

การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต  
ด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง

**THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT OF VOID DEPTH  
UNDER CONCRETE PAVEMENT USING REAL TRAFFIC LOADS**

พรชัย จิตตะสุชีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต  
ด้วยน้ำหนักบรรทุกจรจริง


พรชัย จิตตะสุชีกุล

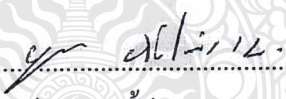
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต  
ด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง  
The Development of Measurement of Void Depth under Concrete  
Pavement Using Real Traffic Loads  
ชื่อ - นามสกุล      นายพรชัย จิตตะสุชีกุล  
สาขาวิชา      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธรพล ทองอินทร์คำ, Dr.-Ing.  
ปีการศึกษา      2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์วัชระ สัตยาประเสริฐ, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ค.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธรพล ทองอินทร์คำ, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 29 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความถี่ของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง
ชื่อ – นามสกุล	นายพรชัย จิตตะสุชีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทพล ทองอินทร์คำ, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2558

## บทคัดย่อ

โพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายและส่งผลต่ออายุการใช้งาน การประเมินหาความถี่โพรงสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการยุบตัวของผิวทาง แต่เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวมาตรฐาน เช่น เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (FWD) เป็นต้น มีราคาค่อนข้างสูง

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบความถี่ของโพรง โดยประยุกต์ใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา (port-LTE) ที่พัฒนาขึ้นโดยพุทพล ทองอินทร์คำ กับการใช้รถบรรทุกด้วยรูปแบบสถิตและแบบเคลื่อนที่ วัดค่าการยุบตัวและตรวจสอบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับ โพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากเครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเบา (LWD)

ผลทดสอบพบว่า เครื่อง port-LTE สามารถนำมาใช้ประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้ โดยกรณีน้ำหนักแบบสถิตพบว่า ได้ผลทดสอบที่สอดคล้องกับเครื่อง LWD เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (VLCDA method) ส่วนกรณีน้ำหนักแบบเคลื่อนที่พบว่า ความเร็วของการเคลื่อนที่มีผลต่อการตอบสนองของแผ่นพื้น โดยความเร็วที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินหาโพรงร่วมกับเครื่อง port-LTE คือ ประมาณ 2.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**คำสำคัญ:** ผิวทางคอนกรีต โพรง เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา

<b>Thesis Title</b>	The Development of Measurement of Void Depth under Concrete Pavement Using Real Traffic Loads
<b>Name - Surname</b>	Mr. Pornchai Jittasukhegul
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Puttapon Thongindam, Dr.-Ing.
<b>Academic Years</b>	2015

## ABSTRACT

Void depth under concrete pavement is a major cause of pavement distress and consequently affects its lifetime. Void depth can be analyzed from surface deflections of concrete slabs. However, the deflection measurement equipment, such as Falling Weight Deflectometer (FWD), is quite expensive.

Therefore, this research aimed to develop a method for evaluation of void depth using real traffic loads. Trucks loaded in static and dynamic modes were imparted to surface of concrete slabs. The surface deflections and their behavior were measured by a Portable Load Transfer Efficiency Detector (port-LTE), which was invented by Puttapon Thongindam. Relations between void depth and truck movement were introduced and compared to the results obtained from Lightweight Deflectometer (LWD).

The results revealed that port-LTE was capable of measuring void depth under concrete slabs. By using the Variable Load Corner Deflection Analysis (VLCDA method), the results from static case are in agreement with those from LWD. For the dynamic case, it was found that the most appropriate truck speed in combination with port-LTE for void depth detection was about 2.5 kilometers per hour.

**Keywords:** concrete pavement, void, portable load transfer efficiency detector (port-LTE)

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พุทธพล ทองอินทร์ดำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม กรรมการสอบ และ ดร. วัชร สัตยาประเสริฐ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องด้วยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “เครื่องมือต้นแบบตรวจสอบความลึกโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต” ซึ่งมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์ดำ เป็นหัวหน้าโครงการฯ ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่อนุมัติทุนสนับสนุนทุนวิจัยโครงการดังกล่าว

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสนามที่ทำการทดสอบและทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTR) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา (port-LTE) และซอฟต์แวร์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ตลอดจนสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการความรู้มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บุคลากร สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณและมอบความดีทั้งหมดให้แก่บิดา มารดา พี่สาว น้องชาย มิตรสหาย และคณะอาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้จนสามารถดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจ หากวิจัยฉบับนี้ขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

พรชัย จิตตะสุจีกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	15
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	16
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ผิวทางคอนกรีต (Concrete Pavement).....	17
2.2 โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต (Void under Concrete Pavement).....	23
2.3 เครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเบา (Lightweight Deflectometer, LWD).....	33
2.4 เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา.....	
(Portable Load Transfer Efficiency Detector, port-LTE).....	34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	48
3.2 การพัฒนาเครื่อง port-LTE.....	49
3.3 ขั้นตอนการทดสอบหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต.....	50
3.4 แนวทางการวิเคราะห์และประมวลผล.....	58

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และวิจัย.....	59
4.1 ผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีต.....	59
4.2 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE.....	64
4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดค่าการยุบตัวของเครื่อง port-LTE.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำการทดสอบ.....	80
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE.....	84
ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์หาโพรงจากผลทดสอบของเครื่อง LWD.....	105
และเครื่อง port-LTE.....	
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	131
ประวัติผู้เขียน.....	148



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปผลการศึกษาของ M.C. Hironaka และคณะ.....	39
ตารางที่ 2.2 สรุปผลการทดลองของ Julie Marie Vandebossche.....	42
ตารางที่ 2.3 คะแนนและเกณฑ์การประเมินความสามารถของเครื่องมือต่างๆ.....	44
ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การประเมินโพรงจากค่าการขุ่นตัวที่กึ่งกลางแผ่นคอนกรีต.....	46
ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การพิจารณาสภาพรอยต่อของผิวทางคอนกรีตของ Mathavan และคณะ...	47
ตารางที่ 3.1 แผนของการดำเนินงานวิจัย.....	48
ตารางที่ 4.1 ผลวัดค่าการขุ่นตัวด้วยเครื่อง LWD ที่แผ่นพื้นคอนกรีต C1 ถึง C10.....	60
ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินหาโพรงและพิจารณาความสอดคล้องของเครื่อง LWD..... และเครื่อง port-LTE จากการทดสอบที่รอยต่อ V1 ถึง V5.....	68



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ความเสียหายที่เกิดจาก โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต.....	13
รูปที่ 2.1 การกระจายน้ำหนักและ โครงสร้างของผิวทางคอนกรีต.....	17
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผิวทางคอนกรีตแบบมาตรฐานสองช่องจราจรในประเทศไทย.....	18
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท JPCP.....	19
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท JRCP.....	19
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท CRCP.....	20
รูปที่ 2.6 รอยต่อของผิวทางคอนกรีต.....	21
รูปที่ 2.7 เหล็กเสริมของผิวทางคอนกรีต.....	22
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา.....	24
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการอัดตัวคายน้ำของดิน.....	24
รูปที่ 2.10 ผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นต่อแผ่นพื้นคอนกรีต.....	25
รูปที่ 2.11 ผลกระทบจากการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต.....	25
รูปที่ 2.12 ผลวิเคราะห์ค่าการยุบตัวจากสมการของ Westergaard.....	26
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LTE กับค่า Faulting.....	27
รูปที่ 2.14 การเกิด โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต.....	28
รูปที่ 2.15 ความเสียหายที่สัมพันธ์กับการเกิด โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต.....	29
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องมือ GPR และ FWD.....	30
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่ายุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต.....	31
รูปที่ 2.18 การติดตั้งอุปกรณ์และวิเคราะห์ผลตามวิธี CTR method.....	32
รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ของเครื่องมือ LWD.....	33
รูปที่ 2.20 แผนผังการทำงานของเครื่อง LWD .....	34
รูปที่ 2.21 อุปกรณ์และชุด โครงของเครื่อง port-LTE.....	36
รูปที่ 2.22 หลักการตรวจวัดของเครื่อง port-LTE .....	37
รูปที่ 2.23 แผนผังและข้อมูลจำเพาะของเครื่อง port-LTE.....	37
รูปที่ 2.24 การทำงานของเครื่อง port-LTE บนหน้าจอบนคอมพิวเตอร์.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 การทำงานของโปรแกรม Raptre Vibration Analysis.....	38
รูปที่ 2.26 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม RMODS.....	41
รูปที่ 2.27 ผลการตรวจวัดก่อนและหลังทำการอุดซ่อมโพรง.....	43
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างคู่มือการประเมินโพรงของกรมทางหลวงปี 2009 .....	45
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนน้ำหนักกับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต.....	46
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างแผนภาพจากการวิเคราะห์ห้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	47
รูปที่ 3.1 โครงของเครื่อง port-LTE.....	49
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำการทดสอบ.....	50
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนและการทดสอบภาคสนามด้วยเครื่อง LWD.....	51
รูปที่ 3.4 รถบรรทุกสำหรับทดสอบ.....	52
รูปที่ 3.5 เตรียมอุปกรณ์และติดตั้งเครื่อง port-LTE.....	53
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว.....	53
รูปที่ 3.7 วัดระดับของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวด้วยไม้ระดับน้ำ.....	54
รูปที่ 3.8 การตั้งค่าโปรแกรมควบคุม DC-7204.....	54
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของการหยุดรถบรรทุก.....	55
รูปที่ 3.10 การจัดรถบรรทุกและการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกแบบน้ำหนักสถิต.....	56
รูปที่ 3.11 การจัดรถบรรทุกและการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกแบบน้ำหนักเคลื่อนที่.....	57
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาโพรงด้วย VLCD method.....	58
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE.....	61
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE ที่ผิดปกติ.....	62
รูปที่ 4.3 ผลทดสอบที่ผิดปกติจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่.....	
ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการประเมินหาโพรงจากผลทดสอบของเครื่อง LWD.....	
และเครื่อง port-LTE.....	64
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD เทียบกับ port-LTE แบบน้ำหนักสถิต.....	66
รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD เทียบกับ port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่.....	67
รูปที่ 4.7 วิเคราะห์จุดตัดแกนค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่.....	69



