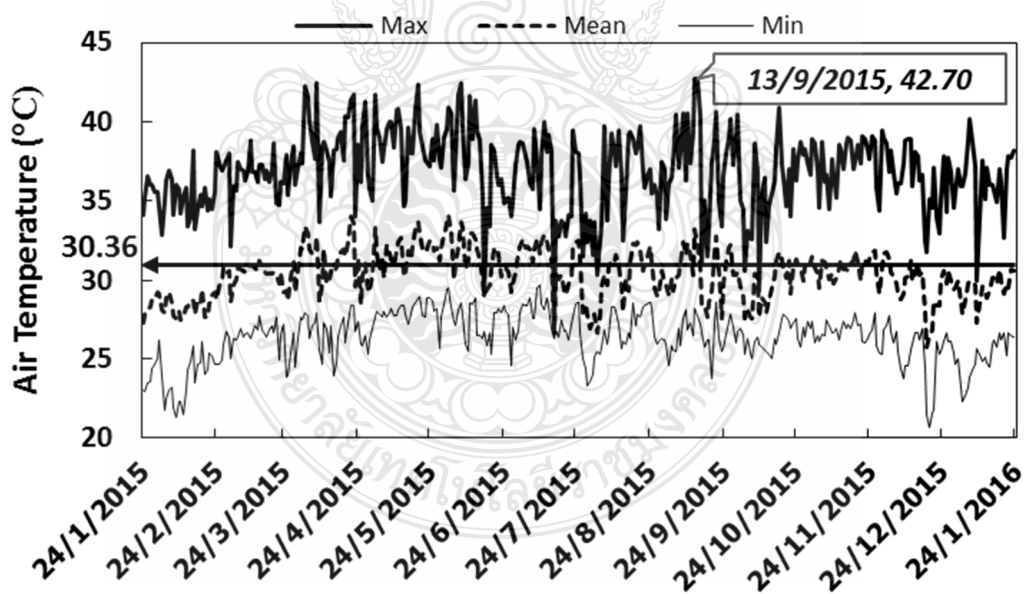
รูปที่ 3.7 รูปแบบการจำลองถนน JRPC มีรอยร้าวตามขวางใน โปรแกรม PAVERS 2.80

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

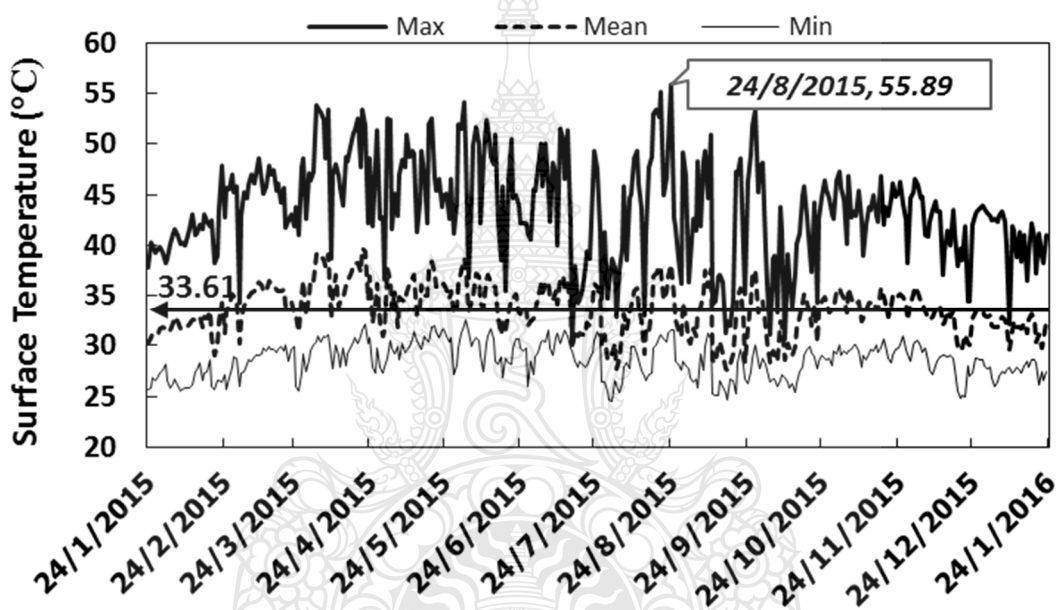
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในสนาม

จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวทางและอุณหภูมิอากาศจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตตลอดระยะเวลาหนึ่งปี แสดงให้เห็นถึงความผันผวนของอุณหภูมิตลอดเวลา เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งปีจากแปลงทดสอบอยู่ที่ 30.36 °ซ. สูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี พ.ศ. 2558 ของพื้นที่ภาคกลางและทุกพื้นที่ทั่วประเทศ 1.56 และ 2.46 °ซ. ตามลำดับ [15] ในขณะที่อุณหภูมิอากาศสูงสุดที่วัดได้จากแปลงทดสอบพบในวันที่ 13 กันยายน เท่ากับ 42.70 °ซ. แม้ว่าค่าที่วัดได้นี้จะเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน แต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลศูนย์ภูมิอากาศพบว่าในเดือนกันยายนอุณหภูมิในพื้นที่ภาคกลางสูงกว่าค่าปกติ 0.70 °ซ. ประกอบกับในวันดังกล่าวยังไม่ได้รับอิทธิพลของพายุโซนร้อน “หว่ามก่อ” (พายุโซนร้อนนี้เกิดหลังจากวันที่ 15 กันยายน) ทำให้เป็นไปได้ว่าจะสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบได้ในวันดังกล่าว

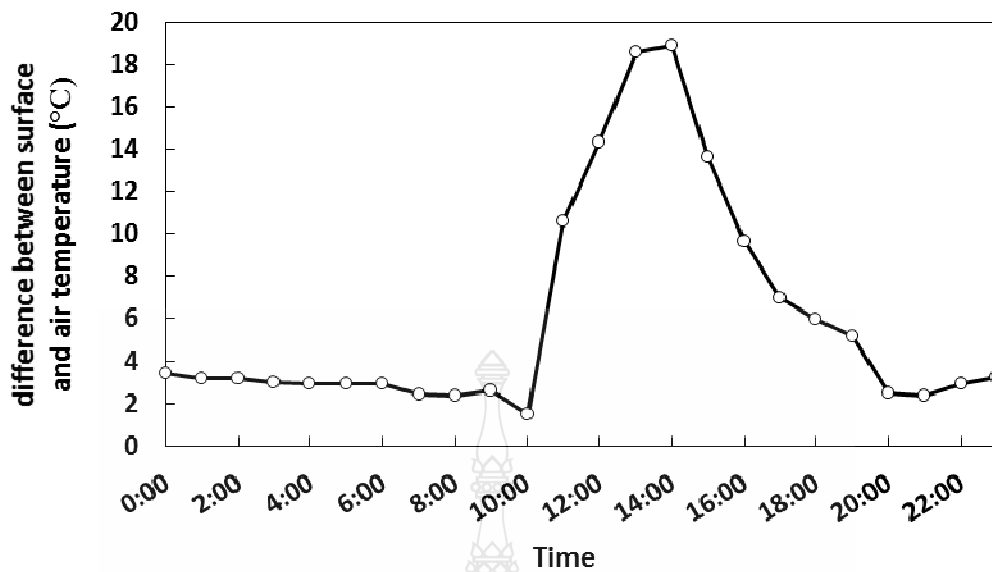


รูปที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบในสนาม

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวจากแปลงทดสอบดังรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยตลอดทั้งปีเท่ากับ 33.61 °ซ. มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งปี 3.25 °ซ. โดยพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวสูงสุดที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 55.89 °ซ. ในวันที่ 24 สิงหาคม และยังพบว่าในวันดังกล่าวมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศสูงถึง 18 °ซ. ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยกับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลากลางวัน แสดงถึงความสอดคล้องกับพฤติกรรมการ โกงงอที่มีผลต่อหน่วยแรงโดยรวมในช่วงเวลากลางวันได้เป็นอย่างดี



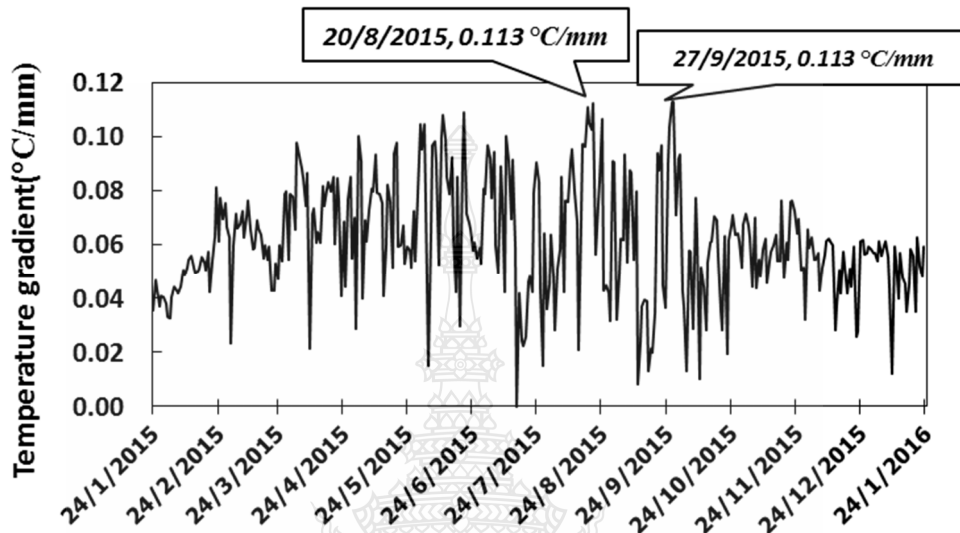
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิพื้นผิวที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบในสนาม



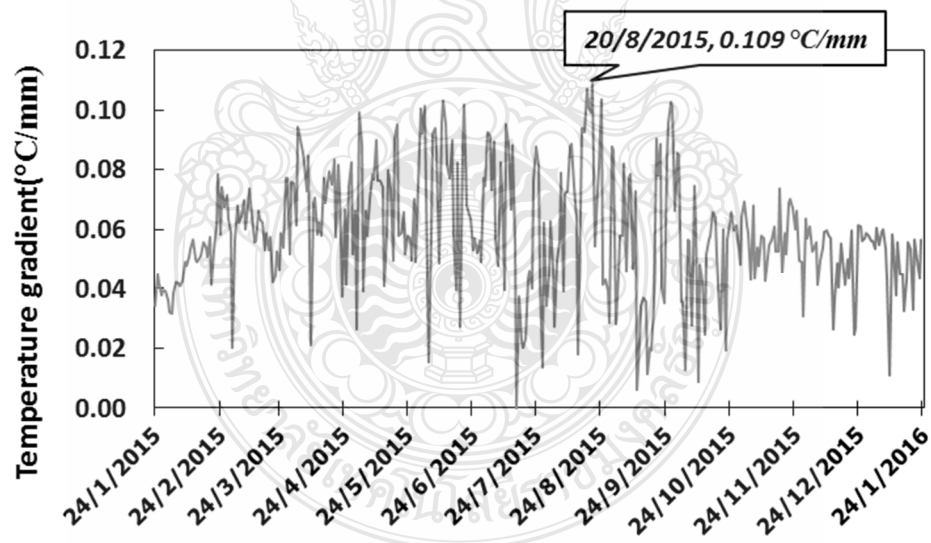
รูปที่ 4.3 แนวโน้มของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศในวันที่ 24 สิงหาคม

จากข้อมูลอุณหภูมิในแปลงทดสอบนำมาวิเคราะห์ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวัน และสร้างแนวโน้มตลอดทั้งปีได้ผลดังรูปที่ 4.4 จากภาพรวมในผิวทางคอนกรีตที่กำลังอัดทั้งสองกรณีพบว่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในช่วงแรกก่อนเข้าสู่ฤดูร้อนมีค่าต่ำกว่า 0.060 °ซ./มม. หลังจากนั้นพบว่าแนวโน้มของค่าดังกล่าวได้เพิ่มสูงขึ้นเข้าใกล้ 0.100 °ซ./มม. ในช่วงฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม) แต่เนื่องจากในปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณฝนตลอดทั้งปี ต่ำกว่าค่าปกติถึงร้อยละ 11 [15] ทำให้อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่ยังคงร้อนในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนสิงหาคมและกันยายน จากรูปที่ 4.4 (a) ผิวทางที่กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 เมกะปาสคาล แสดงค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.113 °ซ./มม. ในวันที่ 20 สิงหาคม และ 27 กันยายน และจากรูปที่ 4.4 (b) ผิวทางที่กำลังรับแรงอัด 41.2 เมกะปาสคาล แสดงค่าสูงสุดเท่ากับ 0.109 °ซ./มม. ซึ่งต่ำกว่ากรณีแรกเล็กน้อย จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวัดข้อมูลจากแปลงทดสอบมีความสำคัญต่อการพัฒนาข้อมูลเชิงประจักษ์ให้มีประสิทธิภาพ จะเห็นได้ว่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดได้จากแปลงทดสอบมีค่าสูงกว่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากฐานข้อมูลอื่นๆ อาทิเช่น ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในประเทศแถบยุโรป ได้แก่ ประเทศเนเธอร์แลนด์ (0.065 °ซ./มม.) และประเทศเบลเยียม (0.078 °ซ./มม.) [32] หรือค่าสูงสุดของความลาดชันอุณหภูมิที่โปรแกรม PAVERS 2.80 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.100 °ซ./มม.

ทั้งนี้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของโครงสร้างผิวทางและการวิเคราะห์ความถี่ในถนนจำลอง JRCP โดยรายละเอียดและผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



(a) กำลังรับแรงอัด 27.5 เมกะปาสคาล

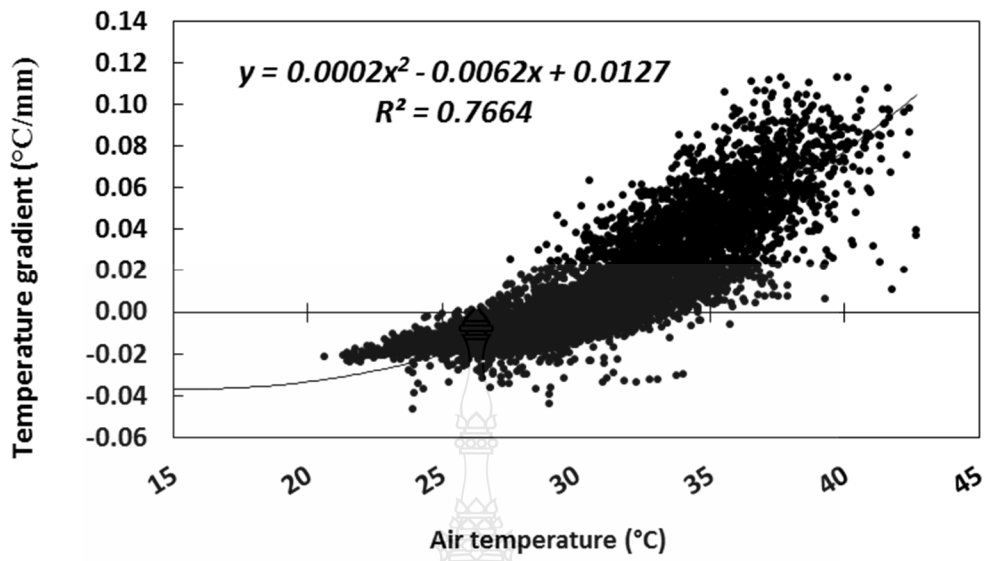


(b) กำลังรับแรงอัด 41.2 เมกะปาสคาล

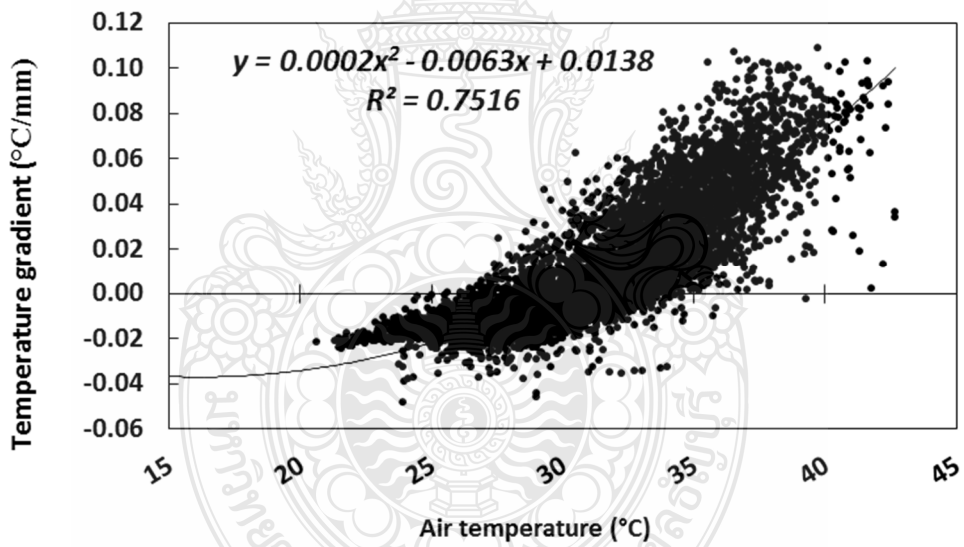
รูปที่ 4.4 แนวโน้มความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบในสนาม

ข้อมูลอุณหภูมิตลอดระยะเวลาที่ศึกษาจะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิอากาศกับความลาดชันอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.5 ภายใต้ความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสองพบว่าอุณหภูมิอากาศมีความสัมพันธ์กับความลาดชันอุณหภูมิ กรณีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 เมกะปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหรือ R^2 เท่ากับ 0.7664 ซึ่งสูงกว่ากรณีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อนำอุณหภูมิพื้นผิวมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แทนที่อุณหภูมิอากาศเช่นเดียวกับการศึกษาของ Chung และ Chul Shin [27] ในปี ค.ศ. 2015 พบว่า R^2 มีค่าสูงกว่าความสัมพันธ์ในกรณีแรก ซึ่งเท่ากับ 0.8324 เท่ากันทั้งกรณีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 และ 41.2 เมกะปาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.6

จากความสัมพันธ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการทำนายความลาดชันอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอากาศ โดยอาศัยเพียงการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวทางจากในสนามเพียงเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาจากฐานข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิแต่ละพื้นที่ในประเทศไทยซึ่งเก็บรวบรวมโดยกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าลักษณะข้อมูลอุณหภูมิจะอยู่ในรูปของอุณหภูมิอากาศและมีการเก็บรวบรวมข้อมูลทางสถิติโดยละเอียดตลอดเวลาในทุกภูมิภาคของประเทศ ประกอบกับการทำแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตในสนามไม่สามารถดำเนินการให้ครอบคลุมได้ในทุกพื้นที่ ทำให้อุณหภูมิอากาศยังคงมีความสำคัญในการทำนายความลาดชันอุณหภูมิ โดยเฉพาะกับภูมิภาคอื่นๆในประเทศไทย จากผลที่ได้พบว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิอากาศกับความลาดชันอุณหภูมียังคงแสดง R^2 อยู่ในระดับที่ดีและใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับความลาดชันอุณหภูมิ ดังนั้นการพัฒนาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของความลาดชันอุณหภูมิโดยอาศัยอุณหภูมิอากาศเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบโครงสร้างผิวทางคอนกรีตในพื้นที่อื่นๆของประเทศโดยอาศัยเพียงข้อมูลสถิติอุณหภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาเท่านั้น

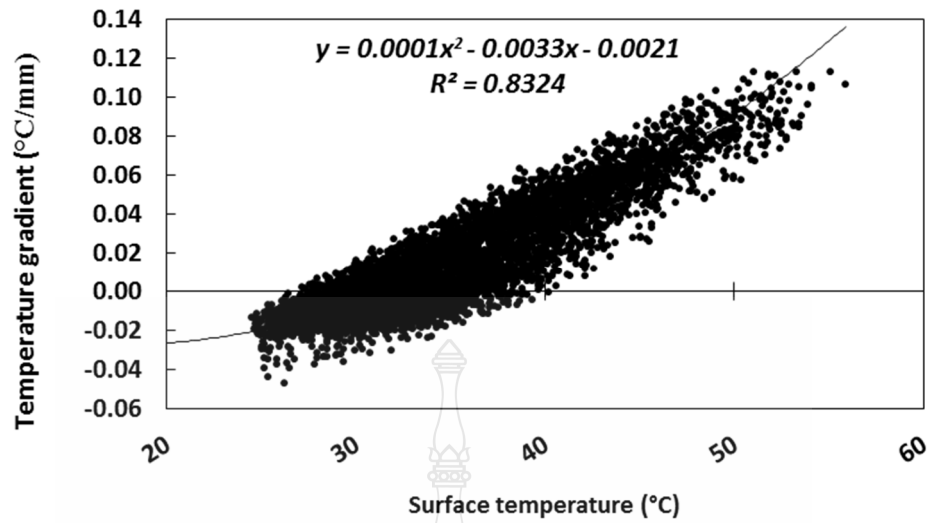


(a) กำลังรับแรงอัด 27.5 เมกะปาสคาล

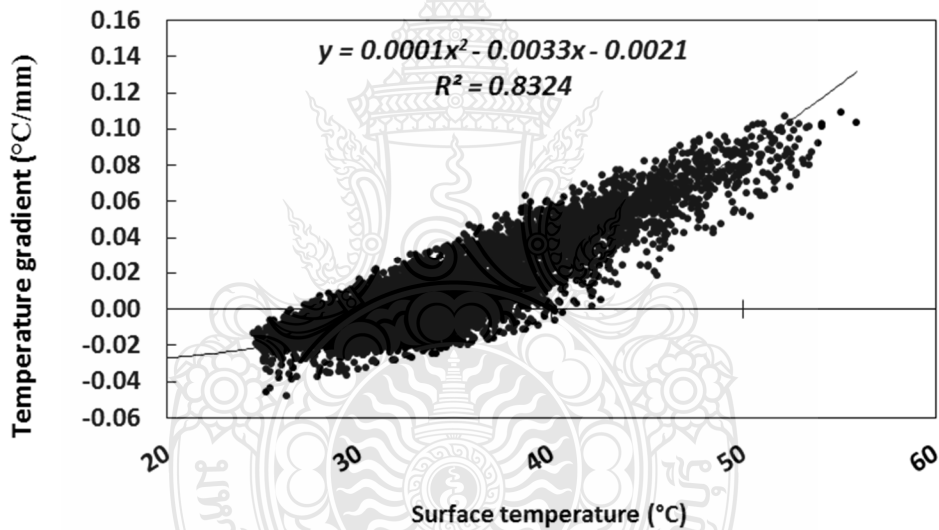


(b) กำลังรับแรงอัด 41.2 เมกะปาสคาล

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศกับความลาดชันอุณหภูมิ



(a) กำลังรับแรงอัด 27.5 เมกะปาสคาล



(b) กำลังรับแรงอัด 41.2 เมกะปาสคาล

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับความลาดชันอุณหภูมิ

ในการสรุปความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิเพื่อนำเข้าโปรแกรม PAVERS 2.80 สำหรับถนนจำลอง JRCP กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 เมกะปาสคาล จะดำเนินการภายใต้เงื่อนไข 2 กรณี ได้แก่ ความถี่การกระจายตัวของความลาดชันอุณหภูมิจากการนำเข้าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากแปลงทดสอบ ซึ่งพบว่ามีความสูงกว่า 0.100 °ซ./มม. ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขนี้จะดำเนินการแบ่งสัดส่วนของความลาดชันอุณหภูมิในแต่ละระดับขึ้นตามค่าสูงสุดที่โปรแกรม PAVERS 2.80

คำนวณได้ (0.100 °ซ./มม.) สัดส่วนของความลาดชันอุณหภูมิในแต่ละ 11 ระดับชั้น จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 (a) ในขณะที่กรณีที่ 2 ความถี่การกระจายตัวจากการนำเข้ามาความหนาแน่นจำลอง JRCP หน้า 23 ซม. และคำนวณด้วยสมการของ Van der Kreeft (0.065 °ซ./มม.) จะแสดงดังรูปที่ 4.7 (b)

Gradient °C/mm	Percentage %
No Gradient	65.0
0.010	7.6
0.020	6.0
0.030	5.2
0.040	4.5
0.050	4.2
0.060	3.2
0.070	1.8
0.080	1.2
0.090	0.8
0.100	0.5

(a) ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากแปลงทดสอบ

Gradient °C/mm	Percentage %
No Gradient	63.4
0.007	5.6
0.013	4.5
0.020	3.9
0.026	3.6
0.033	3.1
0.039	2.7
0.045	2.9
0.052	2.9
0.059	2.3
0.065	5.0

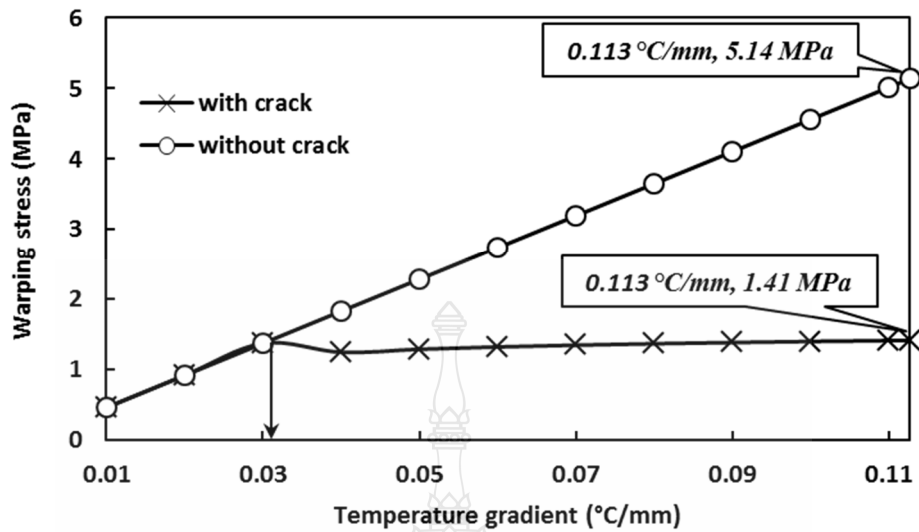
(b) ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสมการของ Van der Kreeft

รูปที่ 4.7 สรุปการจำแนกความถี่การกระจายตัว

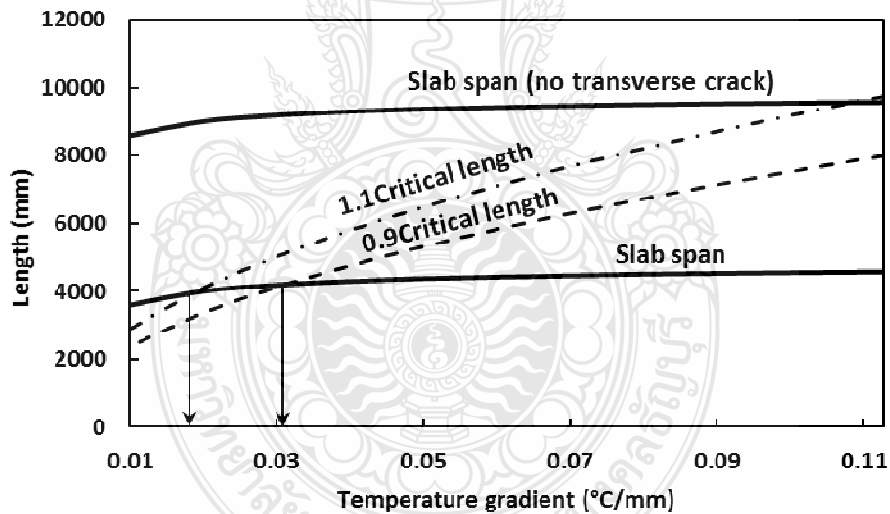
4.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงจากถนนจำลอง JRCP

4.2.1 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ

ทฤษฎี Eisenmann ถูกนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ขอบแผ่น โดยเริ่มจากการนำค่าอุณหภูมิผิวทางสูงสุดที่วัดได้จากแปลงทดสอบ (55.89°C) มาหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับอุณหภูมิคอนกรีตในการศึกษาของ ประภาส และพุทธพล [10] ดังสมการที่ 3.1 ซึ่งเท่ากับ 33,018 เมกะปาสคาล ในการวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยถนนจำลอง JRCP ดังรูปที่ 3.5 โดยพบว่าหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิและพฤติกรรมการโค้งงอตามทฤษฎี Eisenmann แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เมื่อความยาวช่วงมีค่าสูงกว่า 1.1 เท่าของความยาววิกฤต หรือ $L' > 1.1L_{crit}$ (ความลาดชันอุณหภูมิประมาณ $0.030^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) หน่วยแรงนี้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และเมื่อความลาดชันอุณหภูมิสูงขึ้นจนความยาวช่วงน้อยกว่า 0.9 เท่าของความยาววิกฤต ($L' < 0.9L_{crit}$) พบว่าพฤติกรรมของแผ่นพื้นจะเป็นไปตามกรณีที่ 3 ซึ่งหน่วยแรงจะถูกลดทอนด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวช่วงต่อ 0.9 เท่าของความยาววิกฤตกำลังสอง ทำให้แนวโน้มของหน่วยแรงตามกรณีที่ 3 เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ละน้อยจนกระทั่งความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ $0.113^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ หน่วยแรงจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.41 เมกะปาสคาล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิที่ได้จากถนนจำลอง JRCP ที่ไม่มีรอยร้าวตามขวางพบว่าหน่วยแรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแบบเชิงเส้นโดยตลอด เนื่องจากความยาวช่วงที่สูงกว่า 1.1 เท่าของความยาววิกฤตค่อนข้างมาก ทำให้พฤติกรรมของผิวทางอยู่ในกรณีที่ 1 เป็นหลัก ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงสาเหตุของรอยร้าวตามขวางในถนน JRCP มีผลมาจากการโค้งงอของผิวทางภายใต้ความลาดชันอุณหภูมิที่สูงขึ้นและระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวางที่สูงกว่าถนนจำลอง JRCP ที่ศึกษาในครั้งนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแนวโน้มของหน่วยแรง



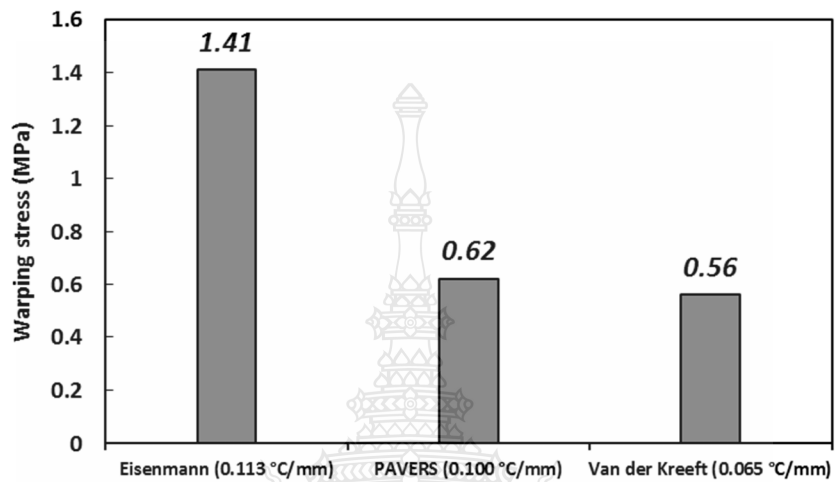
รูปที่ 4.8 แนวโน้มของหน่วยแรงโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการโก่งงอของผิวทางจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี Eisenmann

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างทฤษฎี Eisenmann (0.113 °ซ./มม.) และจากโปรแกรม PAVERS 2.80 (0.100 และ 0.065 °ซ./มม.) ในถนนจำลอง JRCP ดังรูปที่ 4.10 พบว่าโปรแกรม PAVERS 2.80 ให้ค่าหน่วยแรงที่ต่ำกว่าหน่วยแรงจากวิธี Eisenmann มากกว่าร้อยละ 50 โดยผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.62 เมกะปาสคาล และ

0.56 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ทั้งนี้ความแตกต่างในผลลัพธ์ดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างของความลาดชันอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์หน่วยแรงในแต่ละกรณี รวมถึงทฤษฎีในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่มีความแตกต่างกัน

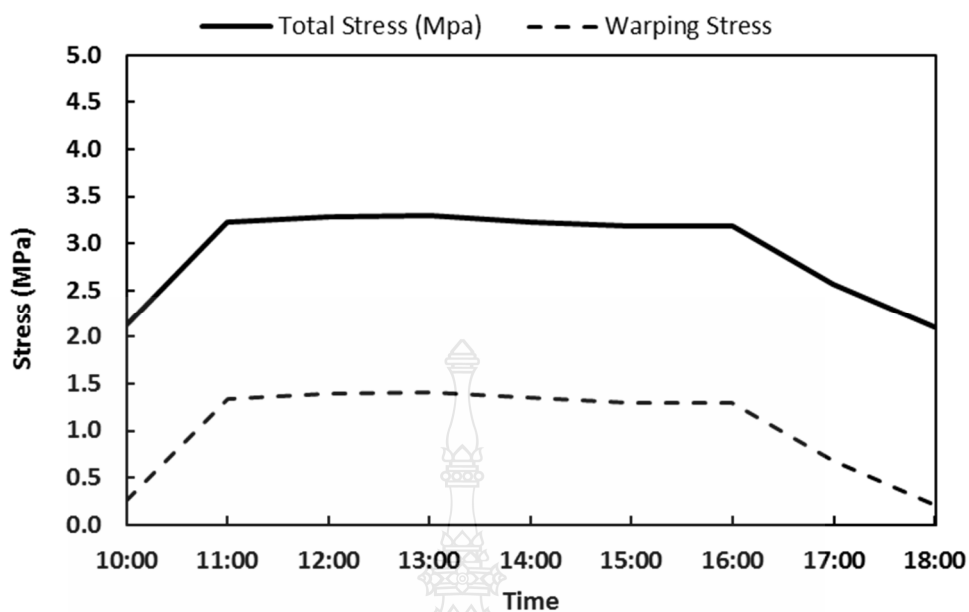


รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักกระทำ

จากการวิเคราะห์หน่วยแรงจากน้ำหนักเพลาดียวมาตรฐานขนาด 10 ตัน ด้วยทฤษฎีของ Westergaard จะทำให้ถนนจำลอง JRCP เกิดหน่วยแรง 1.88 เมกะปาสคาล เพิ่มขึ้นจากหน่วยแรงโก่งงอจากความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดร้อยละ 33 ในขณะที่การคำนวณค่าตอบสนองของโครงสร้างถนนจำลองด้วยโปรแกรม PAVERS 2.80 พบว่าค่าหน่วยแรงจากน้ำหนักเพลาดียวมาตรฐานขนาด 10 ตัน (พื้นที่ของน้ำหนักกระทำแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส) เกิดขึ้นเพียง 0.97 เมกะปาสคาล เท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงจากทฤษฎีของ Westergaard ประมาณร้อยละ 50

เนื่องจากในวันที่ 20 สิงหาคม มีค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด ดังนั้นจึงนำข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาของวันดังกล่าวมาวิเคราะห์หน่วยแรงตามทฤษฎี Eisenmann และ Westergaard ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.11 พบว่าในช่วงเวลา 10 ถึง 18 นาฬิกา มีค่าหน่วยแรงโดยรวมสูงสุดของวันเท่ากับ 3.29 เมกะปาสคาล และจะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังเวลา 16 นาฬิกา จากผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลากลางวันคือช่วงวิกฤตที่โครงสร้างถนนจำลอง JRCP จะต้องรับภาระที่สูงกว่าในช่วงเวลาอื่นๆ



รูปที่ 4.11 แนวโน้มของหน่วยแรงโดยรวมในวันที่พบความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด

4.2.3 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเทียบเท่าด้วยวิธี PCA 1984

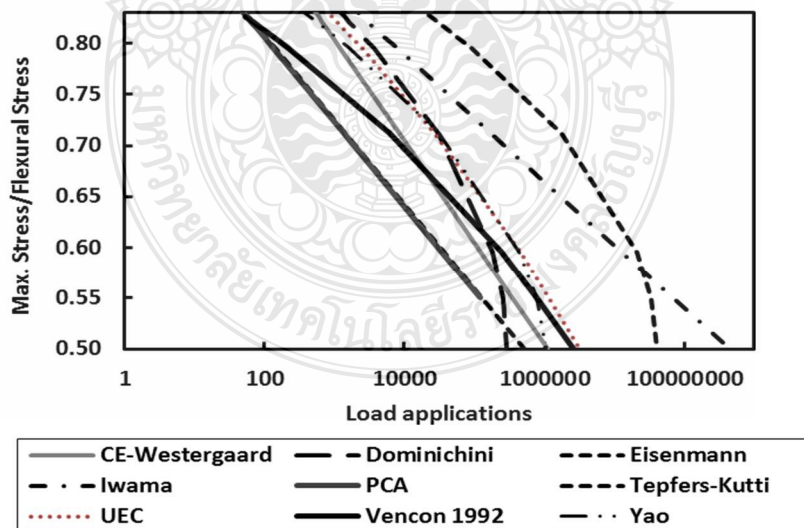
จากการพิจารณาหน่วยแรงเทียบเท่าจากน้ำหนักเพลาดัดด้วยวิธี PCA 1984 ซึ่งเป็นวิธีที่กรมทางหลวงนำมาปรับใช้เพื่อออกแบบถนนคอนกรีตของประเทศไทยในปัจจุบัน พบว่าจากถนนจำลอง JRCP ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต หน่วยแรงเทียบเท่านี้จะสามารถคำนวณได้โดยใช้ตารางที่ 2.6 จากความหนาของผิวทาง 0.23 ม. (9.06 นิ้ว) ค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับ 0.105 เมกะปาสคาล/มม. (386.84 ปอนด์/นิ้ว³) จะได้หน่วยแรงเทียบเท่า 1.25 เมกะปาสคาล ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากผลวิเคราะห์หน่วยแรงเทียบเท่าเกิดจากน้ำหนักเพลาดัดเท่านั้น ในขณะที่หน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิในวิธี Eisenmann สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 1.41 เมกะปาสคาล ผลการวิเคราะห์ที่ได้ชี้ให้เห็นถึงประเด็นสำคัญว่าโครงสร้างผิวทางแม้ไม่ได้รับน้ำหนักปริมาณจราจรใดๆ หากในช่วงเวลาที่สภาพอากาศร้อนจนทำให้ความลาดชันอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง จะทำให้โครงสร้างผิวทางเกิดหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้น และอาจเพิ่มขึ้นสูงกว่าหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจราจรได้

ตารางที่ 4.1 หน่วยแรงเทียบเท่าจากน้ำหนักเพลาดียวในถนนจำลอง JRCP

ความหนา (นิ้ว)	ค่า k ของชั้นรองพื้นทางหรือดินคันทาง (ปอนด์/นิ้ว ³)							
	50	100	150	200	300	386.64	500	700
9	264	232	216	205	190	183.07	174	163
9.06	261.72	229.96	214.08	203.2	188.32	181.44	172.44	161.56
9.5	245	215	200	190	176	169.50	161	151

4.3 ผลการวิเคราะห์ความล้า

แบบจำลองความล้าที่พบในฐานข้อมูลของโปรแกรม PAVERS 2.80 ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนเที่ยวบรรทุกที่ยอมรับได้โดยใช้หน่วยแรงที่ได้จากทฤษฎีของ Eisenmann และ Westergaard ดังเสนอไว้ข้างต้น จากรูปที่ 4.13 แสดงแนวโน้มของความล้าในถนนจำลอง JRCP พิจารณาจากน้ำหนักกระทำ ณ อัตราส่วนของหน่วยแรงเท่ากับค่าขีดจำกัดต่าง (Limit₀) ดังตารางที่ 4.2 พบว่าจากแบบจำลองความล้าต่างๆมีผลให้ถนนจำลองมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักเพลาดียวมาตรฐานที่แตกต่างกันไป โดยช่วงความกว้างของจำนวนเที่ยวบรรทุกจากแบบจำลองที่แตกต่างกันนี้อยู่ระหว่าง 120,514 ถึง 441,585,110 เที่ยว โดยที่แบบจำลองของ PCA ให้ผลลัพธ์ต่ำสุดและค่าสูงสุดพบในแบบจำลองของ Iwama



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความล้าจากหน่วยแรงในทฤษฎี Eisenman และ Westergaard

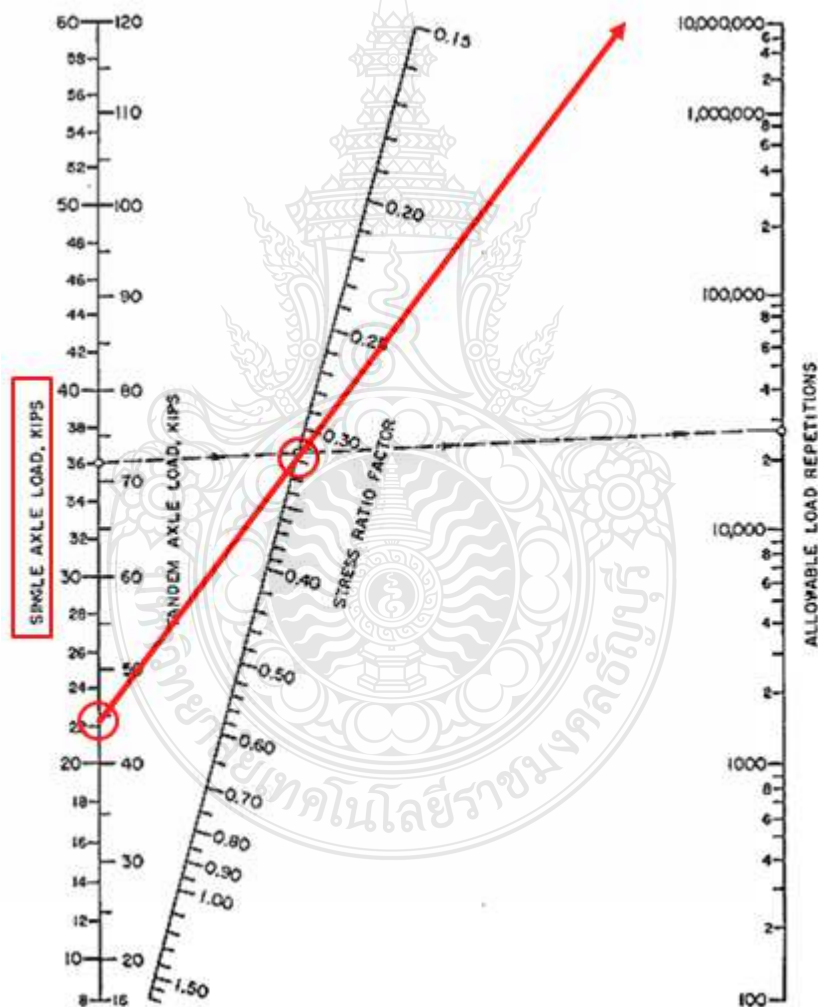
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบจำนวนที่เยวคตบที่ยอมให้ด้วยอัตราส่วนของหน่วยแรงจากกรวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี Westergaard และ Eisenmann

Relation	Load applications		Remark
	$\frac{\sigma_{max}}{f_f} = \text{Limit}_0$	$\frac{\sigma_{max}}{f_f} = 0.84$	
CE-Westergaard	1,138,419	444	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00
Dominichini	290,316	926	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00
Eisenmann	522,807	42	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00
Iwama	441,585,110	1,581	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00
PCA	120,514	40	Limit ₀ = 0.55, Limit ₁ = 1.00
Tepfers-Kutti	40,734,830	13,563	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00
UEC	3,129,598	0	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 0.83
Vencon 1992	2,606,879	0	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 0.83
Yao	1,061,793	258	Limit ₀ = 0.50, Limit ₁ = 1.00

เมื่อพิจารณาให้ความลาดชันอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นสูงสุด (0.113 °ซ./มม.) จนทำให้ค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงเท่ากับ 0.84 ถนนจำลองจะรองรับจำนวนที่เยวคตบได้ต่ำมาก โดยพบว่าแบบจำลองของ Eisenmann และ PCA รองรับจำนวนที่เยวคตบได้ต่ำกว่า 100 เทียว ในขณะที่แบบจำลองของ CE-Westergaard, Dominichini และ Yao รองรับจำนวนที่เยวคตบได้ต่ำกว่า 1,000 เทียว โดยที่แบบจำลองของ Tepfers-Kutti รองรับจำนวนที่เยวคตบได้สูงสุดและมีค่าเพียง 13,563 เทียว ส่วนกรณีแบบจำลอง UEC และ Vencon 1992 พบว่าเมื่อความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.080 °ซ./มม. จะทำให้ถนนจำลองไม่สามารถรองรับน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานได้ เนื่องจากที่ความลาดชันอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ถนนจำลองต้องรองรับภาระที่ทำให้อัตราส่วนของหน่วยแรงถึงค่าขีดจำกัดบนซึ่งเท่ากับ 0.83 อาจกล่าวได้ว่าจากแบบจำลองทั้งหมดที่ศึกษาในครั้งนี้ภายใต้สภาวะความลาดชันอุณหภูมิก่อให้เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวันสามารถลดความสามารถในการรองรับน้ำหนักกระทำจากน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานหนึ่งเทียวได้มากกว่าร้อยละ 99

เมื่อกำหนดให้ถนนจำลอง JRCP รองรับภาระจากน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานเท่านั้น พบว่าหน่วยแรงจากกรวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Westergaard ทำให้อัตราส่วนของหน่วยแรงมีค่าต่ำกว่าค่าขีดจำกัดล่าง ($\sigma_{max} / f_f < \text{Limit}_0$) ดังนั้นจำนวนที่เยวคตบที่ยอมให้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวจะมีค่าไม่จำกัดครั้ง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากวิธี PCA 1984 ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ได้แยกพิจารณาผลจากหน่วยแรงโค้งงอ

จากความลาดชันอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์ความล้าจากแผนภูมิดังรูปที่ 2.14 โดยอาศัยผลจากน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานขนาด 10 ตัน หน่วยแรงเทียบเท่าและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตสำหรับคำนวณ Stress Ratio Factor ปรากฏว่าจากรูปที่ 4.13 จำนวนที่ขบควบคัของน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานที่ยอมให้มีค่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความล้าจากทุกชุดแบบจำลองโดยพิจารณาหน่วยแรงดึงจากน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐานเท่านั้น ดังนั้นความแตกต่างของการพิจารณาหน่วยแรงโค้งงอจากความลาดชันอุณหภูมิด้วยทฤษฎีของ Eisenmann ในกระบวนการวิเคราะห์ความล้าเปรียบเทียบกับผลจากวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์ผลจากอุณหภูมิร่วมในกระบวนการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความล้าด้วยวิธี PCA 1984

จากตารางที่ 4.3 แสดงความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ความล้าเกิดขึ้นในโปรแกรม PAVERS 2.80 ที่ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบ และจากสมการ Van der Kreeft ซึ่งไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลองความล้าได้ เนื่องจากถนน JRCP สามารถรองรับภาระน้ำหนักเพลาคือมาตรฐานและความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง เนื่องจากค่าการตอบสนองของถนนจำลอง JRCP ที่ได้จากโปรแกรมมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากทฤษฎีอื่นๆ ทั้ง Westergaard และ Eisenmann รวมทั้งผลจากวิธีเชิงประจักษ์ PCA 1984 จากภาพรวมของการวิเคราะห์ความล้าที่แตกต่างกันชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนถึงปัจจัยจากทฤษฎีการวิเคราะห์หน่วยแรง ที่มาของการพัฒนาแบบจำลองความล้า รวมถึงช่วงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง (Limit_u และ Limit_l) ของอัตราส่วนของหน่วยแรงในแต่ละแบบจำลองความล้า ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์และออกแบบถนน JRCP สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย การพัฒนาแบบจำลองความล้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอันดับต้นๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความล้าในถนนจำลอง JRCP

Relation	Westergaard + Eisenmann		PAVERS 2.80	
	0.113 °C/mm (Test section)	No temperature gradient	0.100 °C/mm (Test section)*	0.065 °C/mm (Van der Kreeft)
CE-Westergaard	444	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Dominichini	926	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Eisenmann	42	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Iwama	1,581	Unlimited	Unlimited	Unlimited
PCA	40	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Tepfers-Kutti	13,563	Unlimited	Unlimited	Unlimited
UEC	0	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Vencon 1992	0	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Yao	258	Unlimited	Unlimited	Unlimited

*ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่โปรแกรม PAVERS 2.80 สามารถวิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.100 °C/mm

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวิจัยด้วยข้อมูลจากแปลงทดสอบผิวทางคอนกรีตตลอดระยะเวลาหนึ่งปีพบว่า ข้อมูลอุณหภูมิอากาศสูงสุดมีความสอดคล้องกับข้อมูลของศูนย์ภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา จังหวัดปทุมธานี อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวทาง และความลาดชันอุณหภูมิที่ได้จากแปลงทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าสูงสุดของตัวแปรทั้ง 3 ตลอดหนึ่งปีไม่ได้เกิดขึ้นในวันและเวลาเดียวกันอันเนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ร่มเงาจากเมฆ, ลม รวมถึงปริมาณน้ำฝนที่ซังบริเวณผิวคอนกรีตในช่วงฤดูฝน เป็นต้น โดยยังพบว่าอุณหภูมิผิวทางคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับความลาดชันอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอากาศ แสดงได้จากความสัมพันธ์พหุนามกำลังสองที่ R^2 เท่ากับ 0.8324 ในแผ่นพื้นทั้งกรณีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.5 และ 41.2 เมกะปาสคาล ทำให้การทำนายความลาดชันอุณหภูมิจากการวัดอุณหภูมิผิวคอนกรีตในสนามสามารถทำได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ดีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิอากาศและความลาดชันอุณหภูมียังมีค่าอยู่ในระดับที่ดี และสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความลาดชันอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยโดยอาศัยฐานข้อมูลทางสถิติของกรมอุตุนิยมวิทยา

ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ $0.113\text{ }^{\circ}\text{C./mm}$. แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิในการออกแบบโครงสร้างผิวทางคอนกรีต เมื่อพิจารณาถนนจำลอง JRCP ที่มีรอยร้าวตามขวางที่กึ่งกลางแผ่นภายใต้ความลาดชันอุณหภูมิมพบว่าถนนจำลองจะต้องรองรับภาระจากน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของขอบแผ่นเพิ่มขึ้น และอาจมากกว่า 2 เท่าตัวเมื่อพิจารณาในช่วงความลาดชันอุณหภูมิมวิกฤต ดังนั้นการออกแบบถนนคอนกรีตประเภท JRCP ในประเทศไทย โดยขาดการคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิมย่อมส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ถนนคอนกรีตได้โดยง่าย

สำหรับการวิเคราะห์ความล้าด้วยชุดแบบจำลองความล้าจากฐานข้อมูลใน โปรแกรม PAVERS 2.80 พบว่าการวิเคราะห์ความล้าโดยพิจารณาผลของหน่วยแรงจากน้ำหนักเพลาดัดเดียวมาตรฐานด้วยแบบจำลองความล้าทุกชุดแสดงความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบของกรมทางหลวง ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ได้แยกพิจารณาผลจากความลาดชันอุณหภูมิมในกระบวนการวิเคราะห์ความล้า