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการสัญจรทางบกของประเทศไทยถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก จากข้อมูลทางสถิติของกรมการขนส่งทางบกในปี ค.ศ. 2013 ประชากรในประเทศใช้การสัญจรทางบกเพื่อการเดินทางและขนส่งสินค้ามากกว่าร้อยละ 80 ของการเดินทางทั้งหมด [1] เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อมูลการจดทะเบียนรถยนต์สะสมเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน ค.ศ. 2014 มีจำนวนทั้งสิ้น 35,352,660 คัน พบว่าเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2013 คิดเป็นร้อยละ 2.10 [2] และยังคงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต ดังนั้นภาครัฐจึงได้มีนโยบายพัฒนาโครงสร้างถนนเป็น 4 ช่องจราจร เพื่อตอบสนองต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศผนวกกับการเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนในปี ค.ศ. 2015 แต่จากรายงานประจำปี ค.ศ. 2013 ถึง 2014 ของ World Economic Forum [3] ได้ประเมินดัชนีความสามารถในการแข่งขันของแต่ละประเทศไว้ ซึ่งประเทศไทยถูกจัดให้อยู่ในอันดับ 37 จาก 148 ประเทศ โดยเพิ่มขึ้น 1 อันดับจากการจัดอันดับประจำปี ค.ศ. 2012 ถึง 2013 และเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีความสามารถในการแข่งขันรวมของไทยกับประเทศในประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนแล้ว ประเทศไทยยังมีความสามารถต่ำกว่าประเทศมาเลเซีย ประเทศสิงคโปร์ และประเทศบรูไนดารุสซาลาม โดยหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการแข่งขันรวมของประเทศไทยต่ำกว่าประเทศเหล่านี้มาจากปัญหาโครงสร้างทางด้านคมนาคมของประเทศ

หนึ่งในโครงสร้างคมนาคมที่สำคัญของประเทศ คือ โครงข่ายผิวทาง ในปี ค.ศ. 2012 ประเทศไทยมีระยะทางของโครงข่ายผิวทางรวมทั้งสิ้น 469,016.56 กิโลเมตรต่อสองช่องจราจร แบ่งเป็นผิวทางประเภทคอนกรีตและลาดยาง 315,664.55 กิโลเมตร [4] จากรายงานประจำปี ค.ศ. 2013 ของกรมทางหลวงพบว่า มีทางหลวงอยู่ในความรับผิดชอบทั้งสิ้น 68,253 กิโลเมตรต่อสองช่องจราจร ซึ่งเป็นผิวทางคอนกรีตและลาดยาง 67,267 กิโลเมตร และเป็นทางหลวงที่ต้องได้รับการบำรุงซ่อมแซมมากกว่าร้อยละ 90 ของทางหลวงที่อยู่ในความรับผิดชอบ [5] โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผิวทาง มาจากสภาพการใช้งานและสภาพแวดล้อม ยกตัวอย่างความเสียหาย

ที่เกิดขึ้นเกิดจากสภาพแวดล้อม เช่น ความเสียหายจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ การทรุดตัวของดิน ความเสียหายที่เกิดจากอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนความเสียหายที่เกิดจากสภาพการใช้งาน เช่น ความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุกทุกเกินพิกัด เป็นต้น ส่งผลให้กรมทางหลวงต้องใช้งบประมาณเพื่อซ่อมแซมสูงถึง 20,498.20 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 38.32 จากงบประมาณของกรมทางหลวงในปี ค.ศ. 2013 [6] และยังคงคิดเป็นร้อยละ 0.93 จากงบประมาณประเทศในปี ค.ศ. 2014 (2,525,000 ล้านบาท) [7]

ผิวทางคอนกรีตส่วนใหญ่ของกรมทางหลวงเป็นผิวทางคอนกรีตประเภทรอยต่อมีการเสริมเหล็ก (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP) จากการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผิวทางคอนกรีตพบว่า หนึ่งในปัญหาสำคัญที่ทำให้ผิวทางคอนกรีตเสียหายมาจากการเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต สาเหตุของการเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตที่พบมากที่สุด คือ การสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้าง (Pumping Action) ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำไหลซึมผ่านบริเวณรอยต่อและรอยแตกของแผ่นพื้นคอนกรีต เมื่อมียานพาหนะสัญจรผ่านในบริเวณที่มีโพรงเกิดขึ้น จะส่งผลให้โครงสร้างผิวทางคอนกรีตเกิดการทรุดตัวและเกิดการแตกร้าวขึ้นดังรูปที่ 1.1 โดยความเสียหายจะเกิดบริเวณรอยต่อของผิวทางคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ ทำให้สภาพของผิวทางคอนกรีตไม่สามารถรองรับการจราจรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 ความเสียหายที่เกิดจากโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต [8]

เนื่องจากโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตไม่สามารถประเมินได้อย่างแม่นยำด้วยตาเปล่า อีกทั้งไม่สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดโพรงขึ้นได้อย่างแน่ชัด ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือและวิธีตรวจหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เพื่อทำการประเมินหาโพรงก่อนที่จะเกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง โดยเครื่องมือที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่ เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เป็นเครื่องมือที่อาศัยการกระแทกของก้อนน้ำหนักเพื่อจำลองน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้าง แล้วจึงวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นกับผิวทาง เครื่องธรณีเรดาร์ (Ground Penetrating Radar, GPR) เป็นเครื่องที่ทำงานด้วยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปได้ดิน เมื่อสัญญาณที่ส่งออกไปถูกสะท้อนกลับมา เครื่องมือจะแปลงค่าสัญญาณคลื่นเป็นสัญญาณภาพ และเครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเล็ก (Lightweight Deflectometer, LWD) เป็นต้น แต่เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าว เป็นเครื่องมือที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและเป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างสูง [9] ทำให้ไม่สามารถจัดหาเครื่องมือดังกล่าวให้เพียงพอกับจำนวนหน่วยงานของภาครัฐที่ต้องรับผิดชอบด้านงานทาง อีกทั้งวิธีการที่ใช้เพื่อประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตก็ยังไม่สามารถตรวจหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งยังคงเป็นปัญหาที่ท้าทายต่อความสามารถของวิศวกรผิวทางในปัจจุบัน

ในปี ค.ศ. 2014 พุทธพล [10] จากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTRE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้สังเกตเห็นถึงปัญหาการประเมินสภาพของผิวทางคอนกรีต และทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) สำหรับประเมินค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตสองแผ่นที่อยู่ติดกัน (Load Transfer Efficiency, LTE) ที่มีชื่อว่า เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา (Portable Load Transfer Efficiency Detector, port-LTE) ซึ่งได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวแบบทันที (Real-time Displacement Transducer) สำหรับวัดค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตขณะมียานพาหนะเคลื่อนผ่าน โดยค่าการยุบตัวระหว่างแผ่นพื้นที่ตรวจวัดได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Raptre Vibration Analysis เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นและแสดงผลทันทีในสนามทั้งด้านแผ่นพื้นขาเข้า (Approach Slab) และแผ่นพื้นขาออก (Leave Slab)

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของโพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นของ ผิวทางคอนกรีตชนิดที่มีรอยต่อตามขวาง ซึ่งจะเป็นการมุ่งขยายขีดความสามารถของเครื่อง port-LTE ที่แต่เดิมใช้สำหรับประเมินค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตเท่านั้น โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้เมื่อนำเครื่อง port-LTE และการใช้น้ำหนักของรถบรรทุกจริงมาทดสอบ เพื่อการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต และพัฒนาวิธีการใช้งานเครื่อง port-LTE ให้สอดคล้องกับการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต อีกทั้งในอนาคตหากการศึกษาในครั้งนี้สามารถประเมินหา โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้ดี จะทำการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับการประเมินหาขนาดหรือปริมาตรของ โพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกจริง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตกับโพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีต
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง port-LTE เมื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ทำการทดสอบกับผิวทางคอนกรีตที่ก่อสร้างตามมาตรฐานในประเทศไทย
- 1.3.2 ทำการทดสอบในสนามด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing)
- 1.3.3 ทำการศึกษาเฉพาะรอยต่อตามขวาง (Transverse Joint) ของผิวทางคอนกรีตและ ในบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตเท่านั้น
- 1.3.4 ทำการศึกษาผลลัพธ์จากวิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นคอนกรีตด้วย น้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (Variable Load Corner Deflection Analysis) และไม่พิจารณาผลกระทบ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความชื้นภายในสนามทดสอบ



## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมเอกสารงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต รวมไปถึงเครื่องมือที่มีการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจหาโพรง

1.4.2 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลของผิวทางคอนกรีตที่เลือกเป็นสนามทดสอบในงานวิจัย เช่น แบบการก่อสร้างของผิวทางคอนกรีต สภาพปัจจุบันของผิวทางคอนกรีต เป็นต้น

1.4.3 ออกแบบวิธีการทดสอบในสนามด้วยเครื่อง port-LTE พร้อมทั้งประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง แล้วจึงเตรียมเครื่อง port-LTE และดำเนินการทดสอบเก็บข้อมูล

1.4.4 วิเคราะห์ข้อมูลค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต เพื่อประเมินหาโพรงและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่อง port-LTE เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ตรวจหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผลของการวิจัย

1.4.6 จัดทำรูปเล่มงานวิจัยและตีพิมพ์ เพื่อเผยแพร่ในการประชุมทางวิชาการหรือวารสารวิชาการระดับชาติ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการยุบตัวบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกจริงได้

1.5.2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวที่บริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตกับโพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้

1.5.3 สามารถบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง port-LTE เมื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้

1.5.4 สามารถประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้

## บทที่ 2

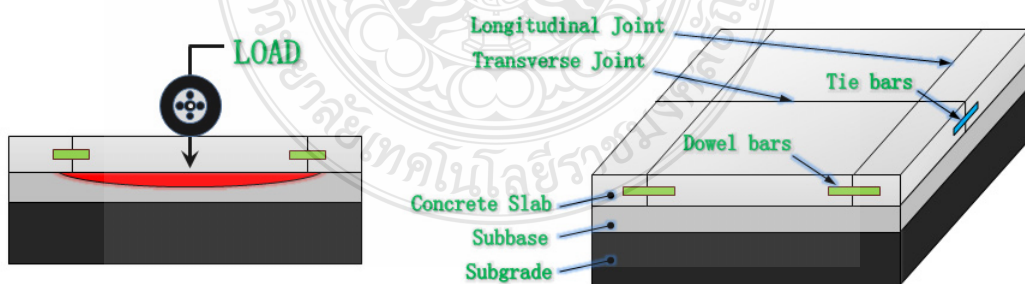
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จนถึงปัจจุบันได้มีนักวิชาการและองค์กรมากมาย ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเกิดและการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้มาพัฒนาการประเมินหาโพรงและทำการซ่อมแซมโพรงก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับผิวทางคอนกรีต ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ผิวทางคอนกรีต (Concrete Pavement)

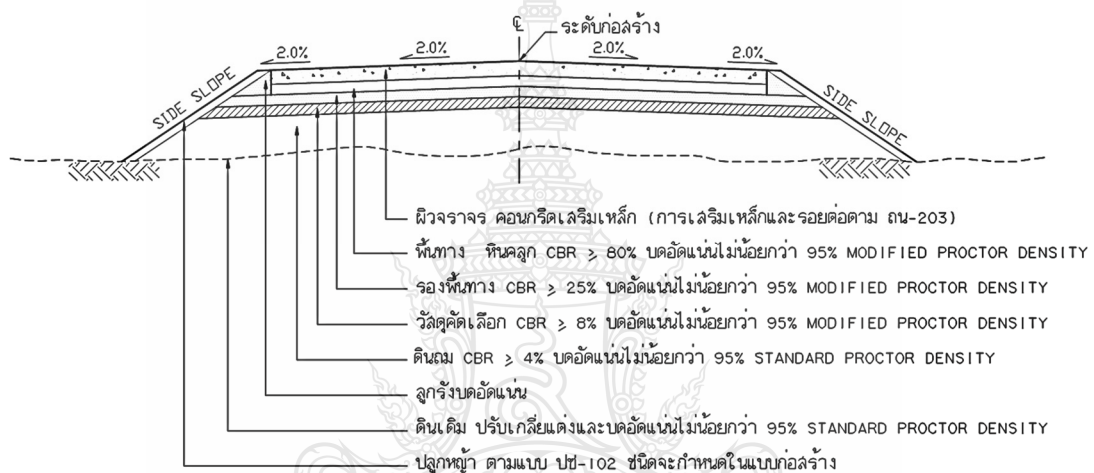
ความรู้เกี่ยวกับผิวทางคอนกรีตมีผลต่อการประเมินสภาพของผิวทาง เนื่องจากผิวทางคอนกรีตมีพฤติกรรมที่หลากหลาย ความรู้ดังกล่าวจึงช่วยให้สามารถเลือกวิธีการทดสอบและเครื่องมือที่เหมาะสมกับการประเมินสภาพจริงของผิวทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลทั่วไปของผิวทางคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

โดยทั่วไปโครงสร้างผิวทางแบบแกร่ง (Rigid Pavement) หรือ ผิวทางคอนกรีตประกอบไปด้วย ชั้นพื้นคอนกรีต (Concrete Slab) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) ชั้นดินเดิม (Subgrade) ชั้นวัสดุถมคันทาง (Embankment) และรอยต่อ (Joint) เมื่อมีน้ำหนักมากระทำแก่โครงสร้างจะเกิดการกระจายน้ำหนักตลอดช่วงความยาวของแผ่นพื้นและถ่ายลงสู่ชั้นดินเดิม จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้ผิวทางคอนกรีตสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกและปริมาณการจราจรได้สูง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระจายน้ำหนักและโครงสร้างของผิวทางคอนกรีต

ในประเทศไทยนิยมสร้างถนนคอนกรีตที่มีความกว้างประมาณ 6 ถึง 8 เมตร และมีความยาวประมาณ 6 ถึง 10 เมตร ด้วยแบบมาตรฐานผิวทางคอนกรีตสองช่องจราจรที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบไปด้วย ชั้นพื้นคอนกรีตหนา 23 ถึง 25 เซนติเมตร มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไม่น้อยกว่า 32.5 เมกะปาสคาล มีชั้นรองพื้นทางทำหน้าที่ช่วยระบายน้ำ ใช้วัสดุประเภทกรวดหรือทรายหนา 10 เซนติเมตร มีชั้นวัสดุมวลรวมหนา 15 เซนติเมตร มีชั้นวัสดุดินถมทำหน้าที่ยกระดับโครงสร้างให้สูงกว่าระดับทางน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมาทำความเสียหายให้แก่โครงสร้าง มักใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุ และรอยต่อทำหน้าที่ช่วยลดหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นกับชั้นพื้นทางคอนกรีต [11]

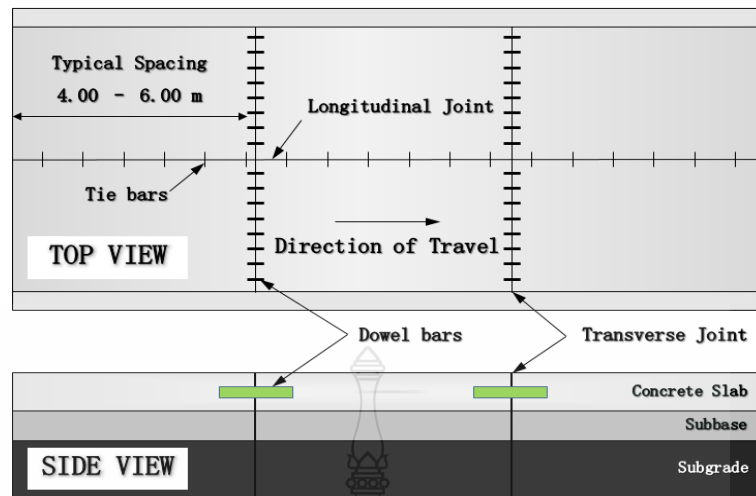


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผิวทางคอนกรีตแบบมาตรฐานสองช่องจราจรในประเทศไทย [12]

### 2.1.1 ประเภทของผิวทางคอนกรีต [13]

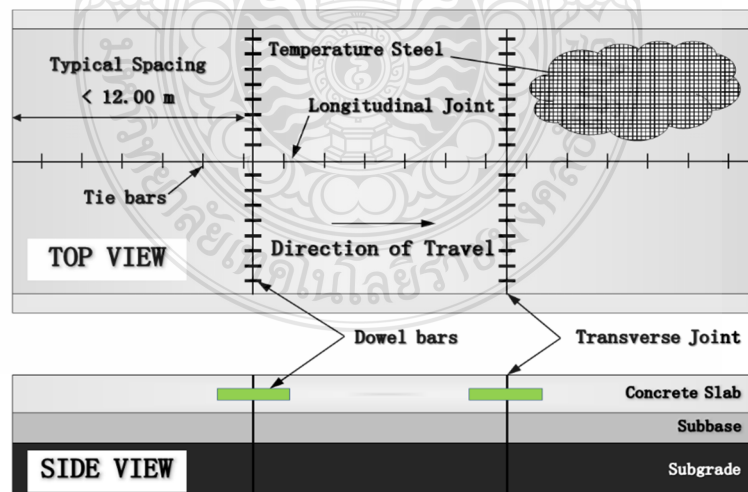
ประเภทของผิวทางคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำหรับการประเมินสภาพของผิวทาง เนื่องจากผิวทางแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันของรอยต่อและการเสริมเหล็ก ทำให้พฤติกรรมของผิวทางคอนกรีตแตกต่างกัน สามารถแบ่งผิวทางคอนกรีตออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1) ผิวทางคอนกรีตแบบรอยต่อไม่มีการเสริมเหล็ก (Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP) เป็น โครงสร้างที่ไม่มีการเสริมเหล็กเพื่อช่วยในการรับน้ำหนัก เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำจะถูกส่งไปยังรอยต่อผ่านการยึดกันของวัสดุมวลรวมระหว่างแผ่น (Aggregate Interlock) เพื่อให้การส่งถ่ายน้ำหนักมีประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นจึงต้องมีความยาวประมาณ 4 ถึง 6 เมตร หรือ อาจมีการติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bars) เพื่อช่วยในการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีต ดังรูปที่ 2.3



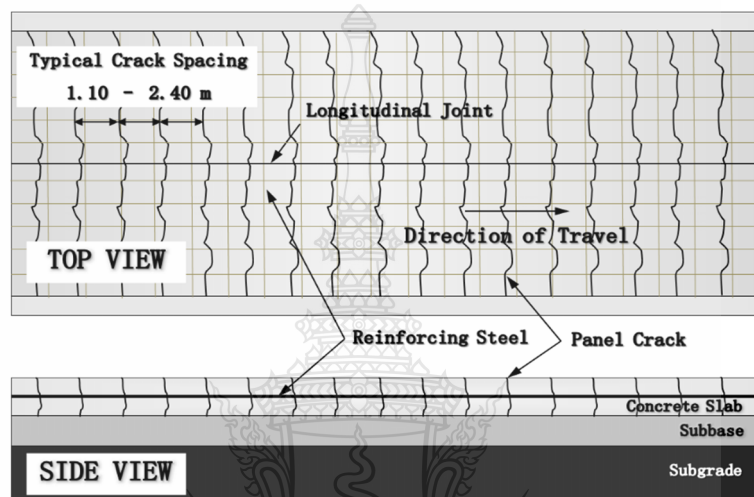
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท JRPC

2) ผิวทางคอนกรีตแบบรอยต่อมีการเสริมเหล็ก (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRPC) เป็นโครงสร้างที่มีการติดตั้งเหล็กเดือยเพื่อช่วยรองรับการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณรอยต่อตามขวางและมีการเสริมเหล็กกันร้าว (Temperature Steel) เพื่อช่วยลดการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของแผ่นพื้นที่เกิดจากการบิดหรืออง ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อม ผิวทางประเภท JRPC มีระยะห่างระหว่างแผ่นยาวกว่าผิวทางประเภท JPCP โดยปกติผิวทางประเภท JRPC จะมีระยะห่างไม่เกิน 12 เมตร ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท JRPC