การพิจารณาผลจากน้ำหนักเพลลาเดี่ยวมาตรฐานร่วมกับความลาดชันอุณหภูมิ ณ อัตราส่วนของหน่วยแรงเท่ากับค่าขีดจำกัดล่าง ($Limit_0$) แสดงให้เห็นถึงความแปรผันอย่างมากของขีดความสามารถของถนนจำลอง JRCP ในการต้านทานหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกและความลาดชันอุณหภูมิ และเมื่อความลาดชันอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าวิกฤตจะทำให้ถนน JRCP สามารถรองรับจำนวนที่ยวบค้ำลดลงมากกว่าร้อยละ 99 โดยที่ชุดแบบจำลองความล้าที่แสดงจำนวนที่ยวบค้ำสูงได้แก่ชุดแบบจำลองของ Iwama และ Tepfers-Kutti จะทำให้ถนนคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากความล้าสะสม (Cumulative fatigue damage) ต่ำกว่าแบบจำลองความล้าชุดอื่นๆเมื่อพิจารณาที่ระดับปริมาณการจราจรเท่ากัน ส่งผลให้การออกแบบความหนาที่ต้องการของผิวทางคอนกรีตสามารถเกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากกระบวนการเลือกแบบจำลองความล้าได้อย่างมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำผลเชิงประจักษ์จากแปลงทดสอบได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบ มาใช้ในการศึกษาแบบจำลองความล้าโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ ดังนั้นการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์และออกแบบผิวทางคอนกรีตในประเทศไทยด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น จำเป็นต้องทำการพัฒนาแบบจำลองความล้าขึ้นสำหรับคอนกรีตในประเทศไทย รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของอุณหภูมิภายในของผิวทางคอนกรีต เพื่อที่จะคาดการณ์หน่วยแรงจากอุณหภูมิให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง, “รายงานปริมาณการเดินทางบนทางหลวง ปี 2558,” รายงานประจำปี 2558, เมษายน 2558.
- [2] Hoel, L.A. and Short, A.J. *The Engineering of the Interstate Highway System*, TR News, Washington, DC: Transportation Research Board, 2006.
- [3] Norbert Delatte, *Concrete Pavement Design Construction and Performance*, Taylor & Francis Group, 2007.
- [4] ชยชนันว์ พรหมสร, ธนศักดิ์ ไฟกระโทก, เลิศ พัดฉวี และ พรชัย ศีลารมย์, “การประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ในประเทศไทย,” รายงานฉบับที่ วพ. 206 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, เมษายน 2546.
- [5] Smith, K. and Roesler, J. “Review of Fatigue Models for Concrete Airfield Pavement Design”, in *Airfield Pavements: Specialty Conference 2003*, Las Vegas, 2003, pp.231-258.
- [6] Hiller, J.E. “Development of Mechanistic-Empirical Principles for Jointed Plain Concrete Pavement Fatigue Design,” Doctoral Dissertation, Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2007.
- [7] Hung-Ming Chen, Yunus Dere, Elisa Sotelino and Graham Archer, “Mid-Panel Cracking of Portland Cement Concrete Pavements in Indiana,” FHWA/IN/JTRP-2001/14, Purdue University, Indiana, 2002.
- [8] Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*. Second Edition, United States of America: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [9] กรมอุตุนิยมวิทยา, ความรู้อุตุนิยมวิทยา (*online*), Available: <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>, (27 ตุลาคม 2558).
- [10] ประกาศ ทงประไพ และ พุทธิพล ทงอินทร์ดำ, *ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางแบบแกร่งภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย*, ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2557.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, “การออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต,” ส่วนการออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง, กุมภาพันธ์ 2546.
- [12] พุทธิพล ทองอินทร์คำ, เอกสารประกอบการสอนการออกแบบผิวทาง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2559.
- [13] Yoder, E.J. and Witezak, M.W., *Principle of Pavement Design*, John Wiley & Sons, 1975.
- [14] ขงยุทธ แต่ศิริ และ ธนศักดิ์ วงศ์ธนาภิจักริณี, “Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) “อีกหน้ึงทางเลือ่กของถนนคอนกรีต”,” ส่วนการออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง, pp. 85-105, 2551.
- [15] สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา, กรมอุตุนิยมวิทยา, สรूपสภาวะอากาศทั่วไปในรอบปี พ.ศ. 2558 (*online*), Available: <http://www.tmd.go.th/climate/climate.php?FileID=5>, (5 เมษายน 2559).
- [16] สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา, กรมอุตุนิยมวิทยา, การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต (*online*), Available:<http://www.tmd.go.th/programs/uploads/intranet/DOCS/ncct-0008.pdf>, (5 เมษายน 2559).
- [17] Siddique, Z.Q., Hossain, M. and Meggers, D., “Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavements,” in *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, 2005.
- [18] Richardson, J.M. and Armaghani, J.M. “Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Concrete Pavements”, in *Transportation Research Record 1121*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1987, pp.7-13.
- [19] Armaghani, J.M., Larsen, T.J. and Smith, L.L. “Temperature Response of Concrete Pavements”, in *Transportation Research Record 1121*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1987, pp.23-33.
- [20] Choubane, B., and Tia, M. “Nonlinear Temperature Gradient Effect on Maximum Warping Stresses in Rigid Pavements”, in *Transportation Research Record 1370*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1992, pp.11-19.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] Choubane, B., and Tia, M. "Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement", in *Journal of Transportation Engineering*, Vol.121, No.1, 1995, pp.75-81.
- [22] Zhang, J., Fwa, T.F., Tan, K.H. and Shi, X.P. "Model for Nonlinear Thermal Effect on Pavement Warping Stresses", in *Journal of Transportation Engineering*, Vol.129, No.6, 2003, pp.695-702.
- [23] Belshe, M., Mamlouk, M.S., Kaloush, K.E. and Rodezno, M. "Temperature Gradient and Curling Stresses in Concrete Pavement with and without Open-Graded Friction Course", in *Journal of Transportation Engineering*, Vol.137, No.10, 2011, pp.723-729.
- [24] Harwalkar, A. and Awanti, S.S. "Field Investigations on Temperature Differentials and Curling Strains in High Volume Fly Ash Concrete Pavement", in *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.4, Issue 2, 2013, pp.1-12.
- [25] Dhananjay, M. and Abhilash, K. "Study of Temperature Gradient in Concrete Slabs Through Experimental Approach", in *Global Journal of Researches in Engineering: Civil and Structural Engineering*, Vol.14, Issue 5, 2014, pp.1-16. Available: Global Journals Inc., USA (9 October 2015).
- [26] Math, V.B., Sheregar, A. and Kavitha, G. "Study of Temperature Differential in Different Concrete Slabs of Varying Slab Thickness in Different Regions", in *European Journal of Applied Engineering and Scientific*, Vol.4, No.2, 2015, pp.35-43. Available: www.scholarsresearchlibrary.com (7 January 2016).
- [27] Chung, Y. and Chul Shin, A.H. "Local Calibration of EICM Using Measured Temperature Gradients and Numerical Analysis", in *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol.8, No.4, 2015, pp.259-266.
- [28] Ramadhan, R.H. and Wahhab, H.I.A. "Temperature Variation of Flexible and Rigid Pavements in Eastern Saudi Arabia", in *Building and Environment*, Vol.32, No.4, 1997, pp.367-373.
- [29] ประสิทธิ์ ภู่อประทุม, "อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวง," รายงานฉบับที่ วพ. 158, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, พฤศจิกายน 2539.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] Khan, I., Qadeer, A. and Harwalkar, A. “Mechanistic Analysis of Rigid Pavement for Temperature Stresses using Ansys”, in *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol.11, Issue 2, 2014, pp.90-107.
- [31] Eisenmann, J., “Concrete Pavements-Design and Construction (in German),” Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/Munich/Düsseldorf, 1979.
- [32] Houben L. J. M., “Structural Design of Pavements: Part IV Design of Concrete Pavements,” Delft University of Technology, Netherland. 2009.
- [33] Westergaard, H. M., “Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis.” *Public Roads*, Vol.7, No.2, 1926.
- [34] Setyawan, A., Zoorob, S.E. and Hasan, K.E., “Investigating and Comparing Traffic Induced and Restrained Temperature Stresses in a Conventional Rigid Pavement and Semi-Rigid Layers,” in The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, 2013.
- [35] Ioannides, A.M., M.R. Thompson and E.J. Barenberg, “The Westergaard Solutions Reconsidered Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements,” CROW, Nethelands, 1987.
- [36] Westergaard H.M., “New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields,” *ASCE, Transactions*, Vol. 113, 1948.
- [37] Robert G. Packard, *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*, Portland Cement Association, 1984.
- [38] Titus-Glover, L., Mallela, J., Darter, M.I., Voigt, G. and Waalkes, S., “Enhanced Portland Cement Concrete Fatigue Model for StreetPave”, in *Journal of Transportation Research Board*, No.1919, 2005, pp.29-37.
- [39] Stet, M.J.A. and Frénay, J.W., *Fatigue Properties of Plain Concrete (online)*, Available: <http://www.pavers.nl/>, (3 March 2016).
- [40] Kuo, C. “Effective Temperature Differential in Concrete Pavements”, in *Journal of Transportation Engineering*, Vol.124, No.2, 1998, pp.112-116.

บรรณานุกรม (ต่อ)

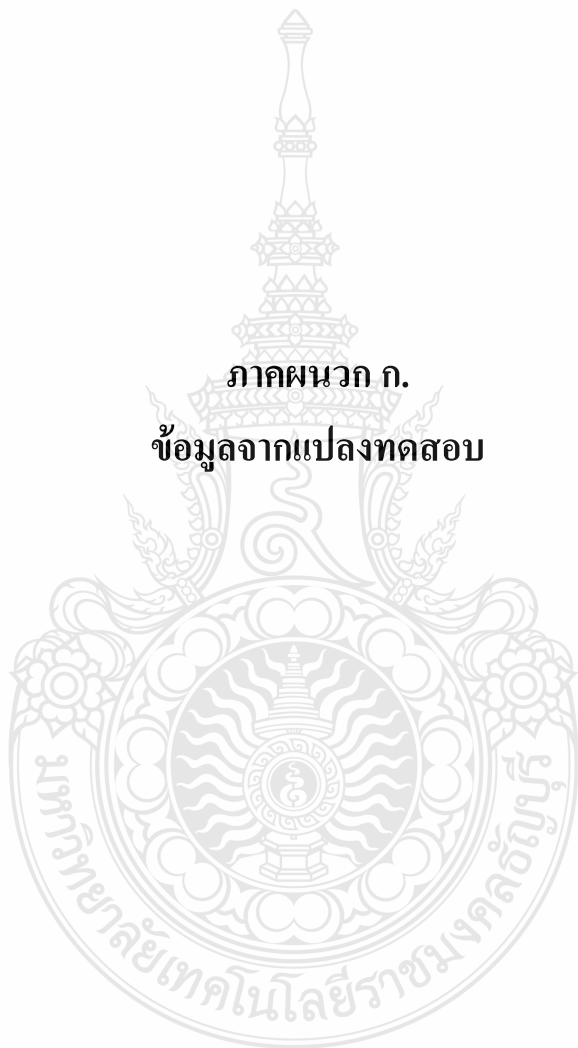
- [41] Kim, S.H., Park, J.Y. and Jeong, J.H. “Effective Temperature-Induced Load on Airport Concrete Pavement Behavior”, in *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.18, No.1, 2014, pp.182-187.
- [42] PAVERS, *PAVERS User Help Manuals*, Netherland, 2008.
- [43] Moody, E.D. “Transverse Cracking Distress in Long-Term Pavement Performance Jointed Concrete Pavement Sections”, in *Transportation Research Record 1629*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp.6-12.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
ข้อมูลจากแปลงทดสอบ



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
9/1/2015	0.0324	0.0308	0.0120	0.0112	-0.0086	-0.0094	-0.0047	-0.0053	23.57	27.43	31.57	25.56	28.52	34.86
10/1/2015	0.0240	0.0227	0.0065	0.0056	-0.0083	-0.0095	-0.0037	-0.0043	24.40	26.85	30.05	26.13	28.06	31.78
11/1/2015	0.0250	0.0243	0.0065	0.0056	-0.0115	-0.0120	-0.0067	-0.0074	22.72	24.69	28.73	24.55	26.83	31.80
12/1/2015	0.0341	0.0342	0.0108	0.0105	-0.0137	-0.0132	-0.0081	-0.0088	21.42	24.38	29.52	23.51	26.67	34.02
13/1/2015	0.0545	0.0538	0.0185	0.0180	-0.0136	-0.0140	-0.0068	-0.0078	21.81	25.29	32.75	24.02	28.27	38.67
14/1/2015	0.0582	0.0572	0.0190	0.0178	-0.0184	-0.0179	-0.0096	-0.0106	19.96	25.60	34.42	22.75	28.42	39.10
15/1/2015	0.0597	0.0595	0.0200	0.0192	-0.0201	-0.0193	-0.0105	-0.0114	18.74	25.44	34.05	22.39	28.72	39.82
16/1/2015	0.0602	0.0592	0.0213	0.0204	-0.0195	-0.0189	-0.0102	-0.0109	18.29	25.57	34.08	22.78	29.21	40.74
17/1/2015	0.0503	0.0486	0.0176	0.0164	-0.0205	-0.0203	-0.0102	-0.0113	19.36	25.64	33.57	22.91	28.67	38.47
18/1/2015	0.0530	0.0518	0.0180	0.0167	-0.0172	-0.0169	-0.0091	-0.0101	20.46	25.74	33.09	23.59	29.07	38.74
19/1/2015	0.0534	0.0528	0.0193	0.0183	-0.0174	-0.0173	-0.0087	-0.0097	20.51	26.08	34.54	23.94	29.56	39.98
20/1/2015	0.0439	0.0437	0.0177	0.0169	-0.0199	-0.0199	-0.0099	-0.0104	20.04	25.62	32.88	23.62	29.26	39.26
21/1/2015	0.0522	0.0507	0.0205	0.0191	-0.0177	-0.0174	-0.0085	-0.0095	20.55	27.16	35.94	24.39	30.12	41.00
22/1/2015	0.0491	0.0472	0.0190	0.0187	-0.0176	-0.0173	-0.0084	-0.0093	20.96	27.36	35.70	24.66	30.42	40.66
23/1/2015	0.0447	0.0418	0.0154	0.0147	-0.0166	-0.0169	-0.0079	-0.0092	21.29	27.05	34.88	25.11	30.13	38.77
24/1/2015	0.0356	0.0341	0.0138	0.0131	-0.0146	-0.0147	-0.0071	-0.0081	23.00	27.26	34.08	25.67	30.18	37.77
25/1/2015	0.0469	0.0448	0.0189	0.0176	-0.0153	-0.0153	-0.0069	-0.0080	22.89	27.75	35.16	25.80	30.80	40.21
26/1/2015	0.0431	0.0414	0.0170	0.0165	-0.0140	-0.0142	-0.0054	-0.0065	23.44	28.17	36.57	26.87	31.23	39.95
27/1/2015	0.0371	0.0377	0.0158	0.0150	-0.0144	-0.0148	-0.0065	-0.0075	23.52	28.22	36.05	26.48	31.22	39.29
28/1/2015	0.0406	0.0394	0.0163	0.0157	-0.0131	-0.0133	-0.0056	-0.0067	24.39	28.78	36.04	27.06	31.27	39.70
29/1/2015	0.0403	0.0388	0.0161	0.0154	-0.0129	-0.0134	-0.0055	-0.0066	24.62	28.82	35.58	27.23	31.70	39.76
30/1/2015	0.0381	0.0360	0.0148	0.0140	-0.0112	-0.0116	-0.0051	-0.0061	25.03	29.22	35.60	27.63	31.84	39.22
31/1/2015	0.0331	0.0322	0.0136	0.0125	-0.0102	-0.0107	-0.0041	-0.0053	26.15	29.17	34.67	28.22	31.61	38.19

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/2/2015	0.0327	0.0316	0.0142	0.0133	-0.0167	-0.0161	-0.0073	-0.0083	23.91	28.04	32.83	26.49	31.36	38.67
2/2/2015	0.0403	0.0384	0.0168	0.0157	-0.0173	-0.0173	-0.0090	-0.0093	21.77	27.87	35.06	25.85	31.56	40.06
3/2/2015	0.0444	0.0419	0.0187	0.0176	-0.0173	-0.0173	-0.0083	-0.0088	22.44	28.85	36.30	26.28	32.21	41.17
4/2/2015	0.0429	0.0416	0.0189	0.0182	-0.0179	-0.0183	-0.0079	-0.0086	22.97	29.22	36.89	26.68	32.88	41.61
5/2/2015	0.0417	0.0409	0.0174	0.0164	-0.0226	-0.0217	-0.0094	-0.0099	23.22	28.51	36.41	26.16	32.41	41.06
6/2/2015	0.0441	0.0427	0.0157	0.0148	-0.0240	-0.0234	-0.0107	-0.0114	21.88	27.70	34.07	25.51	31.70	40.07
7/2/2015	0.0504	0.0491	0.0159	0.0151	-0.0206	-0.0211	-0.0103	-0.0109	21.32	27.55	36.00	25.64	31.77	40.21
8/2/2015	0.0488	0.0479	0.0156	0.0146	-0.0203	-0.0203	-0.0099	-0.0104	22.29	28.00	35.70	25.83	31.83	39.96
9/2/2015	0.0518	0.0508	0.0164	0.0161	-0.0207	-0.0201	-0.0098	-0.0105	22.30	27.43	34.18	25.82	31.99	41.00
10/2/2015	0.0546	0.0535	0.0185	0.0176	-0.0202	-0.0206	-0.0105	-0.0107	21.46	27.63	35.28	25.75	32.10	41.63
11/2/2015	0.0561	0.0566	0.0198	0.0195	-0.0204	-0.0203	-0.0099	-0.0101	22.98	28.28	35.87	26.06	32.56	42.97
12/2/2015	0.0514	0.0499	0.0170	0.0160	-0.0156	-0.0156	-0.0074	-0.0080	24.26	28.22	33.36	27.37	32.55	40.97
13/2/2015	0.0498	0.0489	0.0173	0.0164	-0.0145	-0.0142	-0.0071	-0.0077	24.79	28.71	33.89	27.55	32.51	41.19
14/2/2015	0.0501	0.0504	0.0173	0.0172	-0.0156	-0.0169	-0.0060	-0.0065	25.76	28.69	38.21	28.25	32.85	42.08
15/2/2015	0.0508	0.0513	0.0170	0.0171	-0.0193	-0.0190	-0.0091	-0.0097	23.43	27.80	33.24	26.54	31.75	41.63
16/2/2015	0.0557	0.0558	0.0196	0.0197	-0.0147	-0.0147	-0.0076	-0.0083	24.65	28.70	34.52	27.25	32.86	43.10
17/2/2015	0.0537	0.0539	0.0179	0.0180	-0.0148	-0.0151	-0.0076	-0.0081	24.74	28.55	35.35	27.37	32.62	42.24
18/2/2015	0.0508	0.0507	0.0172	0.0171	-0.0108	-0.0115	-0.0054	-0.0060	26.05	29.41	34.68	28.62	33.39	41.88
19/2/2015	0.0575	0.0574	0.0183	0.0178	-0.0390	-0.0388	-0.0101	-0.0102	23.97	27.61	35.85	25.99	30.78	42.47
20/2/2015	0.0421	0.0413	0.0125	0.0124	-0.0168	-0.0182	-0.0097	-0.0106	24.31	27.60	34.36	25.68	29.03	38.22
21/2/2015	0.0541	0.0534	0.0155	0.0148	-0.0096	-0.0108	-0.0066	-0.0073	25.38	28.40	35.08	26.55	30.23	38.93
22/2/2015	0.0634	0.0613	0.0237	0.0227	-0.0114	-0.0118	-0.0064	-0.0073	25.20	29.06	34.46	26.53	32.45	43.51
23/2/2015	0.0812	0.0785	0.0294	0.0291	-0.0145	-0.0158	-0.0072	-0.0081	24.59	29.27	35.56	26.41	34.26	47.82
24/2/2015	0.0612	0.0581	0.0209	0.0199	-0.0283	-0.0308	-0.0069	-0.0077	24.61	28.78	38.05	27.08	31.15	42.80
25/2/2015	0.0775	0.0742	0.0255	0.0254	-0.0147	-0.0171	-0.0087	-0.0096	24.67	29.57	37.40	25.74	33.35	45.62
26/2/2015	0.0696	0.0674	0.0247	0.0246	-0.0150	-0.0173	-0.0074	-0.0080	24.92	29.94	36.96	26.82	34.10	45.45
27/2/2015	0.0756	0.0714	0.0278	0.0268	-0.0132	-0.0159	-0.0062	-0.0069	25.86	30.79	37.10	27.80	35.16	46.95
28/2/2015	0.0668	0.0634	0.0228	0.0226	-0.0117	-0.0141	-0.0050	-0.0058	26.73	30.39	37.57	28.90	34.91	45.24

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/3/2015	0.0629	0.0589	0.0247	0.0238	-0.0192	-0.0234	-0.0058	-0.0065	26.32	30.55	38.01	28.73	34.33	45.78
2/3/2015	0.0232	0.0203	0.0045	0.0037	-0.0251	-0.0272	-0.0107	-0.0116	24.97	28.58	32.11	25.95	30.15	34.23
3/3/2015	0.0601	0.0566	0.0196	0.0187	-0.0106	-0.0121	-0.0069	-0.0075	26.27	29.69	35.95	27.23	32.55	42.82
4/3/2015	0.0717	0.0682	0.0251	0.0242	-0.0114	-0.0131	-0.0064	-0.0071	26.12	30.07	35.63	27.46	33.94	45.16
5/3/2015	0.0660	0.0623	0.0237	0.0227	-0.0126	-0.0141	-0.0058	-0.0064	26.34	30.81	37.45	28.12	34.38	44.70
6/3/2015	0.0677	0.0646	0.0253	0.0244	-0.0129	-0.0147	-0.0054	-0.0063	26.85	30.71	37.01	28.55	34.89	45.92
7/3/2015	0.0727	0.0697	0.0266	0.0257	-0.0142	-0.0159	-0.0061	-0.0070	26.35	30.61	36.95	28.41	35.25	46.94
8/3/2015	0.0626	0.0599	0.0247	0.0237	-0.0142	-0.0156	-0.0059	-0.0066	26.56	30.50	36.30	28.87	35.44	46.07
9/3/2015	0.0707	0.0686	0.0257	0.0252	-0.0144	-0.0161	-0.0060	-0.0069	26.62	30.84	36.80	28.99	36.06	46.99
10/3/2015	0.0766	0.0737	0.0282	0.0271	-0.0166	-0.0175	-0.0065	-0.0073	26.29	30.99	38.77	29.03	36.27	48.58
11/3/2015	0.0654	0.0646	0.0231	0.0231	-0.0161	-0.0174	-0.0067	-0.0075	26.56	30.92	36.79	29.18	36.00	46.25
12/3/2015	0.0586	0.0556	0.0216	0.0204	-0.0147	-0.0161	-0.0058	-0.0069	27.03	30.73	36.87	29.73	35.39	45.10
13/3/2015	0.0588	0.0563	0.0219	0.0208	-0.0145	-0.0153	-0.0064	-0.0072	26.81	30.63	36.15	29.51	35.50	45.87
14/3/2015	0.0690	0.0663	0.0262	0.0251	-0.0131	-0.0147	-0.0057	-0.0064	27.66	31.25	37.29	29.96	36.47	47.85
15/3/2015	0.0659	0.0635	0.0243	0.0232	-0.0160	-0.0163	-0.0066	-0.0076	26.77	30.79	37.25	29.63	36.17	46.98
16/3/2015	0.0638	0.0623	0.0238	0.0237	-0.0169	-0.0178	-0.0069	-0.0078	26.56	30.55	36.33	29.59	36.06	47.44
17/3/2015	0.0547	0.0528	0.0201	0.0198	-0.0183	-0.0183	-0.0073	-0.0083	26.34	30.43	36.91	29.38	35.53	45.40
18/3/2015	0.0601	0.0587	0.0214	0.0212	-0.0157	-0.0159	-0.0068	-0.0079	26.84	30.39	36.21	29.64	35.42	46.13
19/3/2015	0.0544	0.0532	0.0179	0.0179	-0.0149	-0.0157	-0.0064	-0.0074	27.08	30.43	37.05	29.90	35.42	44.16
20/3/2015	0.0596	0.0576	0.0202	0.0198	-0.0163	-0.0163	-0.0070	-0.0079	26.66	30.49	38.67	29.50	35.55	45.63
21/3/2015	0.0429	0.0421	0.0136	0.0136	-0.0144	-0.0147	-0.0061	-0.0070	27.64	30.31	34.82	30.08	34.06	41.76
22/3/2015	0.0429	0.0441	0.0154	0.0153	-0.0247	-0.0246	-0.0087	-0.0095	24.89	29.77	34.79	28.47	34.00	42.44
23/3/2015	0.0528	0.0524	0.0166	0.0163	-0.0132	-0.0136	-0.0063	-0.0072	26.54	30.38	36.18	29.58	34.48	43.05
24/3/2015	0.0469	0.0463	0.0147	0.0140	-0.0121	-0.0123	-0.0059	-0.0067	27.16	29.23	36.12	29.84	33.12	41.82
25/3/2015	0.0597	0.0587	0.0186	0.0179	-0.0466	-0.0484	-0.0119	-0.0129	23.78	29.29	37.92	26.00	33.04	43.71
26/3/2015	0.0539	0.0539	0.0157	0.0154	-0.0252	-0.0278	-0.0124	-0.0132	23.92	28.70	35.40	25.48	31.43	40.99
27/3/2015	0.0791	0.0773	0.0283	0.0273	-0.0143	-0.0147	-0.0077	-0.0084	25.32	30.26	37.24	27.34	35.04	47.65
28/3/2015	0.0799	0.0771	0.0292	0.0282	-0.0111	-0.0146	-0.0051	-0.0058	26.64	31.16	38.48	29.24	36.47	48.60
29/3/2015	0.0544	0.0519	0.0181	0.0171	-0.0226	-0.0245	-0.0092	-0.0101	24.42	29.21	35.98	27.40	33.04	42.61
30/3/2015	0.0789	0.0759	0.0263	0.0252	-0.0132	-0.0141	-0.0065	-0.0074	26.29	30.67	37.06	28.61	34.95	47.12
31/3/2015	0.0779	0.0754	0.0250	0.0237	-0.0107	-0.0123	-0.0050	-0.0063	27.60	32.02	38.02	29.49	36.60	46.44

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/4/2015	0.0657	0.0616	0.0254	0.0244	-0.0111	-0.0136	-0.0048	-0.0059	27.47	31.92	37.38	30.02	36.48	47.21
2/4/2015	0.0978	0.0942	0.0366	0.0356	-0.0117	-0.0138	-0.0049	-0.0057	27.87	33.39	42.22	30.39	39.08	53.88
3/4/2015	0.0929	0.0898	0.0347	0.0338	-0.0160	-0.0182	-0.0051	-0.0061	27.68	32.92	41.50	30.98	39.27	53.55
4/4/2015	0.0882	0.0854	0.0332	0.0323	-0.0203	-0.0224	-0.0070	-0.0079	26.29	31.92	40.06	30.37	38.99	53.11
5/4/2015	0.0845	0.0818	0.0316	0.0306	-0.0186	-0.0203	-0.0068	-0.0077	27.04	31.64	38.76	30.86	38.49	52.39
6/4/2015	0.0747	0.0728	0.0246	0.0237	-0.0191	-0.0201	-0.0069	-0.0079	27.28	31.70	37.64	30.83	37.97	48.62
7/4/2015	0.0867	0.0847	0.0330	0.0322	-0.0177	-0.0191	-0.0067	-0.0075	27.85	32.80	42.44	31.06	39.06	53.44
8/4/2015	0.0214	0.0208	0.0067	0.0061	-0.0256	-0.0268	-0.0100	-0.0107	25.52	28.59	33.67	28.89	32.69	38.59
9/4/2015	0.0717	0.0689	0.0234	0.0225	-0.0189	-0.0202	-0.0111	-0.0119	24.67	29.87	38.48	27.77	34.83	46.95
10/4/2015	0.0737	0.0706	0.0251	0.0242	-0.0133	-0.0146	-0.0066	-0.0075	27.27	31.92	38.70	30.11	36.99	48.00
11/4/2015	0.0609	0.0581	0.0226	0.0217	-0.0297	-0.0333	-0.0085	-0.0095	26.86	29.75	38.14	29.08	33.90	46.86
12/4/2015	0.0647	0.0621	0.0217	0.0210	-0.0182	-0.0201	-0.0102	-0.0108	25.34	30.02	37.47	27.86	34.46	45.59
13/4/2015	0.0610	0.0578	0.0187	0.0179	-0.0123	-0.0150	-0.0065	-0.0073	27.09	30.61	35.31	29.70	34.73	43.87
14/4/2015	0.0818	0.0771	0.0273	0.0267	-0.0174	-0.0192	-0.0093	-0.0101	23.93	30.45	38.19	28.04	36.01	48.67
15/4/2015	0.0744	0.0687	0.0262	0.0253	-0.0162	-0.0188	-0.0078	-0.0084	24.70	30.84	38.25	29.16	36.46	48.30
16/4/2015	0.0807	0.0765	0.0284	0.0274	-0.0168	-0.0186	-0.0071	-0.0081	26.39	31.40	39.00	29.74	37.06	49.79
17/4/2015	0.0831	0.0793	0.0301	0.0291	-0.0163	-0.0176	-0.0066	-0.0073	27.05	31.73	39.37	30.39	37.93	51.05
18/4/2015	0.0798	0.0749	0.0299	0.0291	-0.0187	-0.0222	-0.0064	-0.0074	27.60	31.91	37.53	30.77	38.18	51.31
19/4/2015	0.0852	0.0836	0.0304	0.0304	-0.0229	-0.0239	-0.0089	-0.0086	26.01	31.52	40.37	30.15	38.17	52.51
20/4/2015	0.0603	0.0573	0.0227	0.0219	-0.0189	-0.0207	-0.0072	-0.0079	27.21	32.44	40.28	30.88	37.38	47.64
21/4/2015	0.0847	0.0817	0.0327	0.0318	-0.0151	-0.0162	-0.0061	-0.0068	28.32	34.03	41.38	31.52	39.73	53.42
22/4/2015	0.0766	0.0722	0.0290	0.0279	-0.0167	-0.0192	-0.0057	-0.0065	28.31	33.53	41.71	32.16	39.34	51.76
23/4/2015	0.0410	0.0371	0.0122	0.0115	-0.0191	-0.0233	-0.0093	-0.0099	26.70	29.61	34.02	30.27	34.55	42.14
24/4/2015	0.0684	0.0664	0.0245	0.0240	-0.0124	-0.0159	-0.0074	-0.0080	27.34	31.40	38.51	30.73	36.90	48.54
25/4/2015	0.0440	0.0413	0.0128	0.0123	-0.0224	-0.0249	-0.0114	-0.0118	25.89	28.44	36.23	27.81	32.24	41.83
26/4/2015	0.0768	0.0744	0.0258	0.0252	-0.0200	-0.0239	-0.0121	-0.0124	25.82	30.25	39.59	27.34	34.36	48.11
27/4/2015	0.0853	0.0824	0.0313	0.0309	-0.0106	-0.0155	-0.0072	-0.0076	26.41	31.03	41.28	29.70	36.24	51.42
28/4/2015	0.0548	0.0518	0.0152	0.0149	-0.0258	-0.0297	-0.0099	-0.0104	25.29	29.25	36.58	27.80	32.18	42.59
29/4/2015	0.0701	0.0664	0.0174	0.0171	-0.0137	-0.0179	-0.0103	-0.0106	26.20	29.44	35.70	27.27	30.87	42.70
30/4/2015	0.0286	0.0261	0.0080	0.0075	-0.0076	-0.0112	-0.0079	-0.0083	26.92	30.36	35.06	27.93	31.49	36.64

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนพฤษภาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/5/2015	0.1001	0.0992	0.0361	0.0355	-0.0064	-0.0101	-0.0059	-0.0063	27.59	33.34	41.70	28.70	37.70	52.52
2/5/2015	0.0909	0.0882	0.0341	0.0337	-0.0090	-0.0149	-0.0044	-0.0047	28.01	31.70	39.62	30.46	36.44	52.31
3/5/2015	0.0396	0.0390	0.0153	0.0149	-0.0098	-0.0156	-0.0059	-0.0063	27.81	30.71	39.03	29.77	33.54	41.61
4/5/2015	0.0693	0.0662	0.0216	0.0210	-0.0089	-0.0133	-0.0068	-0.0073	27.57	31.29	37.48	29.14	35.25	45.11
5/5/2015	0.0614	0.0579	0.0175	0.0169	-0.0105	-0.0134	-0.0054	-0.0060	28.01	30.18	38.24	29.85	31.77	42.87
6/5/2015	0.0729	0.0703	0.0258	0.0251	-0.0073	-0.0102	-0.0067	-0.0073	27.61	32.18	39.56	28.62	34.84	46.91
7/5/2015	0.0808	0.0786	0.0277	0.0271	-0.0167	-0.0217	-0.0043	-0.0049	27.85	31.67	39.95	30.16	34.55	48.38
8/5/2015	0.0798	0.0769	0.0262	0.0252	-0.0069	-0.0126	-0.0061	-0.0067	28.11	31.30	39.98	29.32	34.41	47.65
9/5/2015	0.0934	0.0899	0.0323	0.0316	-0.0089	-0.0117	-0.0058	-0.0063	27.72	30.96	38.32	29.44	35.34	50.98
10/5/2015	0.0794	0.0761	0.0281	0.0272	-0.0103	-0.0127	-0.0054	-0.0061	27.69	31.84	40.73	29.90	36.12	48.77
11/5/2015	0.0787	0.0765	0.0284	0.0276	-0.0110	-0.0126	-0.0046	-0.0055	28.07	32.41	40.80	30.63	36.83	49.33
12/5/2015	0.0755	0.0739	0.0272	0.0264	-0.0117	-0.0122	-0.0042	-0.0048	28.32	32.71	39.50	31.30	37.06	49.03
13/5/2015	0.0409	0.0408	0.0131	0.0125	-0.0125	-0.0131	-0.0054	-0.0060	28.36	30.19	34.66	30.56	32.98	41.33
14/5/2015	0.0600	0.0587	0.0195	0.0187	-0.0176	-0.0194	-0.0061	-0.0068	27.81	30.38	35.03	29.90	33.81	44.21
15/5/2015	0.0821	0.0799	0.0284	0.0275	-0.0128	-0.0141	-0.0063	-0.0071	27.13	31.89	39.59	29.65	36.07	49.24
16/5/2015	0.0760	0.0734	0.0235	0.0228	-0.0123	-0.0134	-0.0048	-0.0055	27.80	31.31	37.96	30.87	35.05	46.84
17/5/2015	0.0516	0.0497	0.0162	0.0153	-0.0087	-0.0119	-0.0052	-0.0059	28.28	32.15	37.98	30.45	35.03	42.21
18/5/2015	0.0939	0.0909	0.0331	0.0324	-0.0084	-0.0106	-0.0052	-0.0058	28.51	33.23	40.82	30.32	37.52	51.94
19/5/2015	0.0980	0.0952	0.0328	0.0321	-0.0094	-0.0113	-0.0034	-0.0041	28.84	33.62	42.35	31.80	38.32	52.45
20/5/2015	0.0592	0.0577	0.0222	0.0214	-0.0114	-0.0129	-0.0041	-0.0047	28.98	32.94	39.32	31.96	37.22	46.68
21/5/2015	0.0596	0.0587	0.0196	0.0190	-0.0144	-0.0153	-0.0055	-0.0061	27.74	31.97	38.45	31.31	35.90	45.39
22/5/2015	0.0673	0.0657	0.0222	0.0214	-0.0128	-0.0141	-0.0061	-0.0068	27.63	31.74	37.51	30.76	35.97	46.61
23/5/2015	0.0530	0.0516	0.0171	0.0164	-0.0113	-0.0124	-0.0047	-0.0054	28.83	31.94	37.50	31.55	35.91	43.74
24/5/2015	0.0593	0.0579	0.0192	0.0183	-0.0099	-0.0108	-0.0043	-0.0051	28.86	32.49	37.19	31.72	36.11	44.96
25/5/2015	0.0581	0.0569	0.0193	0.0186	-0.0226	-0.0238	-0.0058	-0.0066	28.68	32.33	38.92	30.90	35.57	45.08
26/5/2015	0.0517	0.0496	0.0154	0.0145	-0.0186	-0.0199	-0.0068	-0.0076	27.96	31.86	37.51	30.30	34.66	42.53
27/5/2015	0.0725	0.0702	0.0223	0.0215	-0.0104	-0.0121	-0.0056	-0.0063	28.19	32.00	39.83	30.77	35.43	46.51
28/5/2015	0.0539	0.0491	0.0140	0.0130	-0.0234	-0.0253	-0.0117	-0.0124	25.60	31.19	37.58	27.16	33.09	41.19
29/5/2015	0.0788	0.0756	0.0198	0.0191	-0.0160	-0.0172	-0.0090	-0.0096	27.62	32.02	37.10	28.00	33.80	44.26
30/5/2015	0.1047	0.1006	0.0338	0.0329	-0.0057	-0.0086	-0.0053	-0.0061	28.42	32.84	39.00	29.82	36.14	51.97
31/5/2015	0.0956	0.0922	0.0322	0.0312	-0.0062	-0.0087	-0.0036	-0.0044	29.39	33.53	39.50	31.20	37.45	51.51

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/6/2015	0.1046	0.1012	0.0357	0.0348	-0.0092	-0.0107	-0.0034	-0.0041	29.51	34.08	40.88	31.95	38.59	54.10
2/6/2015	0.0759	0.0729	0.0270	0.0261	-0.0188	-0.0204	-0.0034	-0.0041	28.28	33.07	40.55	32.47	37.96	49.59
3/6/2015	0.0151	0.0152	0.0041	0.0036	-0.0158	-0.0172	-0.0059	-0.0068	27.34	30.09	35.66	31.31	33.47	36.70
4/6/2015	0.0640	0.0597	0.0191	0.0183	-0.0126	-0.0131	-0.0072	-0.0079	27.10	31.07	37.70	29.84	34.39	44.58
5/6/2015	0.0968	0.0923	0.0287	0.0278	-0.0067	-0.0102	-0.0059	-0.0066	28.09	32.10	41.68	30.33	34.98	49.85
6/6/2015	0.0982	0.0937	0.0319	0.0309	-0.0065	-0.0092	-0.0049	-0.0058	28.50	33.65	42.45	30.82	37.22	51.67
7/6/2015	0.0903	0.0856	0.0282	0.0273	-0.0151	-0.0171	-0.0062	-0.0070	27.72	33.32	39.67	30.54	36.92	50.06
8/6/2015	0.0524	0.0485	0.0143	0.0133	-0.0234	-0.0272	-0.0091	-0.0100	25.91	30.71	36.40	29.04	34.30	42.09
9/6/2015	0.1000	0.0962	0.0262	0.0255	-0.0280	-0.0307	-0.0112	-0.0119	25.41	31.11	37.35	27.48	33.70	48.25
10/6/2015	0.1080	0.1033	0.0341	0.0334	-0.0051	-0.0086	-0.0052	-0.0058	28.50	32.93	41.62	30.13	36.67	52.42
11/6/2015	0.0995	0.0954	0.0320	0.0313	-0.0077	-0.0107	-0.0045	-0.0051	28.42	32.93	38.93	30.98	37.06	51.68
12/6/2015	0.0849	0.0816	0.0261	0.0253	-0.0082	-0.0106	-0.0039	-0.0044	28.86	32.59	41.31	31.72	36.30	48.68
13/6/2015	0.0788	0.0774	0.0249	0.0242	-0.0117	-0.0137	-0.0061	-0.0069	26.43	31.92	39.48	30.58	35.91	48.00
14/6/2015	0.0924	0.0897	0.0298	0.0290	-0.0360	-0.0371	-0.0099	-0.0106	26.48	31.35	38.78	28.52	35.84	50.95
15/6/2015	0.0633	0.0583	0.0159	0.0152	-0.0198	-0.0203	-0.0099	-0.0106	26.30	30.06	35.27	28.09	32.73	42.31
16/6/2015	0.0423	0.0396	0.0099	0.0095	-0.0071	-0.0108	-0.0065	-0.0074	26.75	29.10	29.10	28.87	31.13	38.57
17/6/2015	0.0852	0.0823	0.0242	0.0232	-0.0149	-0.0177	-0.0101	-0.0109	25.76	29.45	34.56	26.80	32.17	45.84
18/6/2015	0.0297	0.0271	0.0059	0.0051	-0.0057	-0.0091	-0.0061	-0.0069	26.65	29.68	33.42	28.72	31.54	35.41
19/6/2015	0.0908	0.0881	0.0257	0.0249	-0.0335	-0.0354	-0.0060	-0.0071	25.26	30.68	38.52	28.36	33.29	46.49
20/6/2015	0.1090	0.1019	0.0328	0.0318	-0.0120	-0.0137	-0.0067	-0.0075	27.90	31.99	38.17	28.17	34.68	50.50
21/6/2015	0.0717	0.0681	0.0222	0.0212	-0.0053	-0.0091	-0.0043	-0.0052	27.87	32.05	36.54	29.70	34.77	44.71
22/6/2015	0.0681	0.0650	0.0222	0.0213	-0.0061	-0.0079	-0.0033	-0.0039	28.11	31.55	35.98	30.58	35.13	44.91
23/6/2015	0.0658	0.0636	0.0196	0.0189	-0.0089	-0.0113	-0.0036	-0.0046	27.86	30.23	36.35	30.66	33.20	43.88
24/6/2015	0.0579	0.0532	0.0174	0.0165	-0.0032	-0.0077	-0.0049	-0.0059	28.33	30.60	34.86	29.72	33.14	42.23
25/6/2015	0.0606	0.0568	0.0177	0.0168	-0.0042	-0.0079	-0.0048	-0.0057	27.95	30.77	34.99	29.52	33.63	42.19
26/6/2015	0.0551	0.0523	0.0176	0.0167	-0.0066	-0.0092	-0.0044	-0.0052	27.81	30.48	35.16	29.72	33.74	42.15
27/6/2015	0.0588	0.0563	0.0158	0.0152	-0.0258	-0.0271	-0.0110	-0.0119	24.56	29.23	33.99	25.98	31.89	41.11
28/6/2015	0.0529	0.0492	0.0157	0.0151	-0.0107	-0.0142	-0.0057	-0.0064	26.96	29.76	34.91	28.52	32.35	40.51
29/6/2015	0.0808	0.0771	0.0250	0.0240	-0.0128	-0.0151	-0.0077	-0.0086	26.19	30.53	37.24	27.12	32.70	45.47
30/6/2015	0.0789	0.0744	0.0244	0.0235	-0.0053	-0.0086	-0.0047	-0.0055	26.78	31.77	38.58	28.88	33.56	45.32

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนกรกฎาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/7/2015	0.0967	0.0924	0.0281	0.0272	-0.0057	-0.0091	-0.0043	-0.0050	27.90	32.17	38.70	29.32	34.93	47.71
2/7/2015	0.0921	0.0914	0.0310	0.0306	-0.0053	-0.0083	-0.0031	-0.0040	28.40	32.56	38.59	30.36	36.13	50.02
3/7/2015	0.0773	0.0734	0.0233	0.0226	-0.0078	-0.0104	-0.0038	-0.0041	28.34	32.03	37.86	30.54	35.34	45.88
4/7/2015	0.0943	0.0895	0.0302	0.0296	-0.0083	-0.0108	-0.0044	-0.0048	28.35	32.10	37.49	30.38	36.25	50.03
5/7/2015	0.0596	0.0567	0.0215	0.0210	-0.0082	-0.0101	-0.0030	-0.0034	28.91	31.98	36.12	31.55	36.25	45.47
6/7/2015	0.0497	0.0477	0.0156	0.0153	-0.0213	-0.0238	-0.0063	-0.0069	27.48	31.13	35.78	29.83	34.77	42.32
7/7/2015	0.0890	0.0823	0.0268	0.0261	-0.0164	-0.0178	-0.0074	-0.0078	27.49	31.94	39.58	29.08	34.62	48.16
8/7/2015	0.0779	0.0731	0.0248	0.0241	-0.0039	-0.0073	-0.0041	-0.0043	29.53	32.58	37.40	30.78	35.39	46.99
9/7/2015	0.0424	0.0392	0.0122	0.0119	-0.0049	-0.0079	-0.0034	-0.0036	29.66	31.68	34.48	31.24	34.18	40.00
10/7/2015	0.1004	0.0953	0.0324	0.0319	-0.0067	-0.0094	-0.0051	-0.0054	28.44	32.41	37.76	30.15	36.72	51.45
11/7/2015	0.0911	0.0882	0.0285	0.0290	-0.0099	-0.0124	-0.0043	-0.0046	28.07	32.81	40.00	31.03	36.93	50.41
12/7/2015	0.0697	0.0666	0.0227	0.0219	-0.0105	-0.0122	-0.0041	-0.0046	28.86	32.42	38.10	31.45	35.81	46.48
13/7/2015	0.0917	0.0883	0.0309	0.0303	-0.0197	-0.0212	-0.0051	-0.0057	28.22	31.96	39.17	30.95	36.39	51.34
14/7/2015	0.0593	0.0553	0.0153	0.0146	-0.0164	-0.0201	-0.0067	-0.0072	26.90	31.40	38.14	29.70	33.88	42.23
15/7/2015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0153	-0.0183	-0.0071	-0.0075	26.22	26.66	27.10	29.40	29.76	30.11
16/7/2015	0.0417	0.0374	0.0099	0.0092	-0.0122	-0.0149	-0.0076	-0.0076	26.78	30.40	33.75	28.39	31.51	37.97
17/7/2015	0.0243	0.0224	0.0042	0.0036	-0.0104	-0.0117	-0.0075	-0.0081	26.34	30.03	32.72	27.92	30.98	34.28
18/7/2015	0.0222	0.0202	0.0052	0.0046	-0.0073	-0.0089	-0.0060	-0.0066	27.46	30.29	33.77	28.42	31.23	34.60
19/7/2015	0.0257	0.0233	0.0073	0.0066	-0.0092	-0.0113	-0.0058	-0.0065	26.70	29.32	33.52	28.20	31.01	35.60
20/7/2015	0.0461	0.0434	0.0116	0.0108	-0.0088	-0.0098	-0.0063	-0.0068	26.78	29.04	32.78	27.85	31.14	37.81
21/7/2015	0.0483	0.0462	0.0146	0.0137	-0.0096	-0.0108	-0.0057	-0.0061	26.19	29.76	34.14	28.07	32.29	39.37
22/7/2015	0.0425	0.0397	0.0131	0.0125	-0.0083	-0.0106	-0.0044	-0.0049	27.13	30.13	34.02	28.79	31.99	38.68
23/7/2015	0.0794	0.0763	0.0252	0.0246	-0.0068	-0.0077	-0.0037	-0.0041	27.57	31.99	39.46	29.35	34.56	45.72
24/7/2015	0.0905	0.0878	0.0304	0.0299	-0.0058	-0.0079	-0.0024	-0.0028	28.38	32.36	38.10	30.56	36.22	49.30
25/7/2015	0.0832	0.0812	0.0264	0.0260	-0.0068	-0.0084	-0.0022	-0.0026	28.57	32.51	38.03	31.34	35.96	47.61
26/7/2015	0.0433	0.0415	0.0152	0.0147	-0.0106	-0.0123	-0.0038	-0.0044	26.66	31.32	36.44	30.72	35.01	41.39
27/7/2015	0.0150	0.0136	0.0032	0.0027	-0.0188	-0.0193	-0.0105	-0.0110	25.02	27.84	31.52	26.38	30.02	34.67
28/7/2015	0.0643	0.0624	0.0171	0.0163	-0.0154	-0.0176	-0.0102	-0.0107	24.34	28.32	34.18	26.38	31.03	41.24
29/7/2015	0.0358	0.0340	0.0068	0.0063	-0.0174	-0.0192	-0.0103	-0.0107	23.29	27.76	32.42	25.47	28.60	34.77
30/7/2015	0.0454	0.0452	0.0108	0.0103	-0.0147	-0.0148	-0.0101	-0.0107	23.53	26.89	33.79	24.71	28.71	36.16
31/7/2015	0.0636	0.0627	0.0159	0.0154	-0.0155	-0.0153	-0.0091	-0.0096	24.02	27.45	31.61	24.54	29.20	38.68

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนสิงหาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/8/2015	0.0483	0.0467	0.0144	0.0138	-0.0093	-0.0104	-0.0056	-0.0062	25.09	27.81	33.68	26.53	30.18	37.76
2/8/2015	0.0281	0.0272	0.0057	0.0050	-0.0103	-0.0113	-0.0064	-0.0073	25.40	26.65	30.32	26.07	27.75	32.89
3/8/2015	0.0510	0.0497	0.0145	0.0139	-0.0106	-0.0104	-0.0070	-0.0076	25.24	27.72	32.53	25.37	28.80	37.46
4/8/2015	0.0583	0.0561	0.0183	0.0174	-0.0106	-0.0101	-0.0055	-0.0062	25.75	29.56	33.50	26.24	31.42	39.74
5/8/2015	0.0852	0.0790	0.0270	0.0263	-0.0042	-0.0065	-0.0033	-0.0040	26.82	30.36	39.72	27.89	33.12	45.82
6/8/2015	0.0421	0.0391	0.0146	0.0139	-0.0117	-0.0148	-0.0036	-0.0039	25.92	29.68	33.73	28.34	31.71	38.53
7/8/2015	0.0762	0.0718	0.0252	0.0244	-0.0092	-0.0117	-0.0048	-0.0053	26.48	30.87	36.22	27.75	33.41	44.71
8/8/2015	0.0758	0.0727	0.0250	0.0244	-0.0032	-0.0071	-0.0019	-0.0024	28.28	31.24	39.26	29.84	33.95	45.12
9/8/2015	0.0908	0.0876	0.0304	0.0298	-0.0163	-0.0191	-0.0024	-0.0029	28.28	31.11	37.98	29.88	35.40	48.52
10/8/2015	0.0956	0.0887	0.0310	0.0304	-0.0163	-0.0188	-0.0048	-0.0052	27.97	31.62	37.18	29.11	35.72	49.38
11/8/2015	0.0798	0.0744	0.0250	0.0245	-0.0159	-0.0195	-0.0058	-0.0063	27.14	30.92	39.43	28.65	33.81	46.08
12/8/2015	0.0682	0.0629	0.0217	0.0210	-0.0150	-0.0194	-0.0075	-0.0078	25.63	29.64	36.53	27.64	32.34	43.68
13/8/2015	0.0207	0.0179	0.0031	0.0026	-0.0128	-0.0154	-0.0070	-0.0073	26.06	27.93	32.47	26.99	29.11	32.92
14/8/2015	0.0690	0.0672	0.0188	0.0180	-0.0112	-0.0116	-0.0073	-0.0077	25.88	30.05	35.56	26.62	31.65	41.15
15/8/2015	0.0975	0.0940	0.0301	0.0295	-0.0163	-0.0179	-0.0061	-0.0066	26.60	29.33	39.17	27.15	31.32	47.71
16/8/2015	0.0966	0.0928	0.0319	0.0313	-0.0099	-0.0111	-0.0058	-0.0063	26.27	31.12	39.39	27.22	33.89	48.66
17/8/2015	0.1110	0.1072	0.0383	0.0378	-0.0061	-0.0089	-0.0020	-0.0025	28.55	32.27	38.92	29.81	36.84	52.94
18/8/2015	0.1051	0.1009	0.0381	0.0376	-0.0115	-0.0139	-0.0030	-0.0033	27.08	32.19	37.99	30.06	37.25	53.46
19/8/2015	0.1029	0.0991	0.0356	0.0352	-0.0121	-0.0137	-0.0029	-0.0031	27.77	32.36	38.38	30.81	37.91	52.67
20/8/2015	0.1127	0.1087	0.0388	0.0384	-0.0129	-0.0144	-0.0033	-0.0033	27.62	31.85	39.75	31.14	37.53	55.08
21/8/2015	0.0566	0.0546	0.0210	0.0206	-0.0167	-0.0179	-0.0044	-0.0046	28.23	30.57	36.88	30.57	34.55	44.97
22/8/2015	0.0756	0.0734	0.0242	0.0239	-0.0122	-0.0136	-0.0047	-0.0049	28.37	30.94	35.83	30.35	35.51	46.70
23/8/2015	0.0837	0.0807	0.0298	0.0294	-0.0093	-0.0110	-0.0033	-0.0034	28.42	31.50	36.57	31.21	36.87	49.91
24/8/2015	0.1064	0.1037	0.0397	0.0393	-0.0227	-0.0248	-0.0032	-0.0033	28.64	32.10	37.05	31.47	38.14	55.89
25/8/2015	0.0428	0.0410	0.0162	0.0160	-0.0147	-0.0165	-0.0036	-0.0035	28.27	31.16	35.51	31.57	34.89	42.73
26/8/2015	0.0449	0.0431	0.0149	0.0148	-0.0196	-0.0216	-0.0081	-0.0082	26.32	29.51	36.00	28.47	32.54	41.71
27/8/2015	0.0419	0.0389	0.0109	0.0106	-0.0169	-0.0182	-0.0082	-0.0083	25.91	28.95	35.21	28.12	31.51	38.62
28/8/2015	0.0316	0.0283	0.0078	0.0071	-0.0104	-0.0131	-0.0081	-0.0084	26.05	29.10	33.22	27.51	30.89	36.18
29/8/2015	0.0908	0.0878	0.0310	0.0303	-0.0175	-0.0196	-0.0056	-0.0059	26.23	30.61	37.44	28.48	34.30	49.19
30/8/2015	0.0906	0.0862	0.0264	0.0258	-0.0191	-0.0222	-0.0069	-0.0071	26.16	29.83	37.00	28.00	32.71	46.89
31/8/2015	0.0321	0.0281	0.0087	0.0079	-0.0168	-0.0192	-0.0073	-0.0077	25.93	29.70	33.82	27.67	30.42	36.31