3) ผิวทางคอนกรีตแบบไร้รอยต่อตามขวาง (Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP) เป็นโครงสร้างที่ไม่มีรอยต่อตามขวางรองรับการหดหรือการขยายตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต แต่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเสริมเหล็กตามยาวแบบต่อเนื่อง ผิวทางประเภทนี้มีรอยแตกเกิดขึ้นได้ง่ายจึงมีการเสริมเหล็กเสริมกันไว้ ซึ่งทำหน้าที่ช่วยยึดรอยแตกและช่วยถ่ายแรงบริเวณรอยแตกของแผ่นพื้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผิวทางคอนกรีตประเภท CRCP

ผิวทางคอนกรีตในประเทศไทยที่นิยมก่อสร้างมากที่สุด คือ ผิวทางประเภท JRCP

#### 2.1.2 รอยต่อของผิวทางคอนกรีต [14]

รอยต่อเป็นบริเวณที่อ่อนแอที่สุดและเกิดความเสียหายมากที่สุด ในการประเมินสภาพของผิวทางคอนกรีต จึงต้องตรวจสอบสภาพของรอยต่อเป็นอันดับต้นๆ รอยต่อทำหน้าที่ช่วยลดหน่วยแรงของแผ่นพื้นคอนกรีตที่เกิดจากการขยายหรือหดตัว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความชื้น รอยต่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

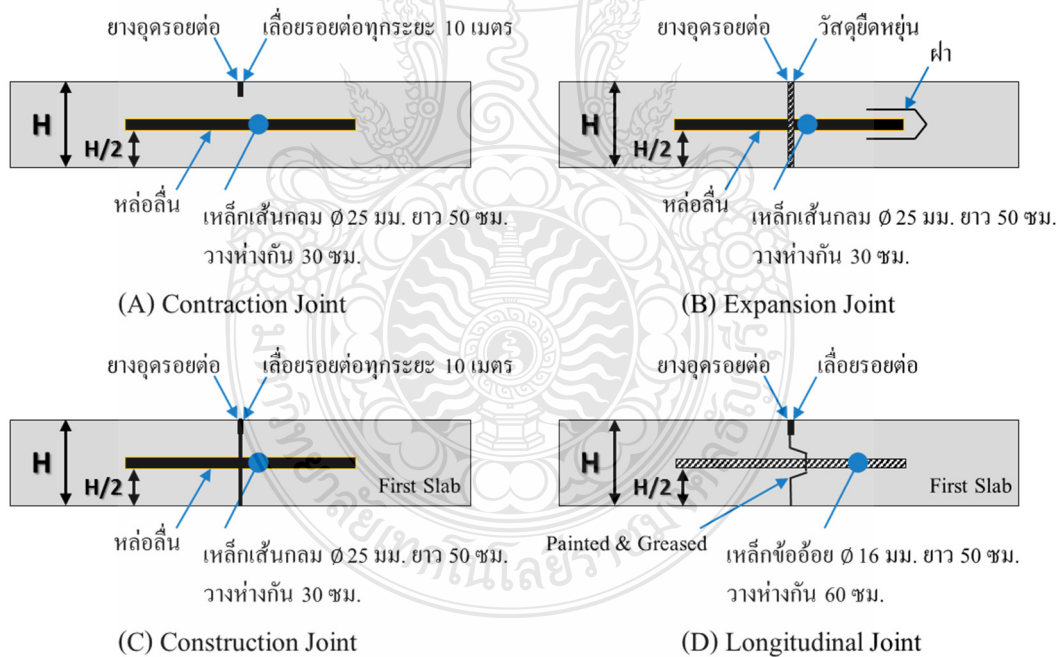
- 1) รอยต่อตามแนวขวาง (Transverse Joint) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) เป็นรอยต่อที่ตั้งฉากกับทิศการจราจร ทำหน้าที่ช่วยควบคุมการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการหดตัว (Shrinkage) หากเกิดรอยแตกบริเวณรอยต่อ จะทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการถ่ายแรงไป เพื่อลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน จึงจำเป็นต้องทำการตัดแผ่นพื้นคอนกรีตให้เป็นร่อง ก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัวเต็มที่และทำการเสริมเหล็กเดือยเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 2.6 (A)

รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของผิวทางคอนกรีต เนื่องจากการขยายตัวในแนวราบของแผ่นพื้นคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่รอยต่อจะติดตั้งเหล็กเดือยเพื่อช่วยในการถ่ายแรง โดยที่ปลายเหล็กเดือยด้านหนึ่งจะติดตั้งฝา (Cap) ซึ่งทำให้มีช่องว่างสำหรับให้เหล็กเดือยสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.6 (B)

รอยต่อเพื่อการก่อสร้าง (Construction Joint) เป็นรอยต่อที่สร้างขึ้นเมื่อมีการหยุดพักการก่อสร้างเนื่องมาจากขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งรอยต่อชนิดนี้มีลักษณะคล้ายรอยต่อเพื่อการหดตัว เพราะมักก่อสร้างในตำแหน่งเดียวกัน ดังรูปที่ 2.6 (C)

2) รอยต่อตามแนวยาว (Longitudinal Joint) รอยต่อชนิดนี้เกิดจากการแบ่งช่วงของการก่อสร้างในขั้นตอนการเทแผ่นพื้นคอนกรีต จึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตในทิศทางขนานกับทิศการจราจร รอยต่อดังกล่าวทำหน้าที่ช่วยลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการบิดหรืองอของแผ่นพื้นคอนกรีต (Warping) ที่รอยต่อมีการติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bars) เพื่อช่วยถ่ายแรงและควบคุมไม่ให้แผ่นพื้นคอนกรีตทั้งสองแผ่นแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 2.6 (D)



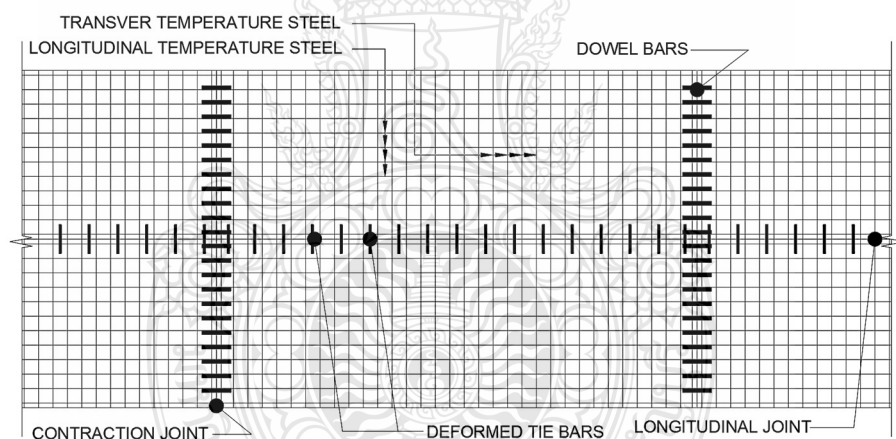
รูปที่ 2.6 รอยต่อของผิวทางคอนกรีต

### 2.1.3 เหล็กเสริมในแผ่นพื้นคอนกรีต [14]

1) เหล็กเดือย (Dowel Bars) เป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร วางห่างกันประมาณ 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.7 วางขนานกับทิศการจราจร ทำหน้าที่ถ่ายแรงบริเวณรอยต่อตามขวาง ปลายข้างหนึ่งควรมีการหล่อลื่นเพื่อรองรับการขยายตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต

2) เหล็กยึด (Tie Bars) เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร วางห่างกันประมาณ 60 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.7 ใช้สำหรับป้องกันการแยกตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณรอยต่อตามยาว

3) เหล็กเสริมกันร้าว (Temperature Steel) เป็นเหล็กเสริมลักษณะแหงลวดตาข่าย หรือเหล็กตะแกรง ดังรูปที่ 2.7 ใช้สำหรับป้องกันการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของแผ่นพื้นคอนกรีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแต่ไม่มีจุดประสงค์เพื่อรับกำลัง ดังนั้นตำแหน่งที่วางจึงอยู่ด้านบนของแผ่นพื้นคอนกรีต



รูปที่ 2.7 เหล็กเสริมของผิวทางคอนกรีต [15]

ผิวทางคอนกรีตจะสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก็ต่อเมื่อถูกสร้างด้วยแบบแปลน ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับน้ำหนักที่กระทำจริงตามมาตรฐานทางวิศวกรรม และก่อสร้าง บนฐานรากที่แข็งแรงไม่มีการทรุดตัว เพราะคอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติที่แข็งแรงแต่เปราะ หากด้านใต้ แผ่นพื้นคอนกรีตมีการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน จะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ง่ายและ ยังส่งผลให้อายุการใช้งานของคอนกรีตสั้นลง สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะและความเสียหายของ ผิวทางคอนกรีตจะกล่าวไว้ในหัวข้อ โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

## 2.2 โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต (Void under Concrete Pavement)

โพรงเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างผิวทางคอนกรีตเกิดความเสียหาย เมื่อเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตอยู่ในสภาวะสูญเสียความสามารถในการพยุงตัว (Loss of Support) ทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตในบริเวณที่เกิดโพรงต้องรับค่าหน่วยแรงเค้น (Stress) และค่าความเครียด (Strain) จากน้ำหนักบรรทุกมากกว่าปกติ สำหรับความรู้ที่จำเป็นต่อการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

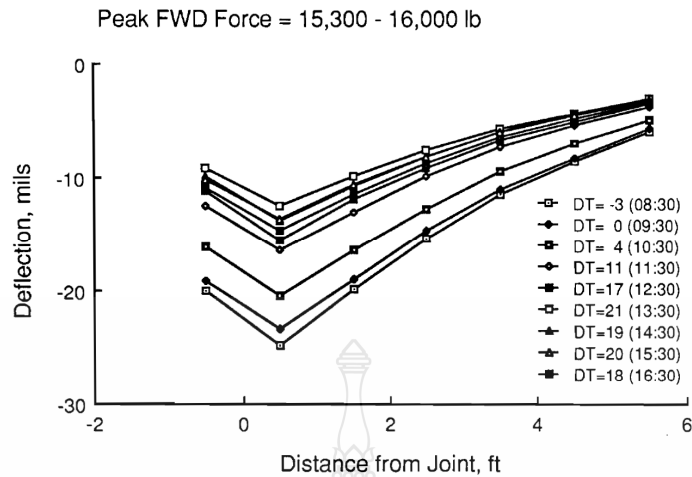
### 2.2.1 ความสัมพันธ์ของโพรงกับอุณหภูมิและความชื้น

การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมมีผลต่อการขยายหรือหดตัวของผิวทางคอนกรีต พฤติกรรมดังกล่าวทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดหน่วยแรงภายในที่แตกต่างกัน จากสาเหตุดังกล่าวจึงต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อแผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

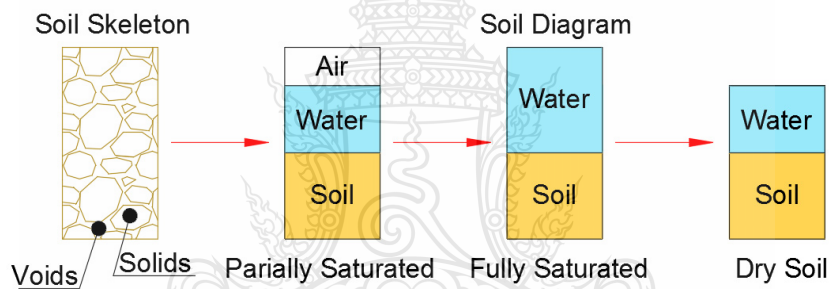
1) ผลกระทบจากอุณหภูมิ สามารถแบ่งความสำคัญเป็นสองแบบ ได้แก่ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงประจำวัน (Daily) และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Season) โดยปกติในช่วงฤดูร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ จะส่งผลต่อการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตมากกว่าปกติเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของแผ่นพื้น ในช่วงเวลากลางวันอุณหภูมิที่ผิวด้านบนจะสูงกว่าผิวด้านล่าง ทำให้ผิวด้านบนเกิดการขยายตัวในขณะที่ผิวด้านล่างเกิดการหดตัว จึงเกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวด้านบนและหน่วยแรงดึงที่ผิวด้านล่าง ส่งผลให้แผ่นพื้นคอนกรีตโก่งตัวลง ส่วนในเวลากลางคืนจะอยู่ในสภาวะที่ตรงข้ามกัน คือ ผิวด้านบนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวด้านล่างเกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวด้านบนและหน่วยแรงอัดที่ผิวด้านล่าง ส่งผลให้แผ่นพื้นคอนกรีตโก่งตัวขึ้น จากความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาทำให้ผิวทางคอนกรีตเกิดการโก่งตัวแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.8 [16]

2) ผลกระทบจากความชื้น มีผลต่อผิวทางคอนกรีตในลักษณะคล้ายกับผลกระทบจากอุณหภูมิ เพียงแต่เมื่อปริมาณความชื้นที่ผิวด้านบนมีค่าต่ำกว่าที่ผิวด้านล่าง จะทำให้ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นคอนกรีตเกิดหน่วยแรงอัดและผิวด้านบนเกิดหน่วยแรงดึง ส่งผลให้เกิดการโก่งตัวขึ้น และหากความชื้นที่ผิวด้านบนสูงกว่าที่ผิวด้านล่างจะทำให้เกิดการโก่งตัวลง โดยปกติที่ผิวด้านบนมักจะแห้งกว่าผิวด้านล่างอยู่ตลอด และผลจากความชื้นยังทำให้เกิดปฏิกิริยาการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) ซึ่งเกิดจากความชื้นเข้าไปแทนที่อากาศตามช่องว่างของมวลดิน เมื่อมีน้ำหนักกระทำ จะทำให้ความชื้นส่วนเกินถูกบีบออกจากมวลรวมของดินทำให้ดินเกิดการยุบตัวลง เมื่อดินยุบตัวลงจะเกิดเป็นโพรงขึ้นในบริเวณนั้น ดังรูปที่ 2.9



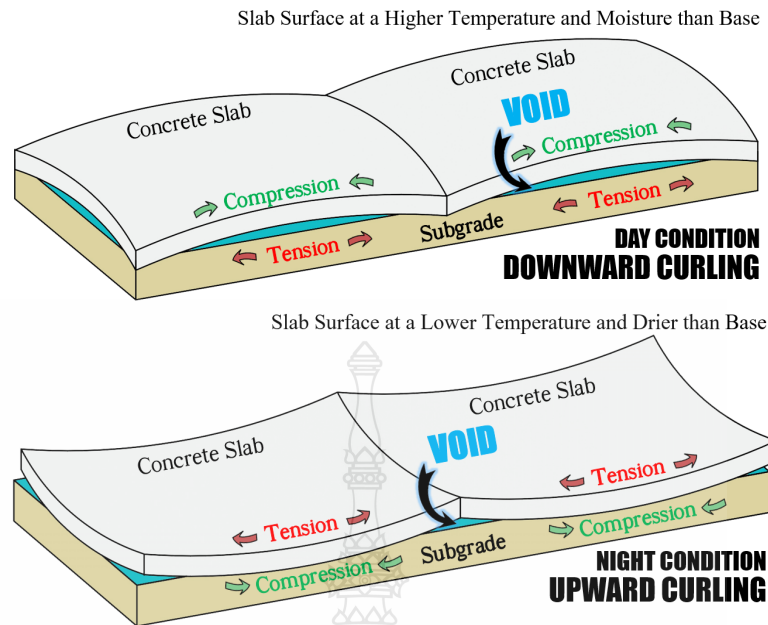


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา [17]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการอัดตัวคายน้ำของดิน [18]

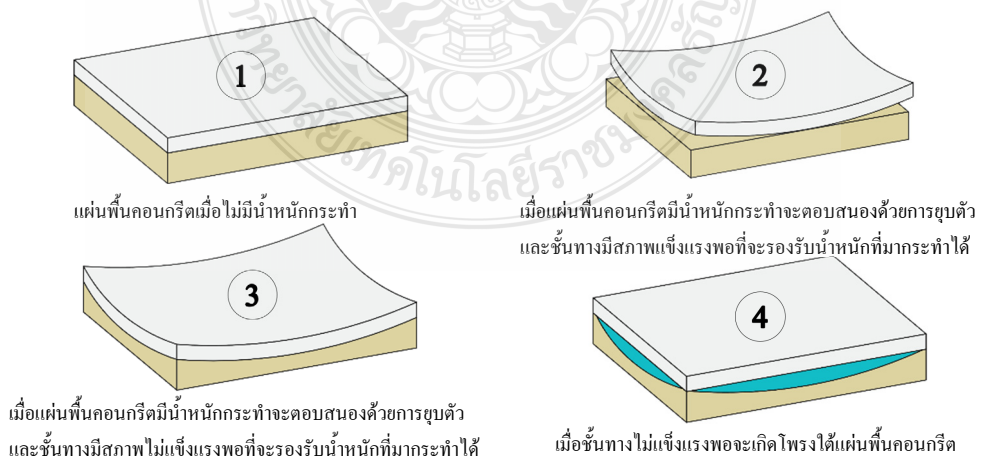
การ โกงตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตทำให้เกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยพฤติกรรม การ โกงตัวขึ้นทำให้บริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตอยู่ในสภาวะสูญเสียความสามารถในการพุงตัว ส่งผลให้เกิดเป็นโพรงบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีต และกรณีที่เกิดพฤติกรรมการ โกงตัวลงทำให้ บริเวณกึ่งกลางแผ่นอยู่ในสภาวะสูญเสียความสามารถในการพุงตัว ส่งผลให้เกิดเป็นโพรงบริเวณ กลางแผ่นพื้นคอนกรีต แต่พฤติกรรมการ โกงตัวที่เกิดจากอุณหภูมิและความชื้นนั้นจะชดเชยซึ่งกัน และกัน กล่าวคือ ในตอนกลางวันผลจากอุณหภูมิจะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีต โกงตัวลงแต่ผลจาก ความชื้นจะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีต โกงตัวขึ้น ดังรูปที่ 2.10 และนอกจากนี้ยังมีหน่วยแรงที่ต้านทาน การ โกงตัวจากน้ำหนักของตัวแผ่นคอนกรีตเอง [19]



รูปที่ 2.10 ผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นต่อแผ่นพื้นคอนกรีต

### 2.2.2 ความสัมพันธ์ของโพรงกับการยุบตัวของผิวทางคอนกรีต

เมื่อผิวทางคอนกรีตได้รับแรงกระทำจากการสัญจรบนผิวทาง จะตอบสนองต่อแรงที่มากระทำด้วยการยุบตัวและถ่ายน้ำหนักลงไปสู่ชั้นทางด้านล่างจนถึงชั้นดินเดิม หากชั้นทางด้านล่างได้รับการบดอัดที่ดีและมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต ชั้นทางด้านล่างของแผ่นพื้นคอนกรีตจะไม่มีทรุดตัว แต่หากชั้นทางด้านล่างไม่แข็งแรงพอจะเกิดการทรุดตัวขึ้นหรือวัสดุชั้นทางถูกดันออกไป ส่งผลให้เกิดโพรงในบริเวณนั้นดังรูปที่ 2.11



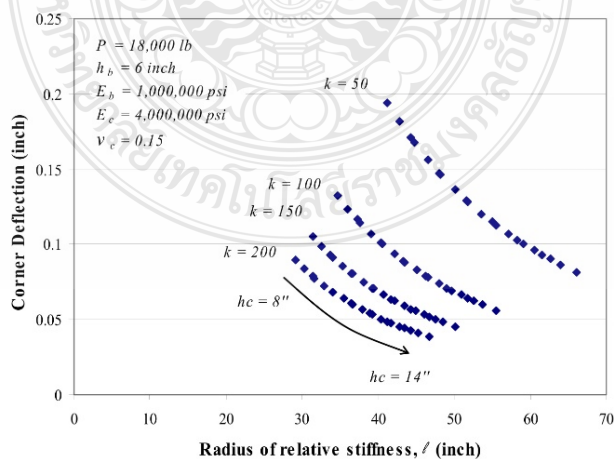
รูปที่ 2.11 ผลกระทบจากการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต

โดยค่าการยุบตัวบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตสามารถคำนวณตามสมการของ Westergaard [20] ดังสมการที่ 2.1

$$\delta = \frac{P}{kl^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

- โดยที่  $\delta$  = ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีต, นิ้ว  
 $P$  = น้ำหนักลงล้อ, ปอนด์  
 $k$  = โมดูลัสความต้านทานของดิน, ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว  
 $l$  = รัศมีความแกร่งสัมพัทธ์, นิ้ว  
 $a$  = พื้นที่หน้าตัดของล้อ, นิ้ว