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/9/2015	0.0489	0.0453	0.0134	0.0128	-0.0171	-0.0195	-0.0077	-0.0082	24.56	29.08	36.09	26.78	30.27	38.55
2/9/2015	0.0621	0.0578	0.0215	0.0206	-0.0144	-0.0168	-0.0077	-0.0083	25.82	30.02	36.48	26.35	31.61	42.64
3/9/2015	0.0616	0.0579	0.0192	0.0185	-0.0141	-0.0166	-0.0071	-0.0074	25.52	29.31	37.52	26.67	30.96	41.37
4/9/2015	0.0934	0.0821	0.0313	0.0305	-0.0141	-0.0169	-0.0085	-0.0090	25.48	30.15	40.48	25.82	33.41	48.35
5/9/2015	0.0534	0.0461	0.0187	0.0181	-0.0076	-0.0121	-0.0035	-0.0038	26.91	30.31	37.06	29.24	33.83	41.80
6/9/2015	0.0876	0.0771	0.0297	0.0292	-0.0139	-0.0162	-0.0071	-0.0075	25.76	31.09	38.08	27.51	35.24	48.29
7/9/2015	0.0867	0.0784	0.0306	0.0301	-0.0078	-0.0111	-0.0037	-0.0039	27.48	32.38	40.53	29.91	37.42	49.28
8/9/2015	0.0545	0.0469	0.0213	0.0209	-0.0088	-0.0118	-0.0025	-0.0028	28.03	31.56	36.29	31.21	35.94	44.69
9/9/2015	0.0799	0.0727	0.0299	0.0296	-0.0105	-0.0123	-0.0039	-0.0040	26.82	32.30	40.57	30.68	37.58	50.88
10/9/2015	0.0082	0.0061	0.0018	0.0016	-0.0438	-0.0441	-0.0139	-0.0143	27.22	31.56	37.33	25.17	28.66	34.14
11/9/2015	0.0237	0.0217	0.0047	0.0043	-0.0307	-0.0303	-0.0132	-0.0136	26.46	30.28	39.29	25.04	28.30	34.47
12/9/2015	0.0371	0.0343	0.0100	0.0097	-0.0393	-0.0457	-0.0106	-0.0114	28.17	33.19	42.67	25.16	30.16	36.98
13/9/2015	0.0393	0.0368	0.0103	0.0098	-0.0227	-0.0279	-0.0085	-0.0090	27.68	32.23	42.70	26.62	30.40	37.04
14/9/2015	0.0389	0.0353	0.0097	0.0090	-0.0210	-0.0282	-0.0093	-0.0099	27.13	30.80	40.32	25.91	29.21	36.36
15/9/2015	0.0128	0.0115	0.0011	0.0004	-0.0195	-0.0213	-0.0087	-0.0095	26.58	28.31	31.04	25.35	27.75	31.15
16/9/2015	0.0214	0.0199	0.0044	0.0036	-0.0202	-0.0202	-0.0099	-0.0107	25.68	28.34	35.01	24.66	27.51	32.35
17/9/2015	0.0200	0.0191	0.0040	0.0033	-0.0098	-0.0086	-0.0056	-0.0062	26.20	27.60	31.51	26.65	28.17	31.94
18/9/2015	0.0346	0.0340	0.0086	0.0081	-0.0071	-0.0063	-0.0052	-0.0060	26.14	28.59	33.32	26.54	29.14	34.39
19/9/2015	0.0941	0.0905	0.0316	0.0308	-0.0127	-0.0121	-0.0074	-0.0080	23.70	29.31	37.33	25.27	32.98	47.33
20/9/2015	0.0877	0.0781	0.0298	0.0290	-0.0051	-0.0062	-0.0030	-0.0037	27.25	31.64	39.02	28.32	34.89	46.97
21/9/2015	0.0968	0.0886	0.0312	0.0307	-0.0036	-0.0059	-0.0019	-0.0025	28.60	32.75	40.64	29.56	35.79	48.52
22/9/2015	0.0447	0.0398	0.0150	0.0144	-0.0194	-0.0228	-0.0054	-0.0062	26.29	30.56	35.05	28.05	32.49	39.72
23/9/2015	0.0363	0.0350	0.0079	0.0074	-0.0144	-0.0156	-0.0077	-0.0082	25.47	27.48	33.36	26.68	28.34	35.22
24/9/2015	0.0904	0.0844	0.0287	0.0278	-0.0113	-0.0102	-0.0069	-0.0073	25.63	29.66	36.55	26.24	31.75	46.31
25/9/2015	0.1034	0.0958	0.0330	0.0322	-0.0078	-0.0085	-0.0050	-0.0056	26.55	31.12	38.02	27.41	34.47	49.03
26/9/2015	0.1127	0.1026	0.0372	0.0363	-0.0061	-0.0084	-0.0035	-0.0041	27.30	32.01	38.97	28.72	36.90	51.84
27/9/2015	0.1127	0.1008	0.0384	0.0380	-0.0072	-0.0098	-0.0026	-0.0031	27.80	32.25	40.13	29.99	37.50	53.34
28/9/2015	0.0712	0.0661	0.0231	0.0228	-0.0206	-0.0230	-0.0062	-0.0065	26.96	30.31	37.28	28.48	33.22	45.21
29/9/2015	0.0918	0.0854	0.0282	0.0276	-0.0172	-0.0185	-0.0076	-0.0078	26.02	30.29	39.09	27.66	33.89	47.74
30/9/2015	0.0934	0.0849	0.0291	0.0286	-0.0137	-0.0178	-0.0053	-0.0056	26.71	30.48	40.41	28.80	34.46	48.19

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/10/2015	0.0428	0.0354	0.0131	0.0135	-0.0159	-0.0188	-0.0066	-0.0069	26.85	29.57	35.03	28.09	31.74	39.70
2/10/2015	0.0364	0.0354	0.0091	0.0086	-0.0139	-0.0160	-0.0071	-0.0075	26.57	28.95	34.44	27.52	30.40	36.25
3/10/2015	0.0133	0.0127	0.0009	0.0003	-0.0153	-0.0161	-0.0080	-0.0088	25.24	27.50	30.57	26.36	28.30	31.09
4/10/2015	0.0577	0.0567	0.0149	0.0141	-0.0094	-0.0088	-0.0063	-0.0070	26.24	28.02	33.10	26.66	29.46	38.65
5/10/2015	0.0575	0.0562	0.0158	0.0150	-0.0094	-0.0104	-0.0053	-0.0061	25.34	27.58	32.69	26.76	29.13	38.90
6/10/2015	0.0285	0.0277	0.0067	0.0059	-0.0108	-0.0108	-0.0065	-0.0072	24.98	27.55	32.59	26.01	28.38	33.25
7/10/2015	0.0775	0.0747	0.0252	0.0243	-0.0081	-0.0075	-0.0049	-0.0058	26.08	30.39	38.64	26.61	32.34	43.72
8/10/2015	0.0627	0.0606	0.0200	0.0192	-0.0094	-0.0113	-0.0049	-0.0057	26.37	30.19	36.83	27.12	32.06	41.22
9/10/2015	0.0099	0.0086	0.0013	0.0004	-0.0127	-0.0143	-0.0057	-0.0065	25.90	27.62	29.31	26.86	28.55	30.65
10/10/2015	0.0515	0.0481	0.0170	0.0162	-0.0171	-0.0198	-0.0055	-0.0062	25.72	28.88	35.39	26.46	30.25	39.03
11/10/2015	0.0441	0.0421	0.0134	0.0124	-0.0116	-0.0116	-0.0067	-0.0074	25.49	28.62	36.46	25.78	29.72	36.94
12/10/2015	0.0281	0.0243	0.0081	0.0072	-0.0117	-0.0135	-0.0057	-0.0064	25.40	27.91	32.40	26.22	28.99	33.85
13/10/2015	0.0537	0.0516	0.0144	0.0134	-0.0109	-0.0114	-0.0068	-0.0076	25.24	28.78	34.78	25.38	29.94	37.20
14/10/2015	0.0608	0.0567	0.0191	0.0184	-0.0083	-0.0096	-0.0053	-0.0059	24.98	29.51	35.46	26.26	31.69	40.07
15/10/2015	0.0611	0.0578	0.0203	0.0196	-0.0067	-0.0087	-0.0038	-0.0044	26.22	30.24	36.28	27.49	32.77	41.18
16/10/2015	0.0706	0.0659	0.0262	0.0254	-0.0084	-0.0102	-0.0041	-0.0043	25.92	31.25	38.36	27.88	34.29	44.87
17/10/2015	0.0691	0.0642	0.0264	0.0259	-0.0093	-0.0119	-0.0031	-0.0034	26.60	31.77	40.92	29.03	35.14	45.75
18/10/2015	0.0552	0.0512	0.0204	0.0201	-0.0107	-0.0134	-0.0030	-0.0034	27.53	31.34	37.27	29.60	34.24	42.81
19/10/2015	0.0355	0.0326	0.0135	0.0131	-0.0094	-0.0113	-0.0030	-0.0031	27.77	30.75	36.42	29.89	33.06	39.17
20/10/2015	0.0282	0.0263	0.0106	0.0102	-0.0092	-0.0106	-0.0040	-0.0042	27.61	30.15	34.64	29.30	31.95	37.32
21/10/2015	0.0631	0.0602	0.0229	0.0224	-0.0092	-0.0093	-0.0043	-0.0045	27.36	31.25	37.05	28.89	33.98	44.18
22/10/2015	0.0196	0.0191	0.0050	0.0048	-0.0195	-0.0202	-0.0065	-0.0071	26.90	29.17	34.04	27.76	30.40	34.32
23/10/2015	0.0618	0.0565	0.0208	0.0200	-0.0075	-0.0087	-0.0046	-0.0051	27.21	30.89	38.31	28.42	33.36	42.62
24/10/2015	0.0672	0.0623	0.0240	0.0233	-0.0086	-0.0112	-0.0041	-0.0046	27.50	31.33	36.31	28.99	34.47	44.84
25/10/2015	0.0708	0.0657	0.0260	0.0256	-0.0142	-0.0159	-0.0053	-0.0057	26.24	30.92	37.57	28.68	34.82	46.37
26/10/2015	0.0638	0.0598	0.0238	0.0232	-0.0183	-0.0195	-0.0064	-0.0066	25.69	30.79	38.70	28.60	34.46	45.51
27/10/2015	0.0641	0.0616	0.0218	0.0216	-0.0199	-0.0213	-0.0064	-0.0067	26.95	29.99	37.89	28.71	33.19	44.70
28/10/2015	0.0612	0.0568	0.0197	0.0191	-0.0158	-0.0177	-0.0074	-0.0078	26.35	30.92	38.26	27.94	33.62	42.97
29/10/2015	0.0517	0.0482	0.0190	0.0184	-0.0087	-0.0114	-0.0043	-0.0047	27.32	30.70	37.41	29.54	33.75	42.67
30/10/2015	0.0676	0.0644	0.0254	0.0249	-0.0120	-0.0135	-0.0050	-0.0054	26.88	31.16	36.65	29.20	35.45	46.43
31/10/2015	0.0717	0.0692	0.0262	0.0258	-0.0244	-0.0288	-0.0046	-0.0049	27.30	31.45	38.86	29.98	35.79	47.34

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/11/2015	0.0672	0.0612	0.0227	0.0224	-0.0148	-0.0203	-0.0072	-0.0072	25.95	30.81	38.64	28.98	35.29	45.61
2/11/2015	0.0626	0.0589	0.0204	0.0201	-0.0162	-0.0167	-0.0062	-0.0063	26.45	30.40	36.81	29.48	34.67	44.43
3/11/2015	0.0440	0.0429	0.0128	0.0127	-0.0170	-0.0179	-0.0066	-0.0067	26.03	29.50	34.54	29.25	33.31	40.14
4/11/2015	0.0701	0.0680	0.0252	0.0248	-0.0157	-0.0158	-0.0057	-0.0058	26.57	31.26	38.76	29.50	35.69	46.82
5/11/2015	0.0438	0.0433	0.0175	0.0171	-0.0188	-0.0182	-0.0060	-0.0061	26.48	31.11	36.18	29.62	34.73	42.72
6/11/2015	0.0544	0.0541	0.0186	0.0182	-0.0158	-0.0152	-0.0052	-0.0054	27.44	30.78	36.63	30.05	34.10	43.34
7/11/2015	0.0482	0.0479	0.0177	0.0172	-0.0189	-0.0184	-0.0049	-0.0052	27.06	30.00	34.46	30.08	34.16	42.82
8/11/2015	0.0586	0.0579	0.0223	0.0220	-0.0311	-0.0284	-0.0060	-0.0064	26.60	30.43	37.64	29.53	34.47	45.43
9/11/2015	0.0622	0.0571	0.0178	0.0173	-0.0210	-0.0220	-0.0084	-0.0090	26.62	29.75	36.60	27.90	32.34	42.50
10/11/2015	0.0456	0.0426	0.0123	0.0119	-0.0083	-0.0101	-0.0055	-0.0060	26.90	30.13	35.18	29.05	32.74	38.99
11/11/2015	0.0542	0.0508	0.0182	0.0176	-0.0101	-0.0116	-0.0059	-0.0063	26.20	30.81	38.51	28.57	33.53	42.03
12/11/2015	0.0575	0.0549	0.0209	0.0205	-0.0106	-0.0123	-0.0051	-0.0054	26.69	31.30	38.23	29.11	34.22	43.74
13/11/2015	0.0596	0.0564	0.0199	0.0194	-0.0116	-0.0131	-0.0044	-0.0047	27.30	30.70	37.05	29.66	34.30	43.42
14/11/2015	0.0637	0.0608	0.0224	0.0219	-0.0124	-0.0133	-0.0050	-0.0054	26.87	30.69	38.67	29.48	34.48	44.93
15/11/2015	0.0541	0.0526	0.0185	0.0182	-0.0188	-0.0196	-0.0044	-0.0046	27.15	30.59	38.96	30.03	33.61	42.93
16/11/2015	0.0539	0.0524	0.0176	0.0172	-0.0132	-0.0134	-0.0054	-0.0057	26.85	31.07	38.78	29.38	33.54	42.28
17/11/2015	0.0762	0.0738	0.0255	0.0250	-0.0117	-0.0128	-0.0046	-0.0049	27.39	31.22	36.98	29.75	35.71	46.87
18/11/2015	0.0475	0.0457	0.0163	0.0160	-0.0130	-0.0141	-0.0038	-0.0041	27.90	31.83	37.46	30.68	34.85	42.03
19/11/2015	0.0607	0.0587	0.0190	0.0187	-0.0144	-0.0148	-0.0054	-0.0057	27.07	31.10	38.52	29.99	34.30	43.78
20/11/2015	0.0546	0.0516	0.0176	0.0172	-0.0144	-0.0178	-0.0073	-0.0076	27.13	30.00	37.38	28.81	32.87	42.91
21/11/2015	0.0759	0.0691	0.0215	0.0209	-0.0081	-0.0138	-0.0079	-0.0082	26.09	31.23	39.05	28.26	34.06	44.58
22/11/2015	0.0762	0.0704	0.0242	0.0234	-0.0081	-0.0120	-0.0063	-0.0069	25.95	31.20	38.90	28.96	35.00	46.17
23/11/2015	0.0723	0.0671	0.0214	0.0208	-0.0103	-0.0135	-0.0057	-0.0062	26.22	31.06	38.14	29.57	34.77	44.86
24/11/2015	0.0643	0.0603	0.0219	0.0213	-0.0109	-0.0132	-0.0055	-0.0060	26.52	31.32	37.60	29.80	34.95	45.19
25/11/2015	0.0693	0.0663	0.0234	0.0229	-0.0117	-0.0139	-0.0053	-0.0056	26.81	31.77	39.12	30.06	35.23	46.29
26/11/2015	0.0507	0.0493	0.0194	0.0188	-0.0140	-0.0151	-0.0041	-0.0045	27.91	31.81	38.85	30.90	34.93	44.05
27/11/2015	0.0517	0.0493	0.0166	0.0160	-0.0161	-0.0164	-0.0064	-0.0068	25.77	30.41	35.86	29.65	34.25	42.50
28/11/2015	0.0322	0.0308	0.0092	0.0087	-0.0167	-0.0169	-0.0072	-0.0075	25.37	29.17	34.37	29.12	32.51	38.19
29/11/2015	0.0658	0.0634	0.0213	0.0205	-0.0151	-0.0147	-0.0076	-0.0079	25.22	30.90	39.45	28.50	34.11	44.65
30/11/2015	0.0590	0.0568	0.0220	0.0212	-0.0119	-0.0128	-0.0049	-0.0055	26.80	31.69	38.95	30.03	35.12	45.21

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2558

Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/12/2015	0.0628	0.0609	0.0241	0.0233	-0.0142	-0.0154	-0.0048	-0.0051	27.06	31.73	38.64	30.35	35.94	46.60
2/12/2015	0.0543	0.0524	0.0223	0.0218	-0.0153	-0.0165	-0.0052	-0.0054	27.71	31.31	36.86	30.44	35.34	45.90
3/12/2015	0.0544	0.0534	0.0200	0.0196	-0.0162	-0.0174	-0.0062	-0.0066	26.74	30.50	38.15	29.96	34.47	44.65
4/12/2015	0.0570	0.0558	0.0204	0.0198	-0.0169	-0.0182	-0.0071	-0.0074	25.99	30.21	36.71	29.38	34.33	44.81
5/12/2015	0.0428	0.0413	0.0139	0.0133	-0.0154	-0.0159	-0.0064	-0.0067	26.68	29.82	35.48	29.78	33.38	41.06
6/12/2015	0.0515	0.0497	0.0137	0.0133	-0.0172	-0.0182	-0.0083	-0.0087	25.48	29.19	36.08	28.46	32.65	40.79
7/12/2015	0.0562	0.0541	0.0172	0.0165	-0.0187	-0.0194	-0.0094	-0.0098	24.33	28.79	36.10	27.59	32.49	42.35
8/12/2015	0.0611	0.0591	0.0195	0.0188	-0.0208	-0.0204	-0.0099	-0.0102	23.71	29.18	37.37	27.10	32.86	43.46
9/12/2015	0.0623	0.0596	0.0210	0.0203	-0.0179	-0.0183	-0.0081	-0.0085	24.52	30.11	38.81	28.08	33.61	44.35
10/12/2015	0.0611	0.0583	0.0191	0.0183	-0.0178	-0.0183	-0.0076	-0.0081	24.52	30.27	38.93	28.45	33.64	43.35
11/12/2015	0.0598	0.0572	0.0190	0.0182	-0.0162	-0.0164	-0.0070	-0.0074	25.53	31.22	38.88	28.83	34.05	43.33
12/12/2015	0.0280	0.0264	0.0079	0.0071	-0.0159	-0.0168	-0.0069	-0.0074	25.89	29.97	35.94	28.99	32.08	37.06
13/12/2015	0.0374	0.0361	0.0125	0.0117	-0.0123	-0.0128	-0.0062	-0.0069	26.58	30.38	38.12	28.96	32.25	39.33
14/12/2015	0.0506	0.0486	0.0164	0.0155	-0.0125	-0.0131	-0.0060	-0.0067	26.59	31.09	37.82	28.86	33.38	41.39
15/12/2015	0.0417	0.0403	0.0135	0.0128	-0.0141	-0.0146	-0.0059	-0.0067	26.19	30.29	36.27	29.09	32.88	39.94
16/12/2015	0.0572	0.0554	0.0198	0.0189	-0.0137	-0.0141	-0.0065	-0.0071	26.89	30.48	36.65	28.75	33.39	43.47
17/12/2015	0.0467	0.0457	0.0156	0.0147	-0.0198	-0.0202	-0.0084	-0.0089	24.46	27.91	32.53	27.73	31.95	41.10
18/12/2015	0.0417	0.0412	0.0107	0.0099	-0.0239	-0.0241	-0.0119	-0.0124	21.48	25.74	31.75	25.52	29.97	38.00
19/12/2015	0.0508	0.0502	0.0146	0.0137	-0.0228	-0.0227	-0.0121	-0.0125	20.64	26.40	35.12	24.85	30.15	39.63
20/12/2015	0.0444	0.0434	0.0130	0.0121	-0.0215	-0.0214	-0.0113	-0.0119	21.52	26.84	34.58	25.09	29.78	38.52
21/12/2015	0.0594	0.0595	0.0193	0.0184	-0.0207	-0.0204	-0.0109	-0.0116	21.73	28.59	37.14	24.99	31.08	41.90
22/12/2015	0.0259	0.0247	0.0057	0.0049	-0.0127	-0.0129	-0.0058	-0.0064	26.05	28.35	33.91	28.05	30.26	34.46
23/12/2015	0.0276	0.0266	0.0061	0.0053	-0.0122	-0.0122	-0.0071	-0.0077	25.26	28.36	32.98	26.97	30.05	34.37
24/12/2015	0.0614	0.0612	0.0198	0.0186	-0.0107	-0.0109	-0.0064	-0.0073	25.43	30.04	35.15	27.28	32.66	42.00
25/12/2015	0.0618	0.0608	0.0209	0.0199	-0.0115	-0.0115	-0.0046	-0.0054	26.10	30.62	37.79	28.68	33.27	43.10
26/12/2015	0.0566	0.0562	0.0208	0.0198	-0.0123	-0.0125	-0.0052	-0.0058	26.58	29.76	34.32	28.72	33.49	43.32
27/12/2015	0.0571	0.0571	0.0211	0.0201	-0.0133	-0.0136	-0.0057	-0.0065	26.11	30.60	37.71	28.56	33.54	43.64
28/12/2015	0.0591	0.0586	0.0212	0.0202	-0.0142	-0.0147	-0.0061	-0.0068	26.10	29.98	36.87	28.54	33.46	43.90
29/12/2015	0.0582	0.0581	0.0208	0.0198	-0.0157	-0.0164	-0.0070	-0.0077	25.31	29.38	34.55	28.04	33.03	43.69
30/12/2015	0.0568	0.0563	0.0199	0.0189	-0.0161	-0.0166	-0.0075	-0.0083	24.66	29.46	35.44	27.72	32.76	43.11
31/12/2015	0.0568	0.0561	0.0195	0.0184	-0.0178	-0.0174	-0.0072	-0.0077	25.02	29.93	36.97	27.93	32.92	42.82

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบในเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2559

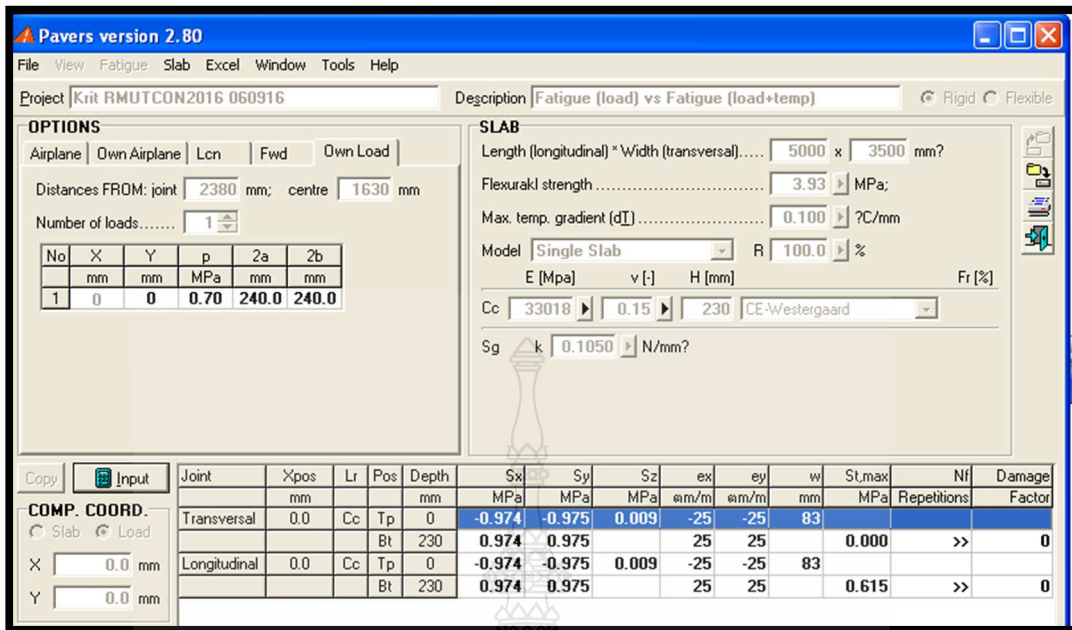
Day	Maximum Positive Temperature Gradient (°C/mm)				Maximum Negative Temperature Gradient (°C/mm)				Air temperature (°C)			Surface temperature (°C)		
	200		600		200		600		Min	Average	Max	Min	Average	Max
	280	420	280	420	280	420	280	420						
1/1/2016	0.0539	0.0533	0.0190	0.0179	-0.0197	-0.0205	-0.0090	-0.0096	23.14	28.56	35.96	26.90	31.90	42.49
2/1/2016	0.0614	0.0604	0.0196	0.0186	-0.0207	-0.0211	-0.0104	-0.0110	22.30	27.82	35.90	25.90	31.73	42.63
3/1/2016	0.0559	0.0548	0.0193	0.0184	-0.0196	-0.0195	-0.0093	-0.0099	22.62	28.67	36.69	26.38	31.84	42.34
4/1/2016	0.0599	0.0592	0.0204	0.0194	-0.0166	-0.0169	-0.0083	-0.0089	23.17	29.79	38.77	26.99	32.46	42.90
5/1/2016	0.0614	0.0603	0.0210	0.0199	-0.0161	-0.0166	-0.0076	-0.0082	23.80	29.96	40.14	27.39	32.87	43.39
6/1/2016	0.0552	0.0534	0.0192	0.0181	-0.0179	-0.0187	-0.0079	-0.0087	24.23	29.90	38.75	27.31	32.57	42.37
7/1/2016	0.0436	0.0429	0.0149	0.0141	-0.0164	-0.0169	-0.0076	-0.0082	24.67	29.73	37.23	27.51	31.95	40.02
8/1/2016	0.0121	0.0109	0.0009	0.0002	-0.0122	-0.0125	-0.0061	-0.0070	25.58	27.29	30.00	27.80	29.66	32.07
9/1/2016	0.0592	0.0584	0.0193	0.0183	-0.0122	-0.0122	-0.0070	-0.0077	25.27	28.41	33.76	27.34	31.49	41.87
10/1/2016	0.0542	0.0534	0.0185	0.0174	-0.0128	-0.0132	-0.0065	-0.0073	24.83	29.58	37.59	27.42	32.39	41.47
11/1/2016	0.0397	0.0378	0.0135	0.0126	-0.0137	-0.0136	-0.0061	-0.0069	25.04	29.26	35.14	27.87	31.85	38.77
12/1/2016	0.0568	0.0555	0.0179	0.0169	-0.0138	-0.0143	-0.0066	-0.0074	24.75	28.87	37.08	27.57	31.82	41.35
13/1/2016	0.0474	0.0447	0.0128	0.0119	-0.0141	-0.0146	-0.0071	-0.0077	24.41	29.33	36.03	27.25	31.60	38.38
14/1/2016	0.0451	0.0446	0.0176	0.0165	-0.0098	-0.0104	-0.0057	-0.0064	25.89	30.18	36.00	28.02	32.27	41.05
15/1/2016	0.0348	0.0323	0.0093	0.0082	-0.0109	-0.0117	-0.0050	-0.0059	26.13	30.13	35.67	28.44	31.25	36.41
16/1/2016	0.0454	0.0429	0.0142	0.0130	-0.0091	-0.0109	-0.0057	-0.0066	25.67	29.79	34.95	27.86	32.46	39.05
17/1/2016	0.0585	0.0555	0.0193	0.0182	-0.0078	-0.0101	-0.0047	-0.0056	26.65	30.67	37.05	28.64	33.10	42.09
18/1/2016	0.0558	0.0536	0.0164	0.0156	-0.0097	-0.0115	-0.0051	-0.0059	26.13	29.95	36.16	28.61	32.55	40.74
19/1/2016	0.0350	0.0331	0.0104	0.0094	-0.0107	-0.0126	-0.0049	-0.0059	26.62	29.13	32.65	28.36	30.38	37.27
20/1/2016	0.0629	0.0567	0.0189	0.0177	-0.0146	-0.0171	-0.0086	-0.0094	25.17	29.82	37.02	26.13	31.14	41.07
21/1/2016	0.0522	0.0493	0.0149	0.0142	-0.0096	-0.0110	-0.0050	-0.0057	26.64	29.51	37.82	27.48	29.81	38.85
22/1/2016	0.0481	0.0436	0.0146	0.0136	-0.0082	-0.0094	-0.0064	-0.0073	26.46	30.67	37.73	26.50	30.66	38.20
23/1/2016	0.0593	0.0564	0.0194	0.0184	-0.0068	-0.0085	-0.0048	-0.0055	26.31	30.60	38.21	27.41	32.41	41.05
24/1/2016	0.0197	0.0176	0.0039	0.0033	-0.0286	-0.0310	-0.0133	-0.0138	18.95	25.11	28.94	22.48	27.50	32.63
25/1/2016	0.0041	0.0031	-0.0069	-0.0071	-0.0201	-0.0222	-0.0154	-0.0159	16.38	18.60	21.89	20.09	22.14	24.94
26/1/2016	0.0358	0.0456	0.0113	0.0110	-0.0257	-0.0213	-0.0155	-0.0157	16.55	20.87	27.69	19.18	24.16	33.98
27/1/2016	0.0461	0.0432	0.0124	0.0122	-0.0226	-0.0221	-0.0140	-0.0138	16.85	22.57	29.59	19.52	24.80	34.08
28/1/2016	0.0649	0.0612	0.0209	0.0206	-0.0171	-0.0188	-0.0111	-0.0109	18.94	25.60	35.47	21.17	27.98	39.02
29/1/2016	0.0694	0.0655	0.0241	0.0237	-0.0118	-0.0135	-0.0062	-0.0062	22.80	29.55	38.85	24.39	30.71	41.50
30/1/2016	0.0487	0.0561	0.0211	0.0206	-0.0143	-0.0103	-0.0035	-0.0038	25.55	29.78	36.05	26.71	31.60	40.61
31/1/2016	0.0392	0.0470	0.0183	0.0177	-0.0237	-0.0156	-0.0039	-0.0044	26.16	29.38	36.34	27.11	29.92	39.52



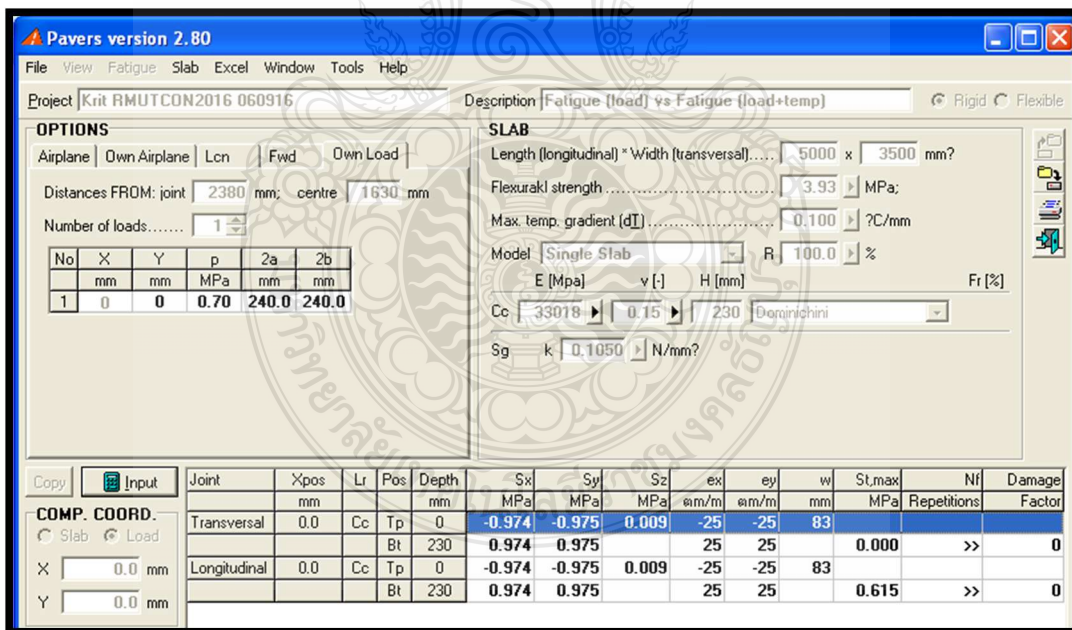
ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม PAVERS 2.80

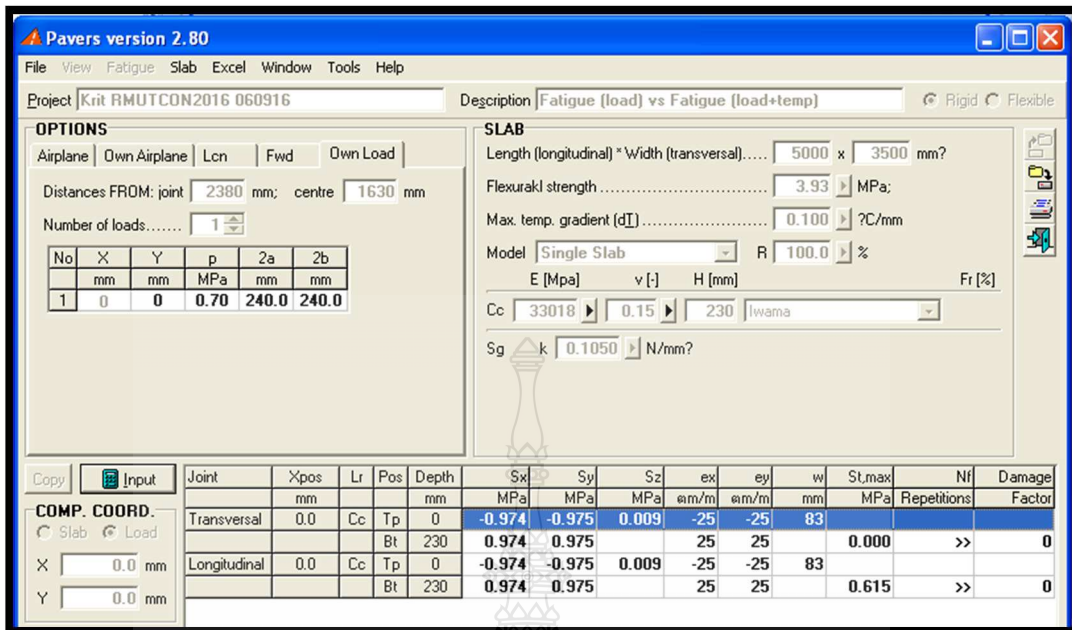




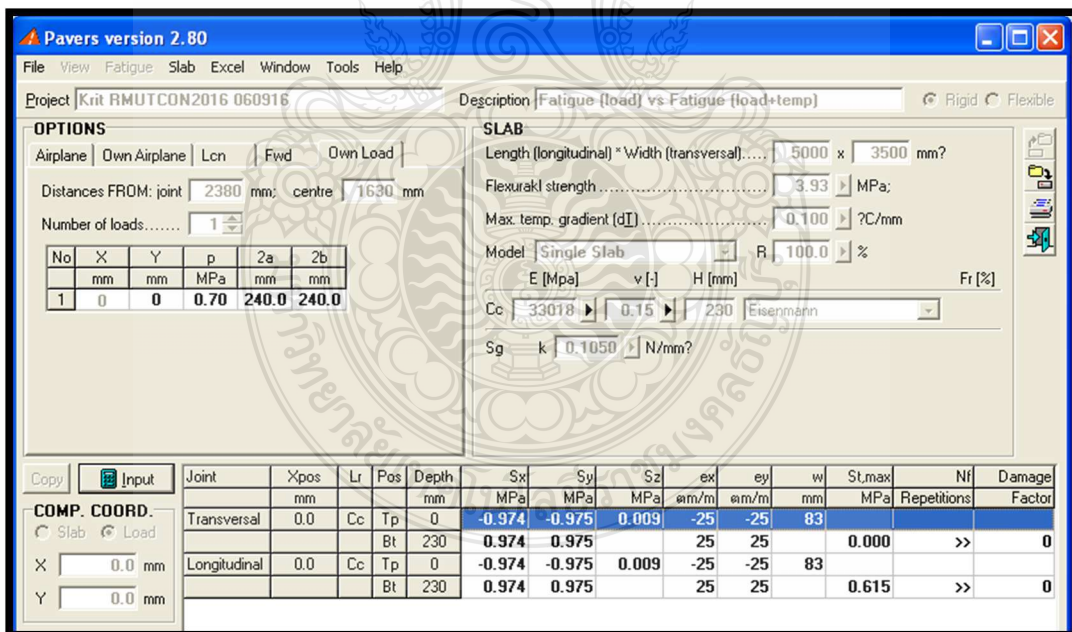
รูปที่ ข.1 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง CE-Westergaard



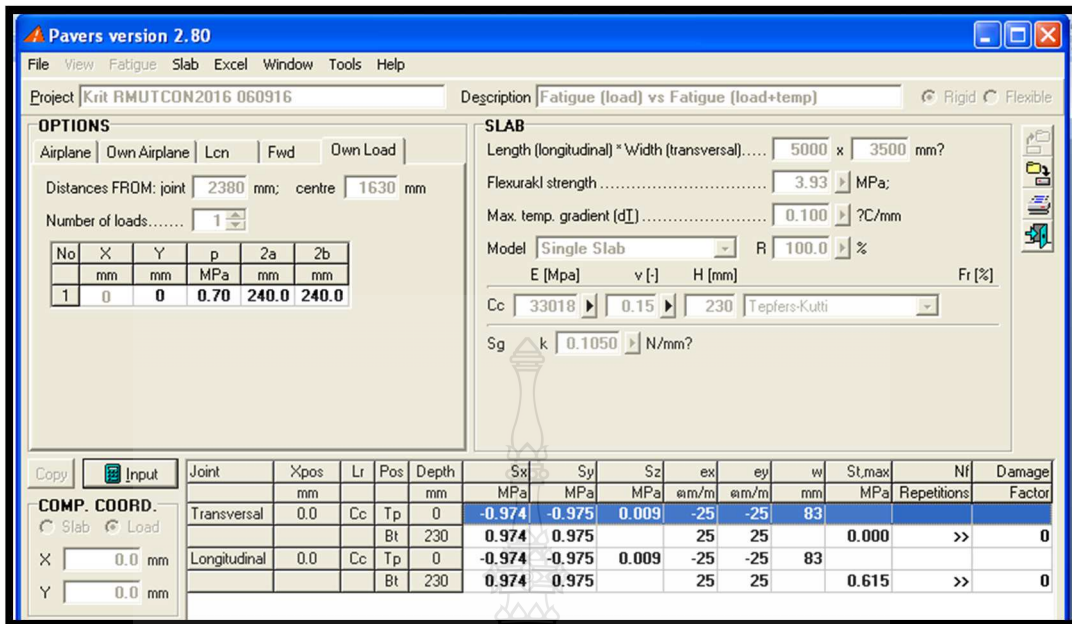
รูปที่ ข.2 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Dominichini



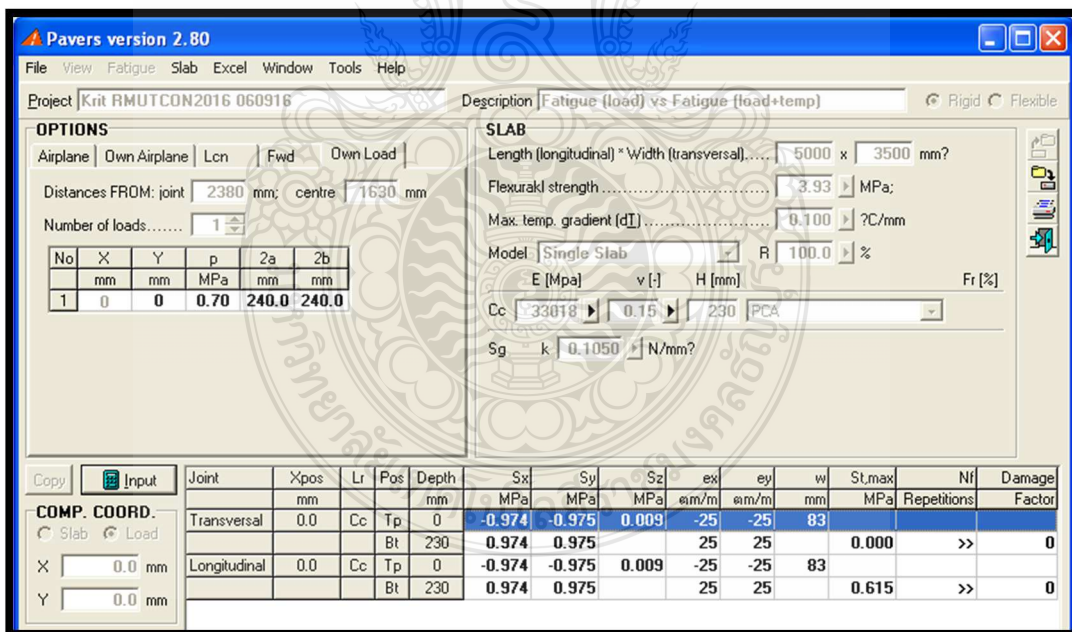
รูปที่ ข.3 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Iwama



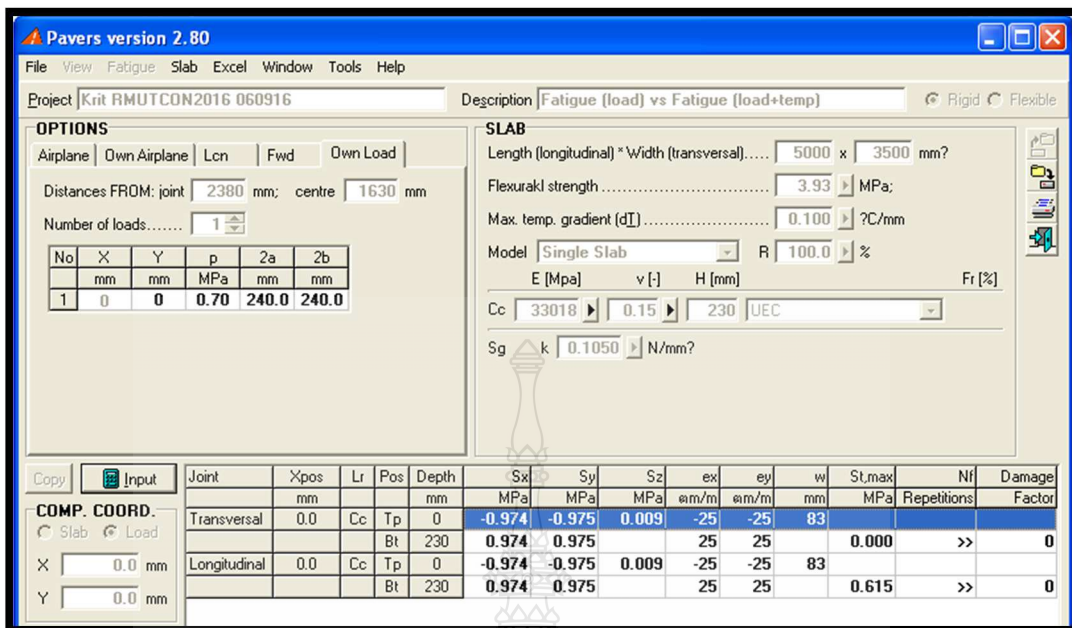
รูปที่ ข.4 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Eisenmann



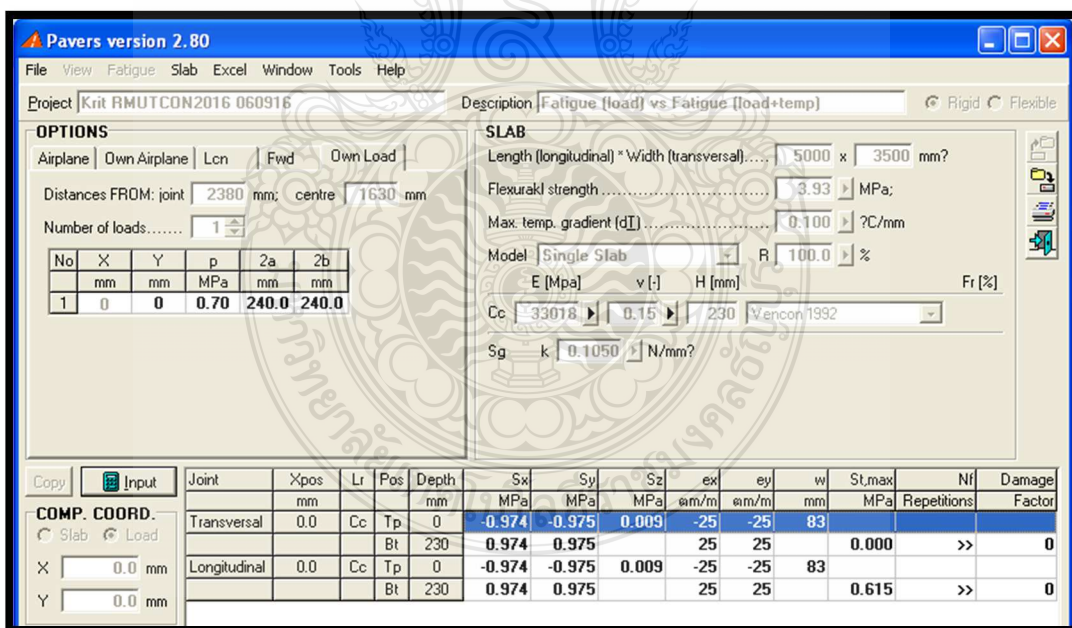
รูปที่ ข.5 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Tepfers-Kutti



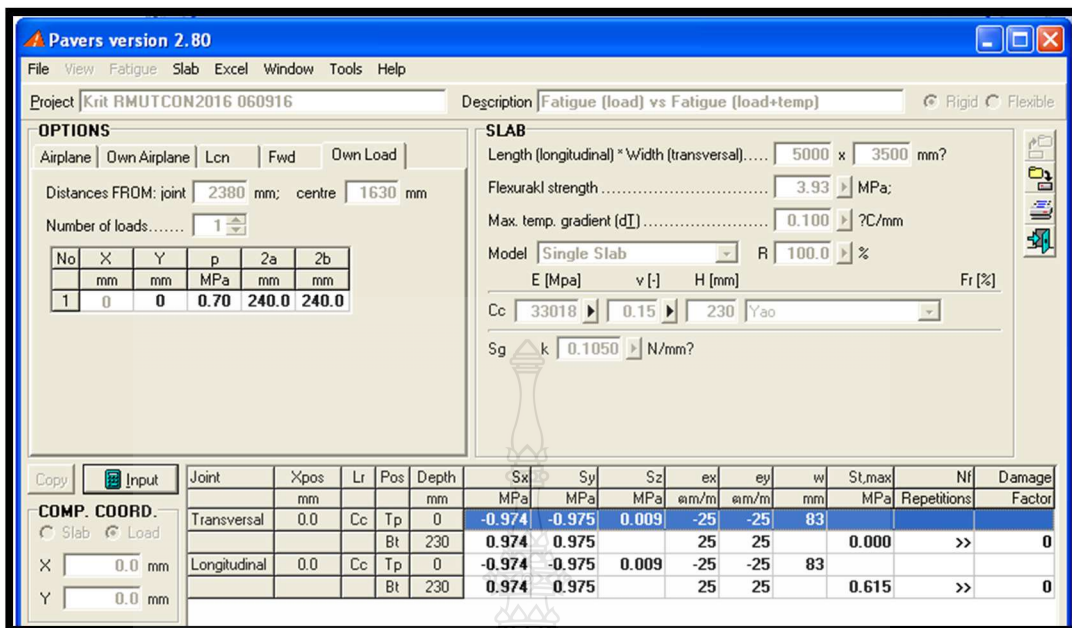
รูปที่ ข.6 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง PCA



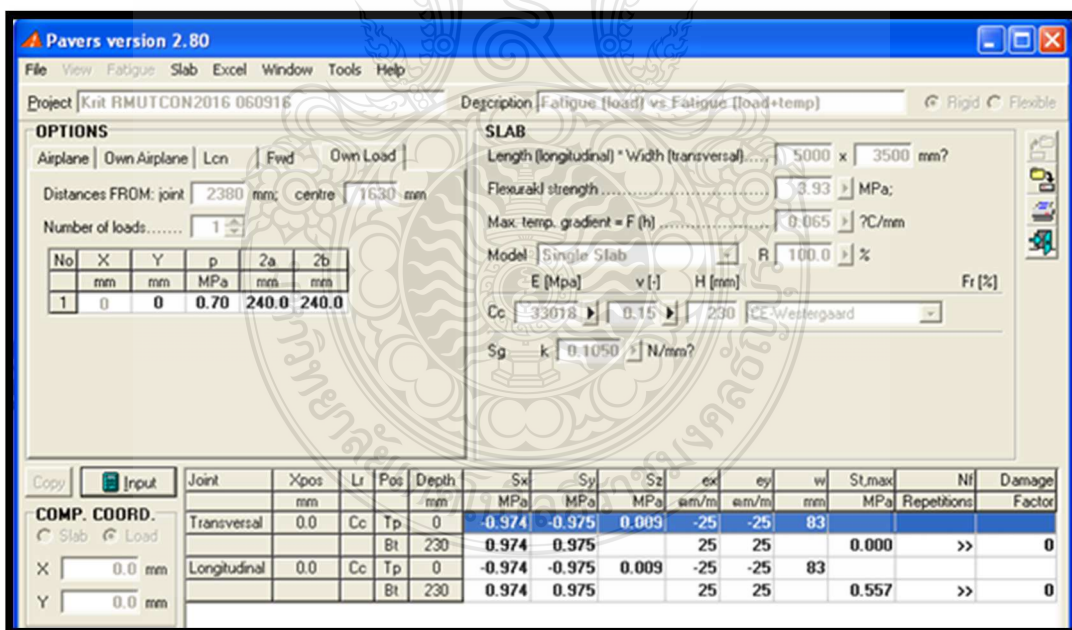
รูปที่ ข.7 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง UEC



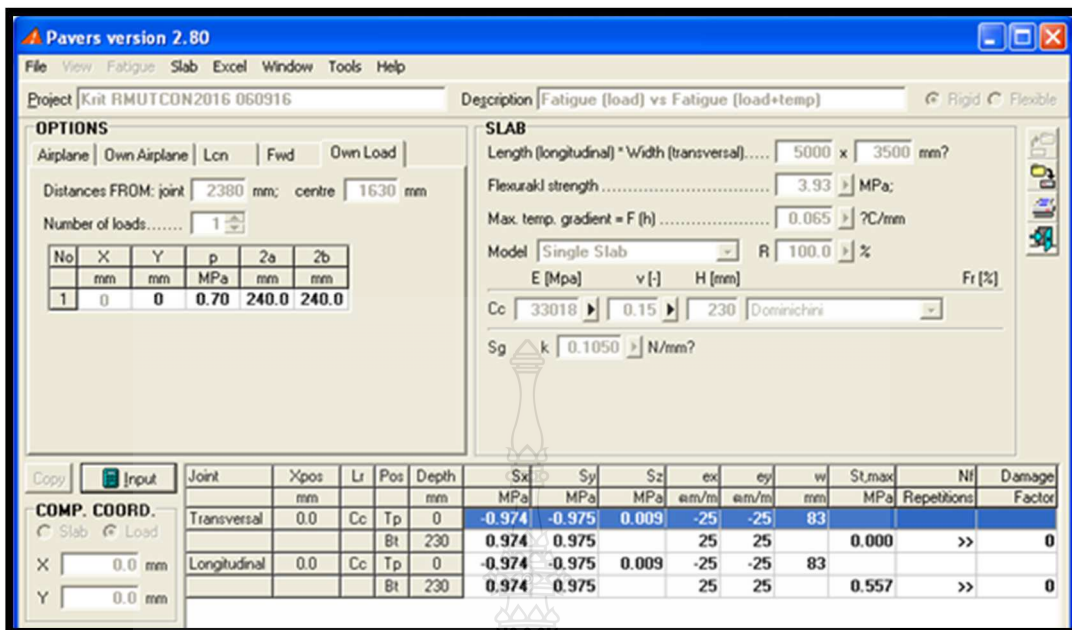
รูปที่ ข.8 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Vencon 1992