Jung และ Zollinger [21] ได้วิเคราะห์หิวทางคอนกรีตด้วยสมการที่ 2.1 ซึ่งได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาของหิวทางคอนกรีต ( $h_c$ ) เท่ากับ 8 ถึง 14 นิ้ว ค่าโมดูลัสความต้านทานของดิน ( $k$ ) เท่ากับ 50 ถึง 200 ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว และค่าโมดูลัสของแผ่นพื้นคอนกรีต ( $E_c$ ) เท่ากับ 4,000,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $h_c$  และ  $k$  มีผลต่อค่าการยุบตัวที่มุม โดยเมื่อค่า  $h_c$  และ  $k$  เพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวที่มุมก็จะลดลง ดังรูปที่ 2.12 ทั้งนี้สมการที่ 2.1 ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแผ่นพื้นคอนกรีตจะต้องอยู่ในสถานะที่มีชั้นรองรับอย่างสมบูรณ์ (Full of Support) หรือกล่าวอีกอย่างว่าไม่มีโพรงเกิดขึ้น ดังนั้นการตรวจสอบความลึกของโพรงจึงเป็นประเด็นสำคัญเกี่ยวกับความถูกต้องของผลจากการคำนวณตามทฤษฎี



รูปที่ 2.12 ผลวิเคราะห์ค่าการยุบตัวจากสมการของ Westergaard [21]

### 2.2.3 ความสัมพันธ์ของโพรงกับการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้น [22]

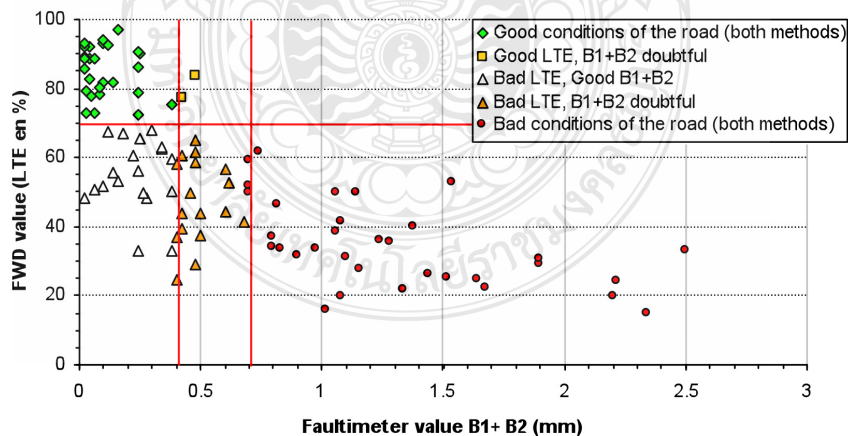
ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีต (LTE) ในบริเวณรอยต่อของแผ่นพื้นสามารถวิเคราะห์ได้จากตัวแปรหลายอย่าง เช่น ค่าการยุบตัว ค่าความเค้น ค่าความเครียด เป็นต้น โดยส่วนมากจะนิยมวิเคราะห์จากค่าการยุบตัวเนื่องจากเป็นค่าสุทธิที่ได้จากการทดสอบในสนาม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$LTE^{(1)} = \left( \frac{\Delta_{unloaded}}{\Delta_{loaded}} \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

$$LTE^{(2)} = \left( \frac{2 \times \Delta_{unloaded}}{\Delta_{loaded} + \Delta_{unloaded}} \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่  $LTE^{(1),(2)}$  = ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีต, ร้อยละ  
 $\Delta_{unloaded}$  = ค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นที่ไม่มีน้ำหนักกระทำ, ไมโครเมตร  
 $\Delta_{loaded}$  = ค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นที่มีน้ำหนักกระทำ, ไมโครเมตร

Perez และ Geem [23] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LTE กับค่าการทรุดตัวต่างระดับที่รอยต่อ (Faulting) ของผิวทางคอนกรีตด้วยเครื่อง FWD จากการศึกษาทำให้สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองค่าได้ ดังรูปที่ 2.13

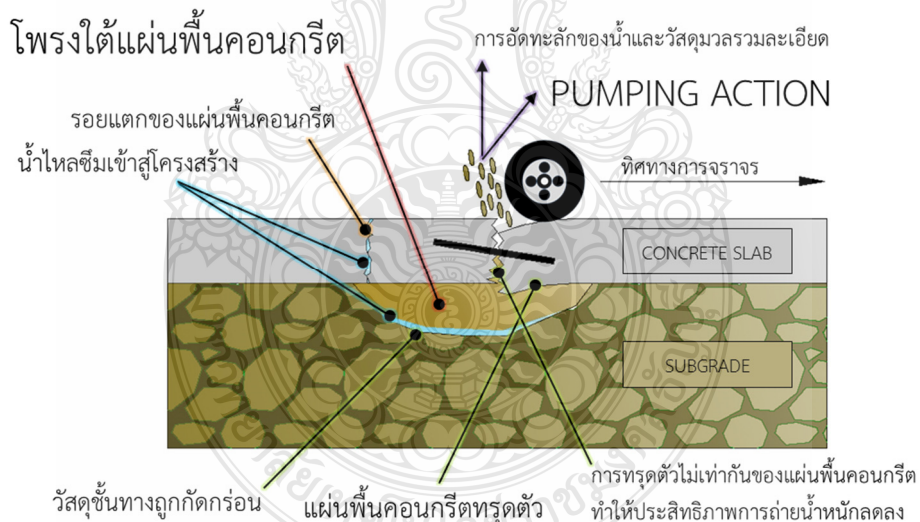


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LTE กับค่า Faulting [23]

ระดับการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นสามารถบอกถึงสภาพของผิวทางคอนกรีต โดยส่วนมากเมื่อวิเคราะห์โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจะพิจารณาค่า LTE ที่ต่ำกว่าร้อยละ 70 เพราะมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดโพรงขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจึงทำให้ค่า LTE ลดลง [24]

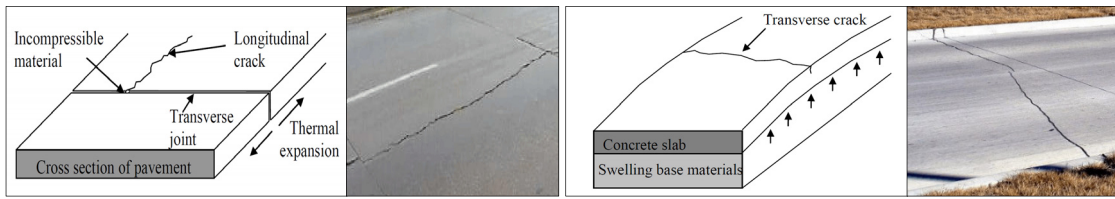
#### 2.2.4 ความสัมพันธ์ของโพรงกับความเสียหายของผิวทางคอนกรีต [25]

ลักษณะของโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตไม่สามารถมองเห็นด้วยการสำรวจด้วยสายตา (Visual Inspection) แต่สามารถประเมินได้จากความเสียหายของผิวทางคอนกรีต พฤติกรรมสำคัญที่ทำให้เกิดโพรง คือ การทรุดตัวของชั้นฐานรากและการสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างสาเหตุเกิดจากเมื่อแผ่นพื้นคอนกรีตมีการขยายหรือหดตัวและรวมไปถึงมีการกระทำซ้ำของน้ำหนักอยู่บ่อยครั้ง จนกระทั่งเกิดรอยแยกหรือรอยแตกขึ้นที่แผ่นพื้นคอนกรีต จากการเกิดรอยแยกหรือรอยแตกทำให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่โครงสร้างชั้นทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้ ซึ่งน้ำที่ซึมเข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนและปฏิกิริยาอิมมัตด้วยน้ำกับวัสดุของชั้นทาง ส่งผลให้เมื่อมีน้ำหนักมากระทำกับผิวทางคอนกรีต วัสดุชั้นโครงสร้างบางส่วนที่ถูกกัดกร่อนจะถูกบีบอัดออกมาตามบริเวณรอยต่อหรือรอยแตกที่เกิดขึ้นหรือเกิดการทรุดตัว จนทำให้บริเวณนั้นจึงเกิดเป็นโพรงขึ้น ดังรูปที่ 2.14



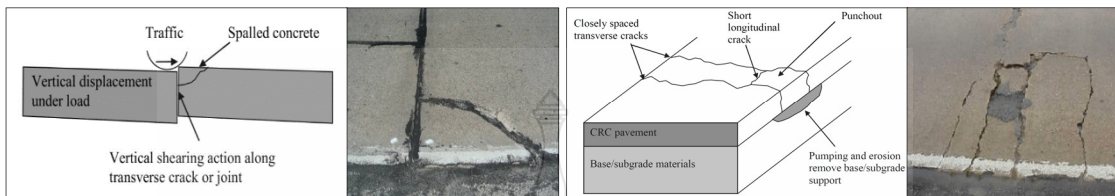
รูปที่ 2.14 การเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

การเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตทำให้ความเสียหายเดิมที่มีอยู่เกิดความเสียหายมากขึ้นและยังทำให้เกิดความเสียหายใหม่แก่ผิวทางคอนกรีต โดยความเสียหายที่สัมพันธ์กับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตที่สามารถประเมินได้จากการสำรวจด้วยสายตา แสดงไว้ดังรูปที่ 2.15



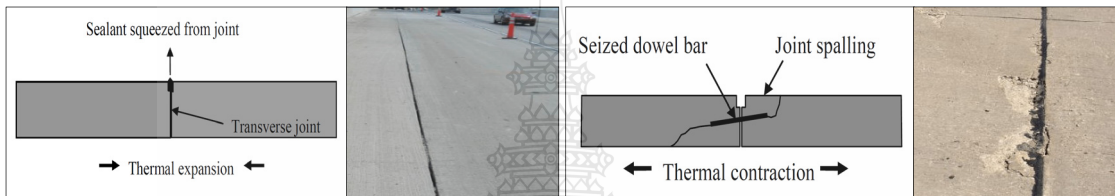
(A) Longitudinal Crack

(B) Transverse Crack



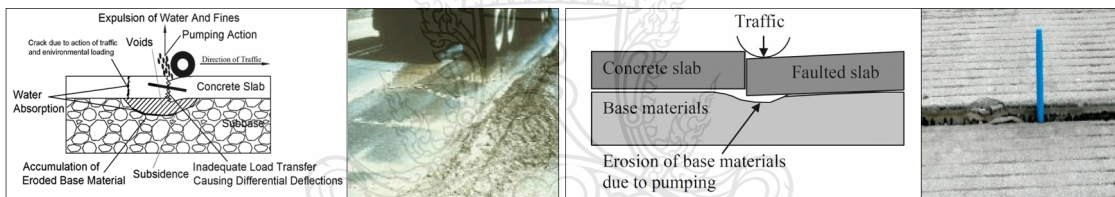
(C) Corner Crack

(D) Divided Slab or Punch outs



(E) Joint Seal Damage

(F) Joint Load Transfer System Deterioration



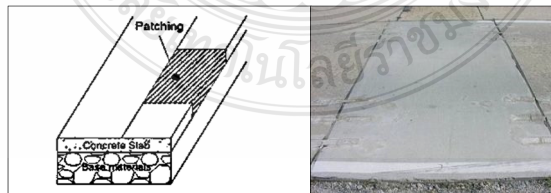
(G) Pumping Action

(H) Faulting



(I) Lane to Shoulder Drop Off

(J) Lane to Shoulder Separation



(K) Concrete Pavement Patching

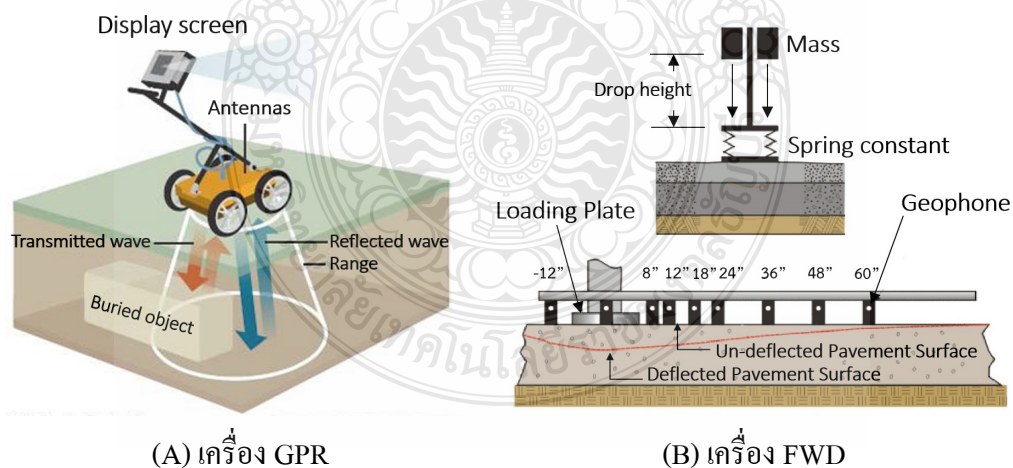
รูปที่ 2.15 ความเสียหายที่สัมพันธ์กับการเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต [26]

## 2.2.5 การประเมินหาโพรงใต้แผ่นดินคอนกรีต

### 1) เครื่องมือตรวจหาโพรงใต้แผ่นดินคอนกรีตในประเทศไทย

เครื่องธรณีเรดาร์ (Ground Penetrating Radar, GPR) เป็นเครื่องทดสอบทางธรณีที่มีความละเอียดสูง ใช้สำรวจสภาพใต้ดินหรือสภาพภายในโครงสร้าง หลักการทำงานจะอาศัยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ความถี่ 10 ถึง 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นคลื่นความถี่ที่ถูกส่งออกไปจะถูกสะท้อนกลับมาแล้วเข้าสู่หัวรับสัญญาณ (Receiving Antenna) สุดท้ายเครื่องมือจะทำการแปลงสัญญาณคลื่นที่ถูกส่งกลับมาเป็นสัญญาณภาพ โดยสัญญาณภาพที่ได้จะแสดงถึงสภาพด้านใต้พื้นดิน ดังรูปที่ 2.16 (A)

เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางแบบไม่ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับวัดค่าการยุบตัวทั้งกับผิวทางของถนนและสนามบิน หลักการทำงานจะอาศัยการกระแทกของลูกตุ้มน้ำหนักไปที่แผ่นยาง จากนั้นน้ำหนักจะถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอและถ่ายเทลงสู่ผิวทางด้านล่าง เมื่อผิวทางเกิดการยุบตัวจะถูกวัดโดยอุปกรณ์ Geophone ดังรูปที่ 2.16 (B) โดยค่าที่ตรวจวัดได้จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า แล้วจึงส่งไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ ซึ่งจะทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าทางวิศวกรรม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความแข็งแรงของแต่ละชั้นทาง (Stiffness) ต่อไป



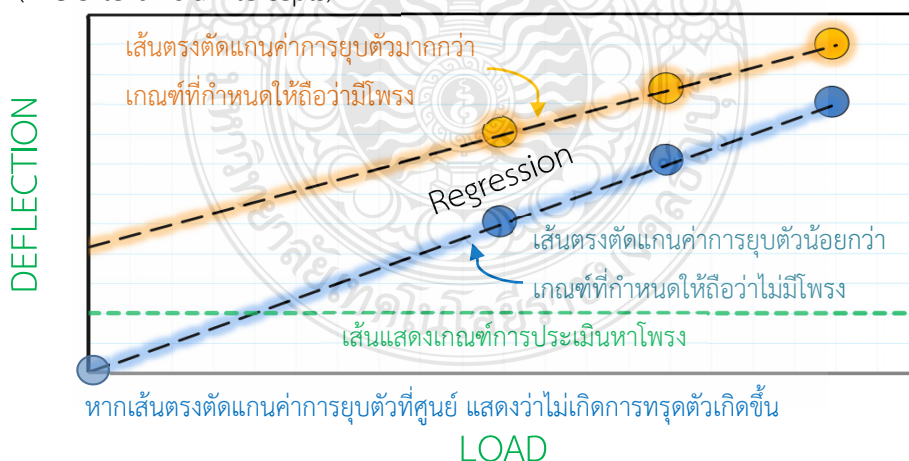
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องมือ GPR และ FWD [27, 28]

## 2) วิธีการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจากค่าการยุบตัว

NCHRP method [29] หรือ วิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (Variable Load Corner Deflection Analysis) ในงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีนี้ว่า VLCDA method ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้น้ำหนักหลายขนาดกระทำบริเวณมุมหรือกึ่งกลางแผ่นพื้นคอนกรีต แล้ววัดค่าการยุบตัวที่เกิดจากน้ำหนักกระทำนั้น โดยทั่วไปนิยมนำน้ำหนัก 9,000 12,000 และ 16,000 ปอนด์ นำผลจากการตรวจวัดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับน้ำหนักที่กระทำ แล้วจึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวด้วยวิธีวิเคราะห์ถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ดังรูปที่ 2.17 โดยหากเส้นตรงตัดแกนของค่าการยุบตัวเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แสดงว่าที่มุมหรือที่กึ่งกลางแผ่นพื้นคอนกรีตนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีโพรงเกิดขึ้น ปัจจุบันวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดสำหรับการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจากค่าการยุบตัว

สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้มีการแนะนำจากหลายหน่วยงานที่ทำงานด้านผิวทาง เช่น American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) [30] ได้แนะนำเกณฑ์สำหรับการประเมินหาโพรงใต้ถนนคอนกรีตเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ในขณะที่ Federal Aviation Administration (FAA) [31] ได้แนะนำเกณฑ์สำหรับการประเมินหาโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตของสนามบินเท่ากับ 75 ไมโครเมตร เป็นต้น

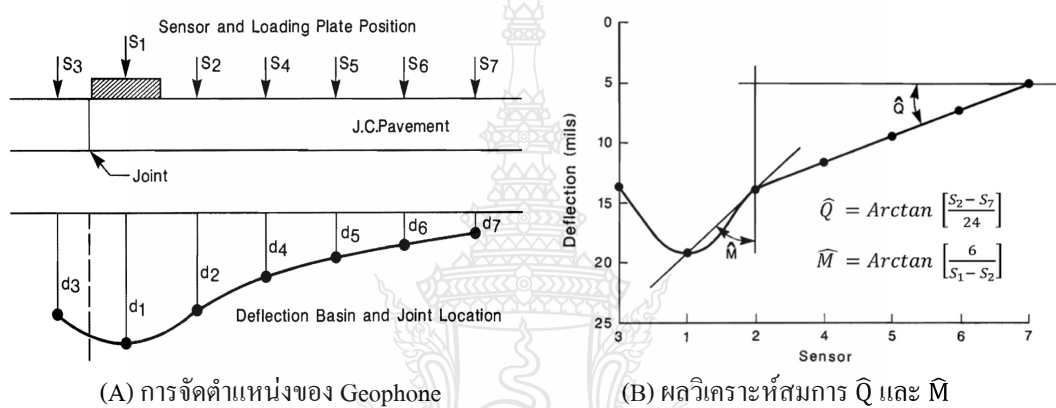
เกณฑ์สำหรับวิเคราะห์หาโพรง : Road > 50 micron [ref. AASHTO 1993]  
(The criteria void intercepts) : Airfield > 75 micron [ref. FAA, AC-150/5370-11B]



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต



CTR method [32] เป็นวิธีประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตที่ถูกพัฒนาโดย Center for Transportation Research วิธีดังกล่าวจะวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่องมือ FWD แล้วจึงนำผลทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับตำแหน่งอุปกรณ์ Geophone ของเครื่องมือ FWD โดยกำหนดให้ค่าการยุบตัวระหว่าง Geophone หมายเลข 2 กับหมายเลข 7 เป็นตัวแทนในแนวราบและแทนด้วยสัญลักษณ์  $\bar{Q}$  และค่าการยุบตัวระหว่าง Geophone หมายเลข 1 กับหมายเลข 2 เป็นตัวแทนในแนวตั้งและแทนด้วยสัญลักษณ์  $\bar{M}$  ดังรูปที่ 2.18 ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกราฟทำให้ได้สมการของ  $\bar{Q}$  และ  $\bar{M}$  ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.18 การติดตั้งอุปกรณ์และวิเคราะห์ผลตามวิธี CTR method [32]

$$\bar{Q} = \text{Arctan} \left[ \frac{S_2 - S_7}{24} \right]$$

สมการที่ 2.4

$$\bar{M} = \text{Arctan} \left[ \frac{6}{S_1 - S_2} \right]$$

สมการที่ 2.5

โดยที่  $S_1$  = ค่าการยุบตัวจากอุปกรณ์ Geophone หมายเลข 1, นิ้ว  
 $S_2$  = ค่าการยุบตัวจากอุปกรณ์ Geophone หมายเลข 2, นิ้ว  
 $S_7$  = ค่าการยุบตัวจากอุปกรณ์ Geophone หมายเลข 7, นิ้ว