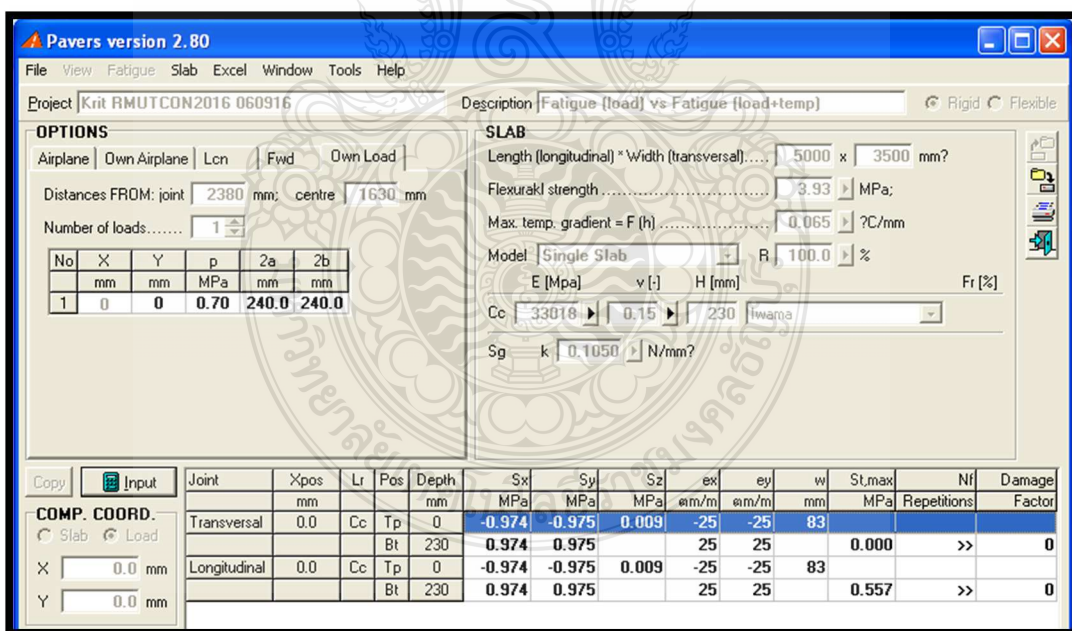
รูปที่ ข.9 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.100 °C/mm แบบจำลอง Yao



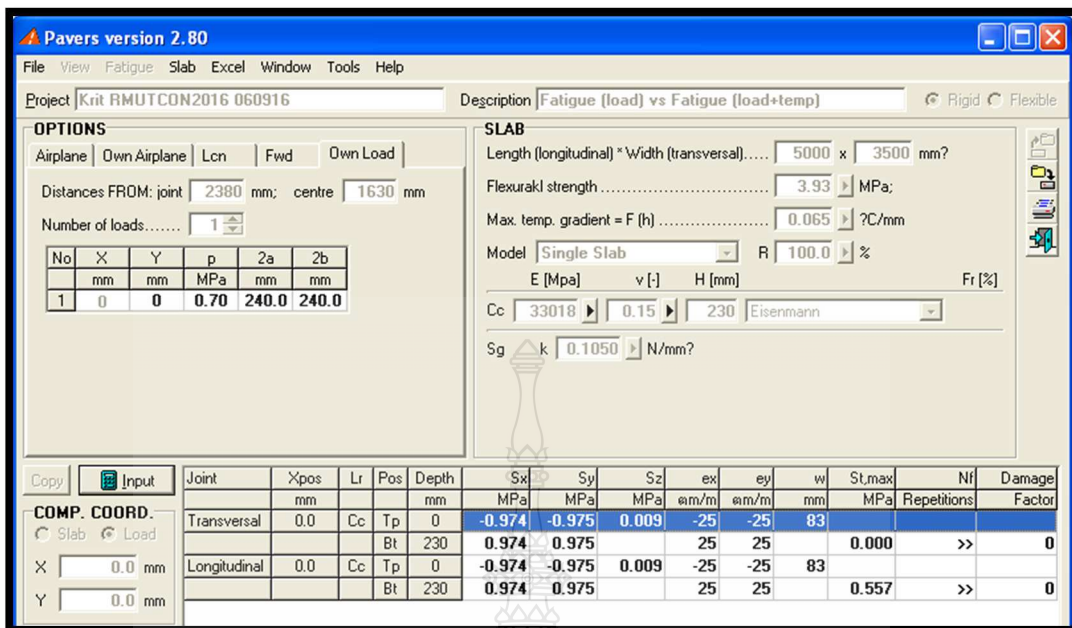
รูปที่ ข.10 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง CE-Westergaard



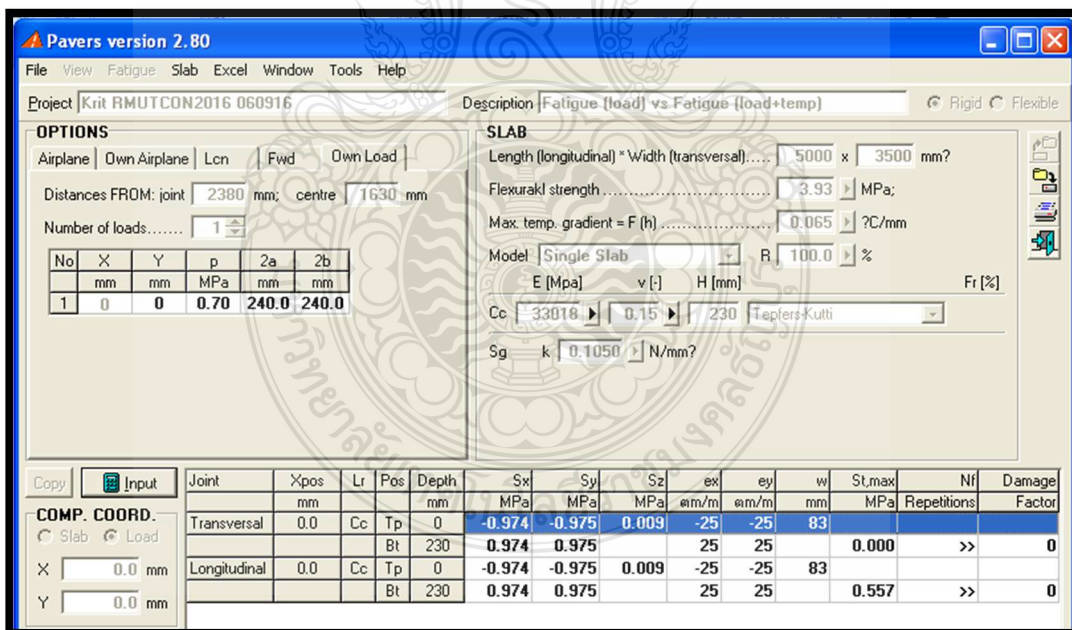
รูปที่ ข.11 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Dominichini



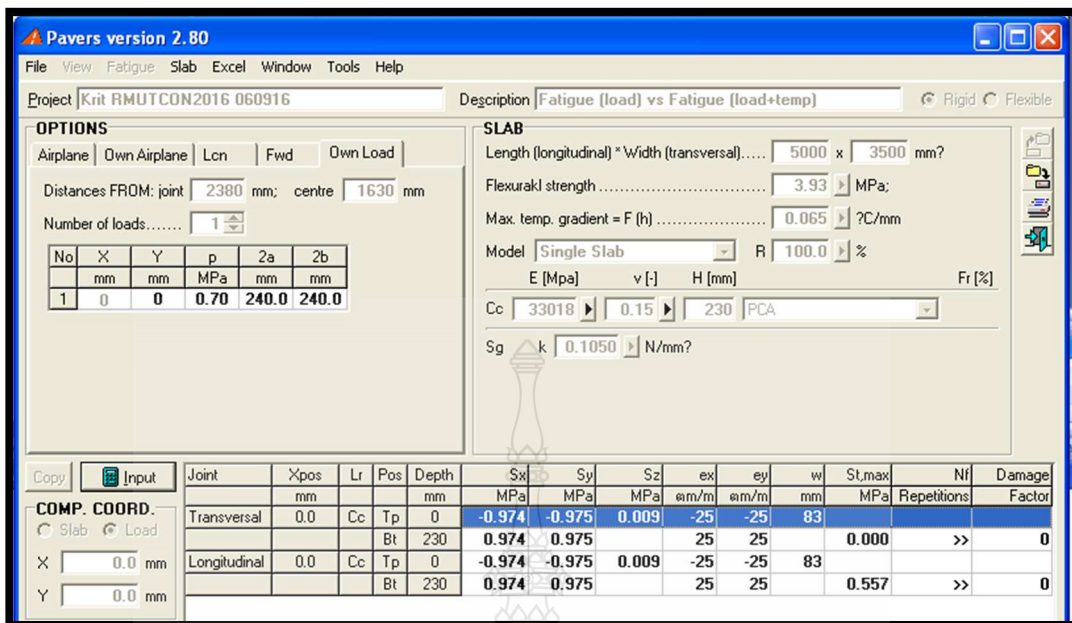
รูปที่ ข.12 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Iwama



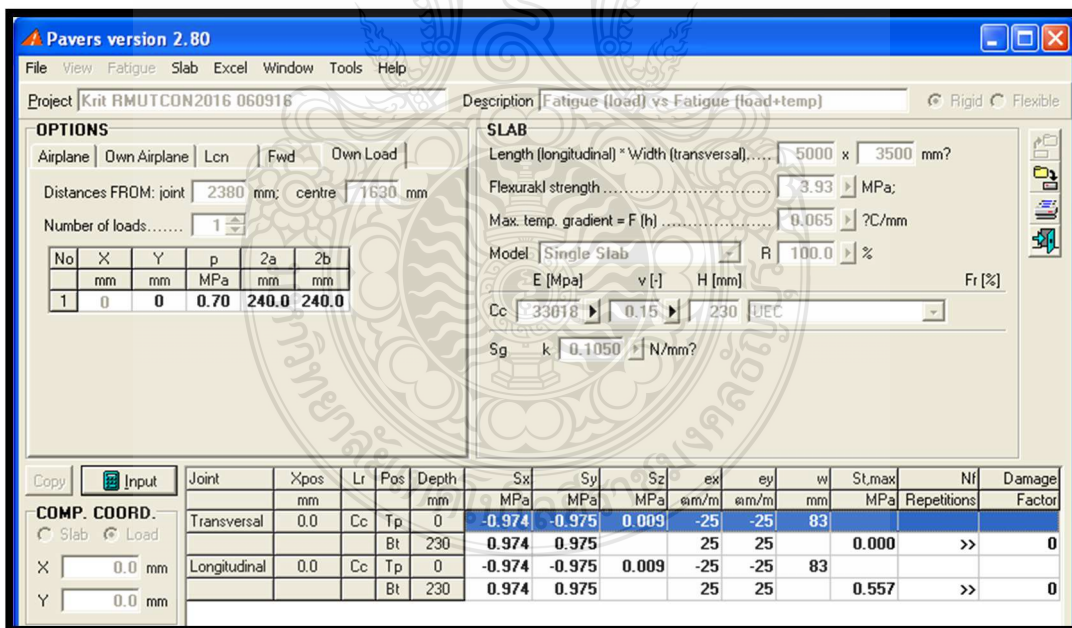
รูปที่ ข.13 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Eisenmann



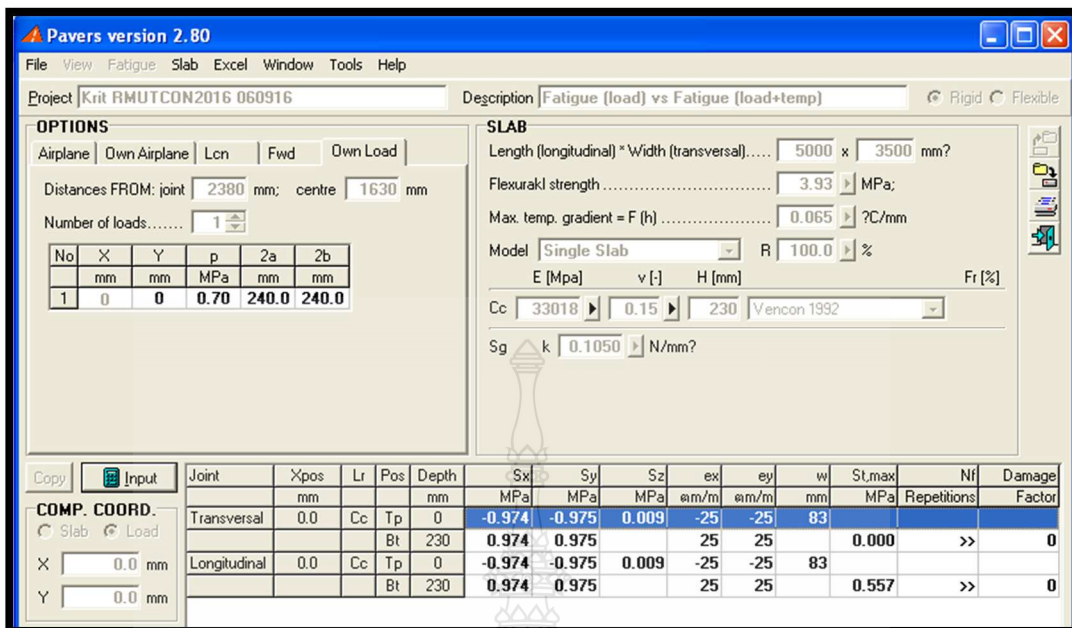
รูปที่ ข.14 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Tepfers-Kutti



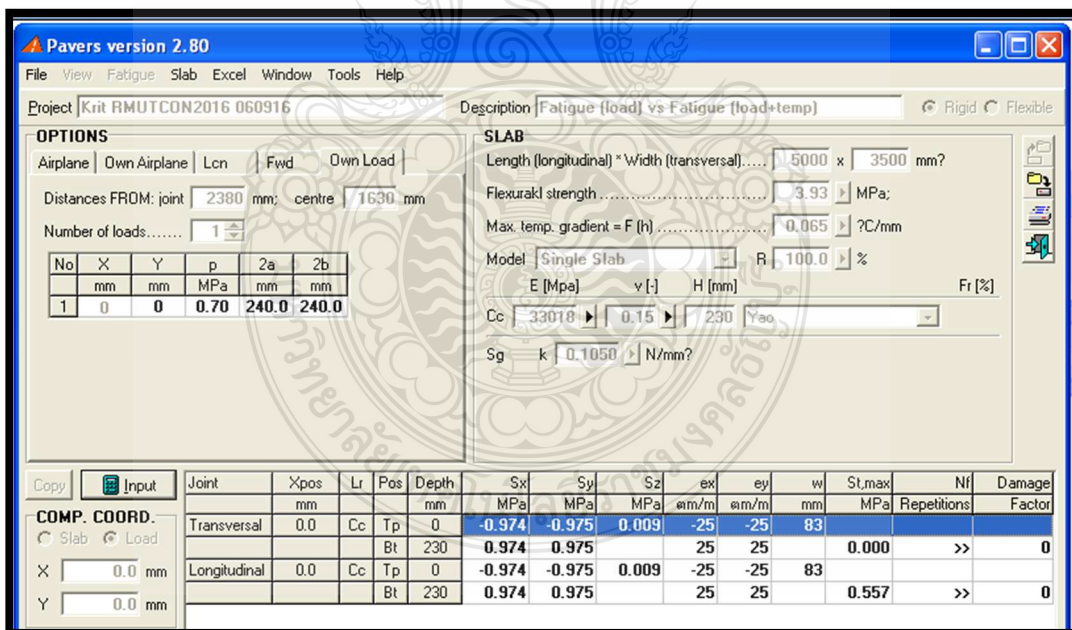
รูปที่ ข.15 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง PCA



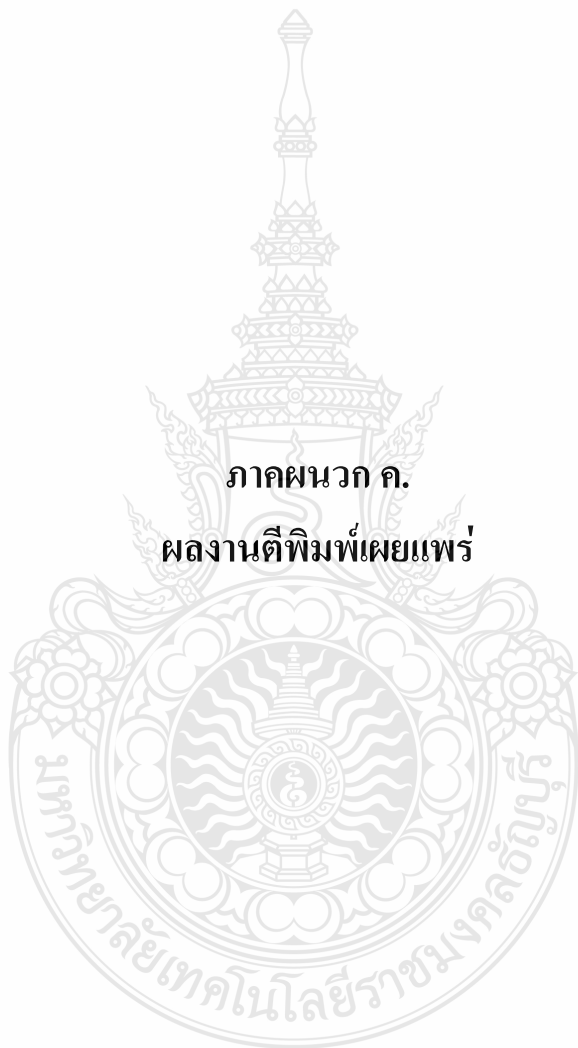
รูปที่ ข.16 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง UEC



รูปที่ ข.17 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Vencon 1992






รูปที่ ข.18 ความลาดชันอุณหภูมิเท่ากับ 0.065 °C/mm แบบจำลอง Yao



ภาคผนวก ค.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

งานประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปีครั้งที่ **11**th
Annual Concrete Conference
 17-19 กุมภาพันธ์ 2559
 ณ โรงแรมสิมารानी
 อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
 ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคณกริตประจำปี ครั้งที่ 11

ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ศ.ดร.ชัย	จาดุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ปิติ	สุคนธ์สุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศ.ดร.สุขสันต์	ห่อพิบูลย์สุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุวิมล	ลัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.สำเร็จ	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ (ศาลายา)
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บูรณัตร์	นัตร์วีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.จรรยา	เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.สรณ์กร	เหมะวิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.วีระชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.วัจน์วงศ์	กริพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร
ผศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11 (ต่อ)

ผศ.ดร.รักดีพงษ์	สหมิตรมงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.พุทธพล	ทองอินทร์ดำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิติศานต์	กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ปณัสย์ชัย	เชษฐโชติศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระชัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นอ.รศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ดร.อุบลลักษณ์	รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.อภิชาติ	คำภาหาล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา(ตาก)
ดร.สกลวรรณ	ห่านจิตสุวรรณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร.วีระศักดิ์	ละองจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วันโชค	เกรือหงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย
ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11 (ต่อ)

ดร.ยุวดี	แช่ตั้ง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร
ดร.มงคล	นามลักษณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ภักดิ์วัฒน์	แสนเจริญ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.พัชรพล	โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พงศกร	พวงชมพู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ปานเทพ	จุนิพิรุพงษ์	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.นันทวัฒน์	ชมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.นันทชัย	ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.เฉลิมชัย	วาณิชย์ลำเลิศ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.เจริญชัย	ฤทธิรุท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.จิระยุทธ	สีบสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.จักษดา	ขำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรพันธ์	วงษ์พา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.คำภี	จิตชัยภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2559	
16.40-17.55 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 1)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	
รองประธานภาค : ดร.ชนากร ภูเงินขำ	
16.40-16.55 น.	ENV-002 โฟมจีโอโพลีเมอร์จากถั่วลันเตา ประสิทธิ์ ศรีภรณ์, คำภี จิตชัยภูมิ
16.55-17.10 น.	MAT-031 ผลของการบดต่อกำลังของจีโอโพลีเมอร์มวลเบา คำภี จิตชัยภูมิ
17.10-17.25 น.	MAT-012 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวเร็ว ชนากร ภูเงินขำ, ดารกร อินทรบุตร, ราชศักดิ์ จิรัมย์, ปรีชญไชย ญาตินิยม, ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ
17.25-17.40 น.	MAT-030 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษแก้ว สังสรรค์ วงศ์ไชยรัตน์, จักรพันธ์ กาวิลละ, ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ, ชนากร ภูเงินขำ, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ปริญญา จินดาประเสริฐ
17.40-17.55 น.	MAT-047 Properties of concrete using bottom ash as a partial fine aggregate replacement material Pakawat Sancharoen, Auttapon Promsaeng, Noulanh Lathsoulin, Pitisan Krammart, Sontaya Tongaroonsri, Somnuk Tangtermsirikul

16.40-17.55 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 2)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	
รองประธานภาค : ดร.จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ	
16.40-16.55 น.	STR-001 การหาค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์สำหรับพื้นไร้คานชนิดมีแป้นหัวเสา พงศธร บุพลับ, อาทิตย์ เพชรศศิธร
16.55-17.10 น.	STR-003 การศึกษาโดยการทดสอบเสาท่อนเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสรอกคอนกรีตกำลังสูง ชนพล สว่างงาม, จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ
17.10-17.25 น.	STR-004 การจำลองพฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยแถบเมทัลชีท ศิระพล ทินิจการวัฒน์กุล, เมธี บุญพิเชษฐวงศ์, อัญญา พรรณเชษฐ์
17.25-17.40 น.	STR-005 การทดสอบเสาท่อนเหล็กหน้าตัดกลมรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูล่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน สิทธิศักดิ์ หวังรักกลาง, จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ
17.40-17.55 น.	STR-006 การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิในถนนประเภท JRPC ในประเทศไทยด้วยวิธี Eisenmann กฤษฎี เมื่อนันท์, พุทธิพล ทองอินทร์ดา

การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิในถนนประเภท JRCP ในประเทศไทยด้วยวิธี Eisenmann
Analysis of Warping Stress for Jointed Reinforced Concrete Road in Thailand using Eisenmann Method

กฤษฎี เมลืองนนท์ (Krit Maluangnont)¹

พุทธรพล ทองอินทร์ดำ (Puttapon Thongindam)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: krit_m@mail.rmutt.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: puttapon.t@en.rmutt.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยจากอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อถนนคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งพฤติกรรมการโก่งตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากความลาดชันอุณหภูมิด้านบนลงล่าง ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงเค้นดึงจากการดัดที่ผิวล่างของแผ่นคอนกรีต ในการศึกษาได้ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (0, 0.02, 0.06, 0.10, 0.14 และ 0.18 m.) ในแปลงทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตเพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิและความลาดชันอุณหภูมิ โดยเลือกใช้แบบจำลองถนนประเภท JRCP หนา 0.23 m. ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงและสมมติให้แผ่นพื้นเกิดรอยแตกกว้างตามขวางที่กึ่งกลางแผ่น ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับความลาดชันอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอากาศ ดังแสดงได้จากความสัมพันธ์เชิงพหุนามกำลังสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8297 ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นของ Eisenmann ให้ค่าหน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่สถานะวิกฤตเกินกว่าหน่วยแรงเค้นเทียบเท่ากับวิธีเชิงประสบการณ์ (PCA) ที่ใช้สำหรับเป็นค่าออกแบบผิวทางตลอดอายุการใช้งานในประเทศไทย

คำสำคัญ: ถนนคอนกรีต หน่วยแรงเค้นโก่งงอ วิธี Eisenmann

ABSTRACT : This research aims to study the effect of ambient temperature on concrete road. Curling behavior of concrete slab due to positive temperature gradient in day time cause flexural tensile stresses at the bottom of concrete slab. In the study, thermocouples were embedded at various depth (0, 0.02, 0.06, 0.10, 0.14, and 0.18 m.) of a 0.23 m. concrete slab sample. They are used for measure slab temperature and lead to calculation of temperature gradient. A jointed reinforced concrete pavement (JRCP) according to the Department of Highways (DOH) standard is used as slab model and assume that transverse crack appeared at the middle of slab. The results show that the surface temperature has a stronger relation to the temperature gradient than the air temperature. The relationship of quadratic polynomial equation indicate that the R^2 is 0.8297. While the maximum warping stress at critical point by Eisenmann method is greater than equivalent edge stress by Empirical design method (PCA) which is used for the highway pavement design in Thailand.

KEYWORDS : Concrete road, Warping stresses, Eisenmann method

1. บทนำ

ถนนคอนกรีตเป็นโครงสร้างที่มีจุดเด่นในเรื่องความแข็งแรง และคุณสมบัติในด้านการรองรับน้ำหนัก เหมาะสำหรับถนนในพื้นที่ที่มีปริมาณจราจรและสัดส่วนรถบรรทุกหนักมาก เช่น พื้นที่อุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งถนนคอนกรีตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถนนประเภทมีรอยต่อและเหล็กเสริมแรง (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP) [1] แต่ปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับถนนประเภทนี้คือรอยแตกกว้างตามแนวขวาง (transverse cracking) บริเวณกึ่งกลางแผ่นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างในเวลากลางวัน อุณหภูมิผิวบนที่สูงทำให้เกิดการขยายตัวในขณะที่ผิวล่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการหดตัวส่งผลให้แผ่นพื้นโก่งตัวขึ้น แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักที่ค่อนข้างสูง ทำให้น้ำหนักตัวแผ่นพื้นกึ่งลงตามแรงโน้มถ่วงและเกิดหน่วยแรงเค้นดึงที่ผิวล่างในที่สุด [2]

ในขณะที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร มีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งปีอยู่ที่ 27 °C และสูงสุดได้มากถึง 44.5 °C ในฤดูร้อน [3] อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงอยู่เสมอในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างผิวทาง โดยในประเทศไทยได้นำมาตรฐานการออกแบบเชิงประสบการณ์ (empirical design method) มาใช้ในการออกแบบความหนา อ้างอิงวิธีการ PCA ฉบับปี ค.ศ. 1984 ซึ่งจะพิจารณาผลจากปริมาณจราจรร่วมกับปัจจัยอื่นๆแบบโดยรวมที่มีการศึกษาวิจัยมาเป็นเวลานานในต่างประเทศ ซึ่งย่อมมีความแตกต่างจากสภาพในประเทศไทย อีกทั้งยังไม่คำนึงถึงหน่วยแรงเค้นจากการโก่งตัวเนื่องจากความลาดชันอุณหภูมิ [4] ในขณะที่หลายประเทศได้หันมาเลือกใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์และประสบการณ์ (Mechanistic-Empirical Pavement Design, MEPD) ที่อาศัยการคำนวณทางกลศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นสากล นำค่า

คอบสนองทางโครงสร้างผนวกเข้ากับข้อมูลเชิงประสบการณ์ในท้องถิ่นนั้นๆ

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญของการเก็บข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมในประเทศไทยที่มีต่อโครงสร้างผิวทางคอนกรีต โดยทำการวัดอุณหภูมิจากแปลงทดสอบตัวแทนผิวทางคอนกรีตที่สร้างขึ้นเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น และศึกษาหน่วยแรงเค้นที่เปลี่ยนไปภายใต้สภาพอากาศที่ผันผวนตลอดวันด้วยทฤษฎี Eisenmann ซึ่งเป็นทฤษฎีการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิที่มีความละเอียด สามารถแบ่งแยกพฤติกรรมหน่วยแรงเค้นอุณหภูมิในแผ่นพื้นที่สภาวะต่างๆ ได้ โดยวิธีดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับนัยะกับการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นเพื่อออกแบบความหนาถนนด้วยวิธีเชิงประสบการณ์ที่ประเทศไทยยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ความลาดชันอุณหภูมิ

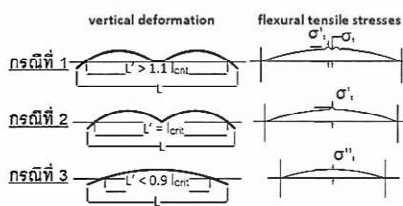
เมื่อคำนึงถึงปัจจัยจากอุณหภูมิในโครงสร้างผิวทางคอนกรีต ความลาดชันอุณหภูมิ (temperature gradient) คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างเทียบกับความหนาของแผ่นพื้น การนำความลาดชันอุณหภูมิไปใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจะเลือกช่วงที่อุณหภูมิผิวบนสูงกว่าผิวล่าง เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณจราจรที่มีปริมาณรถสูงในเวลากลางวัน ผลจากปัจจัยทั้งสองจะช่วยเสริมให้หน่วยแรงเค้นดึงที่ผิวล่างสูงมากยิ่งขึ้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 [5]

$$\Delta t = \frac{T_t - T_b}{h} \quad (1)$$

โดยที่ T_t คืออุณหภูมิผิวบนของแผ่นคอนกรีต (°C)
 T_b คืออุณหภูมิผิวล่างของแผ่นคอนกรีต (°C)
 h คือความหนาของแผ่นคอนกรีต (mm)

2.2. หน่วยแรงค้ำจากความลาดชันอุณหภูมิโดยวิธีของ Eisenmann

Eisenmann [6] ได้จำแนกพฤติกรรมของแผ่นพื้นอันเนื่องมาจากผลของความลาดชันอุณหภูมิด้านบวก (positive temperature gradient) ออกเป็น 3 กรณี ดังภาพที่ 2 โดยใช้ตัวแปรความยาวช่วงของแผ่นพื้น (slab span, L') และความยาววิกฤต (critical length, l_{crit}) เป็นเกณฑ์ในสำหรับจำแนก



ภาพที่ 2 พฤติกรรมของแผ่นพื้น โดยวิธี Eisenmann

ในการคำนวณความยาววิกฤตขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแผ่นพื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในขณะที่ความยาวช่วงของแผ่นพื้นจำเป็นต้องใช้ความยาวช่วงรองรับ (support length, C) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแผ่นพื้น, ความลาดชันอุณหภูมิด้านบวก, คุณสมบัติของวัสดุชั้นฐานรองรับ ดังสมการที่ 2, 3 และ 4

กรณีแผ่นยาว ($L/W > 1.2$ หรือ $L/W < 0.8$)

$$l_{crit} = 200h\sqrt{E\alpha\Delta T} \quad (2a)$$

กรณีแผ่นจตุรัส ($0.8 \leq L/W \leq 1.2$)

$$l_{crit} = 228h\sqrt{E\alpha\Delta T} \quad (2b)$$

$$C = 4.5\sqrt{\frac{h}{k\Delta T}} \quad (3)$$

$$L' = L - \frac{2}{3}C \quad (4)$$

โดยที่ L, W คือความยาวและความกว้างแผ่นพื้น (mm)

E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)

α คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นจากอุณหภูมิของคอนกรีต ($^{\circ}C^{-1}$)

k คือ โมดูลัสแรงต้านทานของ โครงสร้างฐานรองรับ (N/mm^3)

ν คืออัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

สมการสำหรับวิเคราะห์หน่วยแรงค้ำจากพฤติกรรมทั้งสามของ Eisenmann สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กรณีที่ 1 แผ่นคอนกรีตจะโก่งตัวขึ้น จนระยะ $L' > 1.1l_{crit}$ หน่วยแรงค้ำคั้งจะสูงสุดที่ขอบของกึ่งกลางช่วงแผ่นพื้นที่ตั้งตัวสัมผัสกับชั้นฐานรองรับส่วนหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 เท่าของหน่วยแรงค้ำที่กึ่งกลางขอบแผ่น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 และ 6

$$\sigma_t = 0.85 \frac{1}{1-\nu} \frac{h\Delta T}{2} \alpha E \quad (5)$$

$$\sigma_c' = 1.2\sigma_t \quad (6)$$

2) กรณีที่ 2 แผ่นคอนกรีตจะโก่งตัวขึ้น จนระยะ $L' = l_{crit}$ เพียงพอที่จะทำให้กึ่งกลางของแผ่นพื้นที่ตั้งตัวสัมผัสชั้นฐานรองรับพอดี ทำให้สามารถคำนวณหน่วยแรงค้ำสูงสุดได้จากสมการที่ 6 เช่นกัน

3) กรณีที่ 3 แผ่นคอนกรีตจะโก่งตัวใน ระยะ $L' < 0.9l_{crit}$ ซึ่งเป็นกรณีที่หน่วยแรงค้ำมีค่าต่ำสุด เมื่อเทียบกับสองกรณีแรก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\sigma_c'' = \left(\frac{L'}{0.9l_{crit}} \right)^2 \sigma_t \quad (7)$$

จาก 3 กรณีที่กล่าวมาคือการคำนวณหน่วยแรงค้ำที่กึ่งกลางขอบตามยาว สำหรับกรณีของขอบตามขวาง (transverse edge) ให้เปลี่ยนตัวแปรความยาวแผ่นพื้น

และความยาวช่วงแผ่นพื้นเป็นความกว้างแผ่นพื้นและความกว้างช่วงแผ่นพื้น (W, W')

2.3. การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นด้วยวิธีของ PCA

วิธีของ PCA ฉบับปี ค.ศ. 1984 [4] ถูกพัฒนาขึ้นจากการศึกษาที่หลากหลายเช่น การศึกษาพฤติกรรมแผ่นพื้นของ Westergaard, Influence Chart ของ Picklet และ Ray, การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การทดสอบ Full scale ที่ Arlington เป็นต้น โดยมีปัจจัยที่จำเป็นต่อการออกแบบได้แก่ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบในสนามของวัสดุคอนกรีต (ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน) และดินที่รองรับถนน (การทดสอบด้วยวิธี Plate bearing หรือผลการทดสอบ CBR) การคาดการณ์ข้อมูลปริมาณจราจรในปีที่ออกแบบ, สัดส่วนการกระจายน้ำหนักบรรทุกลงเพลานบนพื้นที่ของถนนที่ออกแบบ และการกำหนดอายุการใช้งานของถนน

โดยกระบวนการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากน้ำหนักเพลาดียวหรือเพลากู่จะแยกเป็นการวิเคราะห์ความล้า (fatigue analysis) ที่พิจารณาเฉพาะไหล่ทางคอนกรีตเท่านั้น และการวิเคราะห์การสึกกร่อน (erosion analysis) ที่คำนึงถึงชนิดของระบบถ่ายน้ำหนักที่เลือกใช้เพิ่มเข้ามา ซึ่งการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตจะถูกควบคุมในการวิเคราะห์ความล้าที่หน่วยแรงเค้นวิกฤติ โดย PCA กำหนดให้ตำแหน่งน้ำหนักเพลาวางขนานด้านกว้างและอยู่ที่กึ่งกลางด้านยาวชิดกับขอบนอกขอบแผ่นคอนกรีต ค่าหน่วยแรงเค้นที่ได้จะถูกนำมาไปหาอัตราส่วนหน่วยแรงเค้น (stress ratio) และนำไปคำนวณหาจำนวนเที่ยวบรรทุกที่เกิดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเที่ยวบรรทุกที่ยอมรับได้ซึ่งได้จากสมการความล้าเชิงประสบการณ์

2.4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบได้มีการวิจัยในต่างประเทศอย่างยาวนาน ในรัฐฟลอริดา ของ

สหรัฐอเมริกา Choubane และ Tia [7] ได้ทำการเก็บข้อมูลจากแปลงทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตในปี ค.ศ. 1995 โดยใช้สายวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ฟิงเข้าไปในแผ่นคอนกรีตขนาด 6.1x3.7x0.23 m. ที่ตำแหน่งต่างๆวัดจากผิวบนสุดลงไปเป็นระยะ 2.54, 16.1, 11.4, 16.5 และ 20 cm. และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEACONS IV ที่สามารถวิเคราะห์ผลรวมของหน่วยแรงเค้นจากน้ำหนักปริมาณจราจรและความลาดชันอุณหภูมิ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความลาดชันอุณหภูมิแบบเชิงเส้น เทียบกับการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าในเวลากลางวันที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างเท่ากับ 17 °C มีค่าหน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิแบบเชิงเส้นสูงกว่า และมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zhang และคณะ [8] ที่ได้ผลการวิเคราะห์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในปี ค.ศ. 2003 โดยเลือกวิเคราะห์เพียงแก่ผลจากอุณหภูมิเท่านั้น และในปีเดียวกัน Siddique และคณะ [9] ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของแผ่นพื้นจากการวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งตลอดเวลาด้วยเครื่อง Extensometer พบว่าในช่วงเวลาที่มีความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุด (15.00 น.) จะวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้สูงที่สุด ซึ่งในประเทศไทยได้มีการทดสอบผิวทางคอนกรีตด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยชยธันว์และคณะ [1] ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในผิวทางทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าแปรค่าต่างๆเช่น ค่าการทรุดตัวของผิวทาง ค่าโมดูลัสชั้นทาง เป็นต้น ได้ข้อสรุปว่าในการทดสอบผิวทางด้วยเครื่อง FWD ควรทำการทดสอบช่วงเช้าไม่เกินเวลาเที่ยงวันซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นพื้นมีการโก่งตัวไม่มากนัก (ค่าความลาดชันอุณหภูมิไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป) เพื่อลดปัจจัยจากการโก่งตัวที่มีผลต่อตัวแปรต่างๆที่ได้ทำการศึกษา

ในปี ค.ศ. 2011 Beisbe และ คณะ [10] ได้ทำการศึกษาหน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิใน

ถนนคอนกรีตที่ปูผิวด้วยพอร์สแอสฟัลต์ (porous asphalt) เปรียบเทียบกับถนนคอนกรีตที่ไม่เสริมผิวทางใดๆ พบว่าถนนที่ปูด้วยพอร์สแอสฟัลต์ช่วยลดหน่วยแรงตื้นจากความลาดชันอุณหภูมิ รวมถึงความผันผวนของอุณหภูมิในผิวทาง ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Yoonseok และ Hak-Chul Shin [11] ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิพื้นผิว โดยผลที่ได้พบว่าในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังสมการที่ 8 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 0.795 นอกจากนี้ยังได้แสดงความสัมพันธ์ของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (temperature differential, ΔT) กับอุณหภูมิพื้นผิวได้ดังสมการที่ 9

$$T_{Surface} = 0.099T_{Air}^2 - 3.45T_{Air} + 54.793 \quad (8)$$

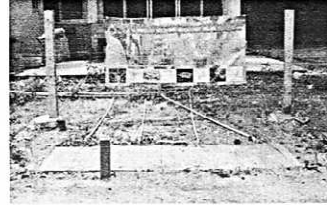
$$\Delta T = 0.018T_{Surface}^2 - 0.584T_{Surface} + 2.732 \quad (9)$$

3. วิธีการดำเนินงาน

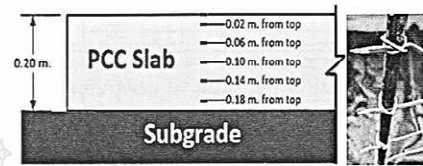
3.1. ข้อมูลแปลงทดสอบ

แปลงทดสอบสำหรับวัดอุณหภูมิผิวทางได้สร้างขึ้นภายในพื้นที่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ภาพที่ 3) โดยใช้แผ่นคอนกรีตที่มีกำลังอัด (f_c') เท่ากับ 280 ksc ออกแบบตามวิธีของ ACI [12] แผ่นพื้นจตุรัสขนาด 0.5 x 0.5 m. และมีความหนา 0.2 m. ที่ผิวล่างระหว่างชั้นฐานรองรับกับแผ่นคอนกรีตได้ใช้แผ่นพลาสติกปูพื้นผิวก่อนทำการเทคอนกรีต เพื่อป้องกันผลกระทบจากความชื้นที่มีผลต่ออุณหภูมิคอนกรีต

การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิได้ทำการติดตั้งที่ตำแหน่งผิวบนของแผ่นคอนกรีต, 0.02, 0.06, 0.10, 0.14 และ 0.18 m. (ภาพที่ 4) นอกจากนี้ยังได้ทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศด้วย



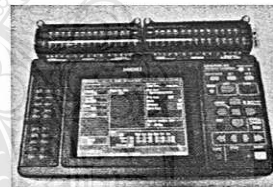
ภาพที่ 3 แปลงทดสอบ



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ

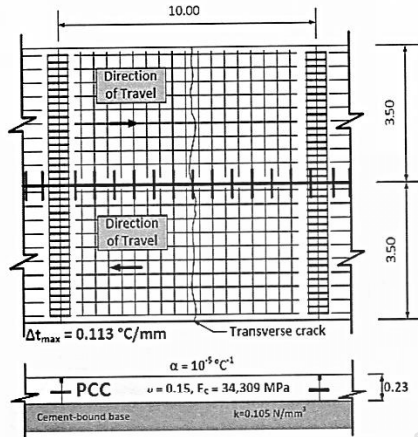
3.2. การเก็บข้อมูลและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้จากแปลงทดสอบ จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger) รุ่น HIOKI LR 8400-20 (ภาพที่ 5) เพื่อทำการบันทึกข้อมูลสำหรับการนำไปวิเคราะห์ โดยเลือกทำการเก็บข้อมูลด้วยความถี่ 1 ชั่วโมง แบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 5 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

ผู้วิจัยได้เลือกถนนประเภท JRCP สองช่องจราจรตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงมาใช้ในการศึกษา [13] โดยสมมติให้แผ่นพื้นเกิดรอยแตกกว้างตามขวางที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นดังภาพที่ 6 ระยะความยาวของแผ่นที่ใช้คำนวณคิดจากรอยต่อตามขวางถึงรอยร้าวตามแนวขวาง ความกว้างแผ่นพื้น 3.5 m. และความหนา 0.23 m. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นกับอุณหภูมิคอนกรีต ซึ่งอิงผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [14]



ภาพที่ 6 แบบจำลองถนน JRCP

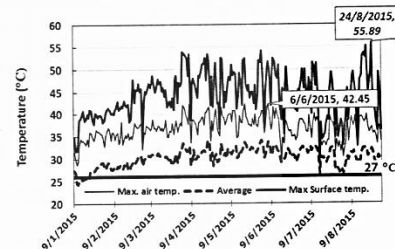
ทำการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิ ทุกช่วงความลาดชันอุณหภูมิด้านบวจนถึงค่าสูงสุดที่บันทึกได้ และวิเคราะห์ด้วยวิธีของ PCA ฉบับปี ค.ศ. 1984 ภายใต้ความหนาของแบบจำลองที่กำหนด และวิเคราะห์ในกรณีไม่มีไหลทางคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงเค้นเทียบเท่าที่กึ่งกลางขอบตามขวางมากที่สุด

4. ผลการวิเคราะห์

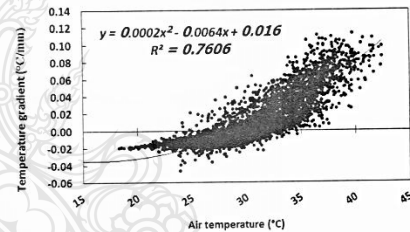
4.1. สภาพอากาศและข้อมูลอุณหภูมิจากแปลงทดสอบ

จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความผันผวนของอุณหภูมิที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งปี 27 °C [3] มีอุณหภูมิอากาศสูงสุดในเดือนมิถุนายนเท่ากับ 42.45 °C ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวสูงสุดมากกว่าอุณหภูมิอากาศถึง 13 °C ปรากฏในปลายเดือนสิงหาคม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความลาดชันอุณหภูมิตกับอุณหภูมิอากาศและพื้นผิว (ภาพที่ 8 และ 9) จะเห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับความลาดชันอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอากาศ จากสมการพหุนามกำลังสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8297 จึงแสดงให้เห็นแนวทางที่ค่อนข้างชัดเจนว่าอุณหภูมิพื้นผิว

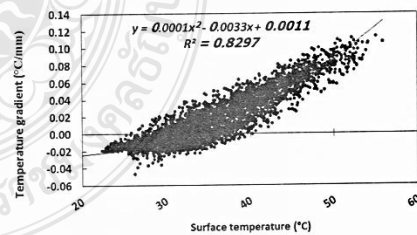
เหมาะสมในการใช้เป็นตัวแปรสำหรับคาดการณ์ค่าความลาดชันอุณหภูมิของแผ่นคอนกรีตมากกว่าอุณหภูมิอากาศ นอกจากนั้นพบว่าความลาดชันอุณหภูมิด้านบวเกิดขึ้นร้อยละ 43 ในขณะที่ร้อยละ 57 แสดงค่าความลาดชันอุณหภูมิด้านลบทั้งหมด โดยพบว่าความลาดชันอุณหภูมิตสูงสุดเกิดขึ้นในวันที่ 20 สิงหาคม มีค่าเท่ากับ 0.113 °C/mm



ภาพที่ 7 อุณหภูมิอากาศและพื้นผิวที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบ



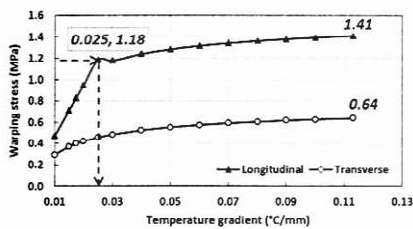
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศและความลาดชันอุณหภูมิ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและความลาดชันอุณหภูมิ

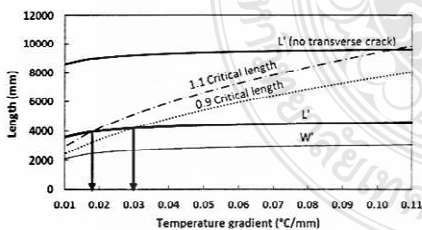
4.2. ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองถนน JRCP

วิธีของ Eisenmann แสดงแนวโน้มของหน่วยแรงเค้นดิ่งภาพที่ 10 พบว่าหน่วยแรงเค้นที่กึ่งกลางขอบตามยาวสูงสุดได้ถึง 1.41 MPa ในขณะที่ในแนวขวางเกิดขึ้นเพียง 0.64 MPa



ภาพที่ 10 หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิ

ที่ตำแหน่งกึ่งกลางขอบตามขวางในช่วงแรกพบว่าหน่วยแรงเค้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของพฤติกรรมการโก่งตัวตามกรณีที่ 1 และ 2 การเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจะเปลี่ยนไปเป็นไปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (กรณีที่ 3) เมื่อความลาดชันอุณหภูมิเข้าใกล้ 0.030 °C/mm ดังภาพที่ 11 ในทางตรงข้าม หากว่าแบบจำลองไม่เกิดรอยแตกตามขวางที่กึ่งกลางแผ่น จะส่งผลให้แผ่นพื้นมีพฤติกรรมโก่งตัวในกรณีที่ 1 ทำให้หน่วยแรงเค้นที่กึ่งกลางขอบมากยิ่งขึ้นแบบเชิงเส้น และสร้างความเสียหายให้เกิดรอยแตกเร็วตามมาได้



ภาพที่ 11 ช่วงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของแผ่นพื้น

4.3. หน่วยแรงเค้นที่ได้จากวิธีเชิงประจักษ์

เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองในภาพที่ 6 ด้วยวิธี PCA กรณีไม่มีไหลทางคอนกรีต ทำให้ได้ค่าหน่วยแรงเค้นที่

กลางขอบแผ่นจากน้ำหนักเพลาดียวเท่ากับ 1.24 MPa ซึ่งต้องย้ำว่าค่าดังกล่าวเป็นผลจากน้ำหนักบรรทุกแบบเพลาดียวกระทำกับถนน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเค้นจากอุณหภูมิสูงสุด 1.41 MPa เล็กน้อย ผลวิเคราะห์ที่ได้นี้ซึ่งประเด็นสำคัญ คือ ความลาดชันอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวสามารถส่งผลให้เกิดหน่วยแรงเค้นได้ในปริมาณใกล้เคียงกับหน่วยแรงเค้นจากน้ำหนักบรรทุก และในสภาวะวิกฤตที่ความลาดชันอุณหภูมิเป็นบวกสูงสุด หน่วยแรงเค้นอุณหภูมิจึงมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงเค้นจากน้ำหนักบรรทุก ได้ดังเช่นผลการศึกษานี้ที่แสดงนี้

5. สรุป

ข้อมูลอุณหภูมิผิวทางและอุณหภูมิอากาศจากแปลงทดสอบในสนามแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผิวบนของคอนกรีตที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิอากาศ ไม่ได้แสดงค่าสูงสุดในวันและเวลาเดียวกัน เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ร่มเงาจากเมฆ, ลม เป็นต้น และยังพบว่าอุณหภูมิจากผิวบนของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับความลาดชันอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอากาศ แสดงได้จากความสัมพันธ์เชิงพหุนามกำลังสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8927 โดยจากข้อมูลทั้งหมดแสดงความลาดชันอุณหภูมิด้านบวกอยู่ที่ร้อยละ 43

ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบโครงสร้างผิวทางปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ซึ่งเมื่อแผ่นพื้นคอนกรีตภายใต้สภาวะความลาดชันอุณหภูมิจึงวิกฤตคือน้ำหนักบรรทุก จะทำให้เกิดหน่วยแรงเค้นสูงชันมากและอาจมากกว่า 2 เท่าตัวได้ในหลายกรณี ดังนั้นการออกแบบถนนทางหลวงด้วยวิธีเชิงประจักษ์ PCA โดยไม่มีการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิจึงครบถ้วนย่อมเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายกับผิวทางปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตได้โดยง่าย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTRE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการสร้างแปลงทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตและวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นตลอดการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชยรัตน์ พรหมสร, ธนศักดิ์ ไผ่กระโทก, เลิศ พัดฉวี และพรชัย ศิลารัมย์, 2546. การประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ในประเทศไทย. รายงานฉบับที่ ว.พ. 206.
- [2] Yang H. Huang, 2004. Pavement Analysis and Design. Second Edition. Printing location: United States of America.
- [3] กรมอุตุนิยมวิทยา, ภูมิอากาศของประเทศไทย. <URL:http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>
- [4] Robert G. Packard, 1984. Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. Portland Cement Association.
- [5] Houben L. J. M., 2009. Structural Design of Pavements: Part IV Design of Concrete Pavements. Delft University of Technology. Netherland.
- [6] Eisenmann J., 1979. Concrete Pavements - Design and Construction (in German). Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin/Munich/Düsseldorf.
- [7] B. Choubane and M. Tia, 1995. Analysis and Verification of Thermal Gradient Effects on Concrete Pavement. Journal of Transportation Engineering. Vol. 121, No. 1, pp. 75-81.
- [8] J. Zhang, T. F. Fwa, K. H. Tan and X. P. Shi, 2003. Model for Nonlinear Thermal Effect on Pavement Warping Stresses. Journal of Transportation Engineering. Vol. 129, No. 6, pp. 695-702.
- [9] Zahidul Q. Siddique , Mustaque Hossain and Dave Meggers, 2005. Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement. Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames. Iowa.
- [10] M. Belshe, M. S. Mamlouk, K. E. Kaloush, and M. Rodezno, 2011. Temperature Gradient and Curling Stresses in Concrete Pavement with and without Open-Graded Friction Course. Journal of Transportation Engineering. Vol. 137, No. 10, pp.723-729.
- [11] Yoonseok Chung and Alex Hak-Chul Shin, 2015. Local Calibration of EICM Using Measured Temperature Gradients and Numerical Analysis. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 8, No.4, pp. 259-266.
- [12] American Society for Testing and Materials, 2000. ACI 318M-95:Building Code Requirements for Structural Concrete.
- [13] Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994. Standard Drawings for Highway Construction.
- [14] ประกาศ ทอ.ประ.ไฟ และ พุท.พ.ท. ทอ.อิน.ทร.ดำ, 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางแบบแกร่งภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายกฤษฎี เมื่อนันท
วัน เดือน ปีเกิด	13 สิงหาคม 2534
ที่อยู่	69/61 ถนน หทัยราษฎร์ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ 10510
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัยและวิศวกรประจำหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและ ท่าอากาศยาน (Road & Airfield Pavement Technology Research Unit) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 ถึง ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-3711-6602
อีเมล	krit_m@mail.rmutt.ac.th, krityonex@gmail.com