ค่า  $\bar{Q}$  และ  $\bar{M}$  จากการคำนวณจะนำมาใช้ประเมินโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยเมื่อค่า  $\bar{Q}$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 18 แสดงว่าบริเวณนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตและยังค่า  $\bar{M}$  มีค่าน้อยมากเท่าไร แสดงว่าโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตยังมีขนาดใหญ่

### 2.3 เครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเบา (Lightweight Deflectometer, LWD)

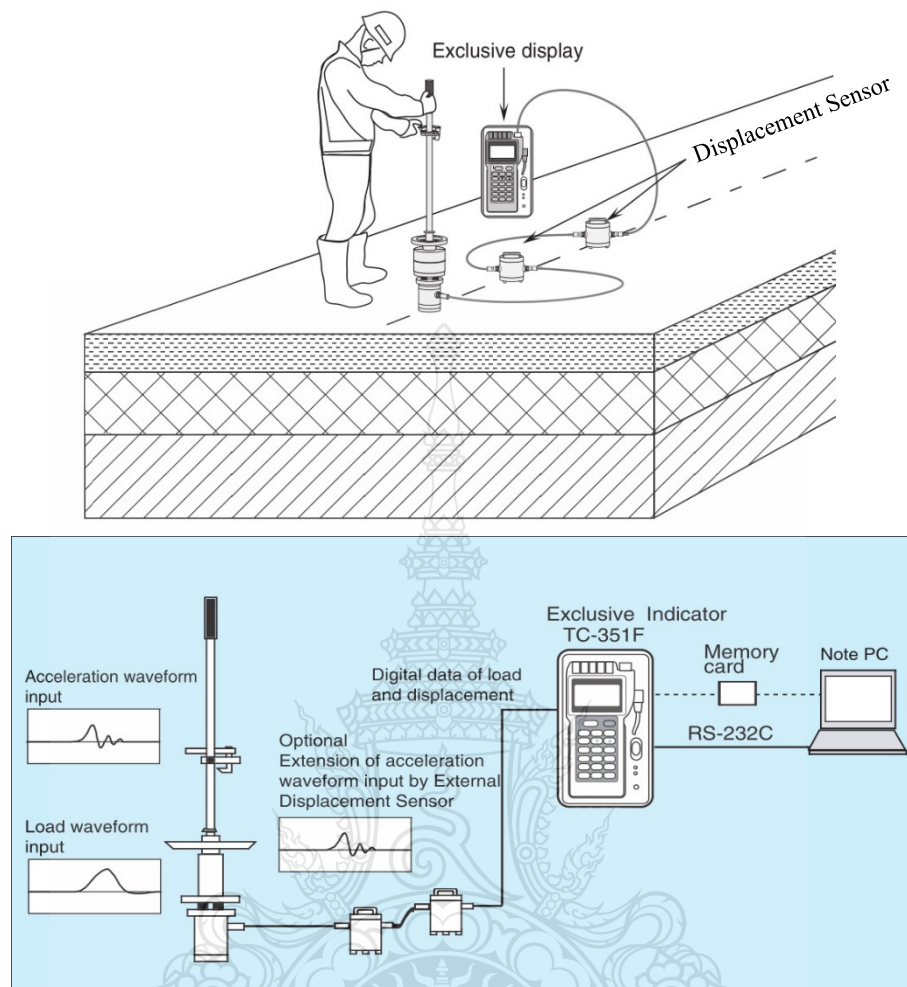
เครื่อง LWD เป็นเครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูลการยุบตัวของโครงสร้างที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก เช่น การทดสอบค่าโมดูลัสของชั้นดิน การวัดค่าการยุบตัวที่มุมของผิวทาง เป็นต้น ซึ่งถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย [33]

อุปกรณ์หลักของเครื่อง LWD ประกอบด้วย ชุดลูกตุ้มน้ำหนัก ใช้สำหรับจำลองน้ำหนักกระทำแก่โครงสร้าง เช่น เซอร์วัดแรงและค่าการยุบตัว อุปกรณ์ TC-351F ใช้สำหรับควบคุมอุปกรณ์ เซ็นเซอร์และแสดงผลการทำงานของเครื่องมือ พร้อมบันทึกค่าการทดสอบลงในการ์ดหน่วยความจำ และคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2.19

หลักการทำงานของเครื่อง LWD จะอาศัยการกระแทกลูกตุ้มน้ำหนักไปที่แผ่นเหล็กเพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อผิวทาง จากนั้นแรงที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทลงสู่โครงสร้างผิวทาง เมื่อผิวทางเกิดการยุบตัวขึ้น เซ็นเซอร์จะวัดค่ายุบตัวและขนาดของแรงที่เกิดขึ้น แล้วส่งกลับไปให้อุปกรณ์ TC-351F ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า สุดท้ายอุปกรณ์ TC-351F จะแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าการยุบตัวในหน่วยไมโครเมตร และบันทึกลงในการ์ดหน่วยความจำ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ของเครื่องมือ LWD



รูปที่ 2.20 แผนผังการทำงานของเครื่อง LWD [33]

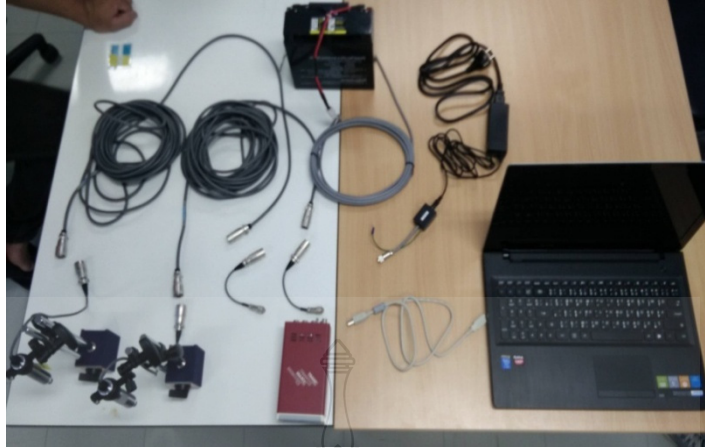
## 2.4 เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา (Portable Load Transfer Efficiency Detector, port-LTE)

จากการเล็งเห็นถึงปัญหาการประเมินสภาพผิวทางคอนกรีตในประเทศไทย จึงได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีต

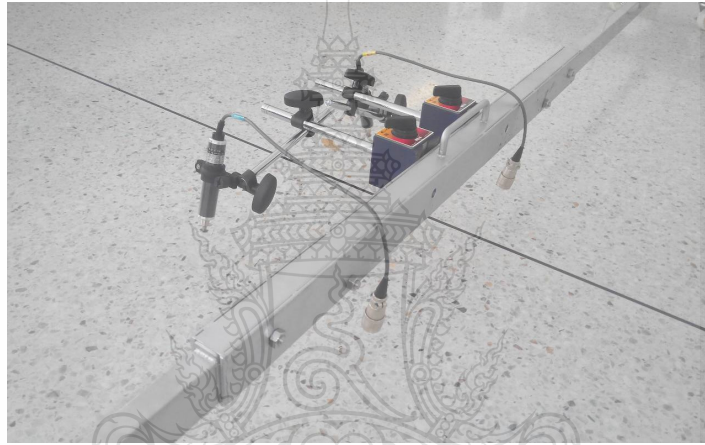
เครื่อง port-LTE เป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาโดยหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTR) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จุดเด่นของเครื่องดังกล่าวเป็นเครื่องมือทดสอบที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างผิวทาง มีความสะดวกและความคล่องตัวในการใช้งาน อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่สามารถทำการทดสอบได้โดยไม่ต้องปิดการจราจร

#### 2.4.1 อุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE แสดงดังรูปที่ 2.21 ประกอบไปด้วย

- 1) อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Displacement Transducer) ใช้สำหรับวัดค่าการยุบตัวของ ผิวทางคอนกรีต โดยอาศัยการหดหรือยืดของเส้นลวดทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปตามขนาดของแรงที่มากระทำ
- 2) อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Temperature Sensor) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศบริเวณสถานที่ทำการทดสอบ
- 3) เครื่องสำรองไฟ (Power Supply) หรือแบตเตอรี่ (Battery) ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์จ่ายไฟให้แก่เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE
- 4) อุปกรณ์ DC-204R และการ์ดหน่วยความจำ (Compact Flash) ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยอุปกรณ์ DC-204R จะเป็นศูนย์กลางที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัด จากนั้นจะทำการแปลงค่าสัญญาณแล้วบันทึกผลลงในการ์ดหน่วยความจำและยังควบคุมการแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์
- 5) สายเคเบิล (Cable) ใช้สำหรับเชื่อมต่อการทำงานของอุปกรณ์เข้าด้วยกัน ได้แก่ สาย CR-1310 สำหรับเชื่อมต่อเครื่องสำรองไฟกับอุปกรณ์ DC-204R สาย CR-3610 สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ DC-204R กับอุปกรณ์บันทึกผลภายนอก สาย CR-4010 สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัดกับสาย CR-6180 สาย CR-6180 สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ DC-204R กับสาย CR-4010 สาย CR-6181 สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ DC-204R กับอุปกรณ์ DC-204R อีกตัว และสาย CR-6182 สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ DC-204R กับคอมพิวเตอร์
- 7) คอมพิวเตอร์ (Computer) และ โปรแกรมสั่งการ DC-7204 (Software DC-7204) ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ DC-204R และสำหรับแสดงผลการตรวจวัด
- 8) ชุดโครงของเครื่อง port-LTE ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น



(A) อุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE

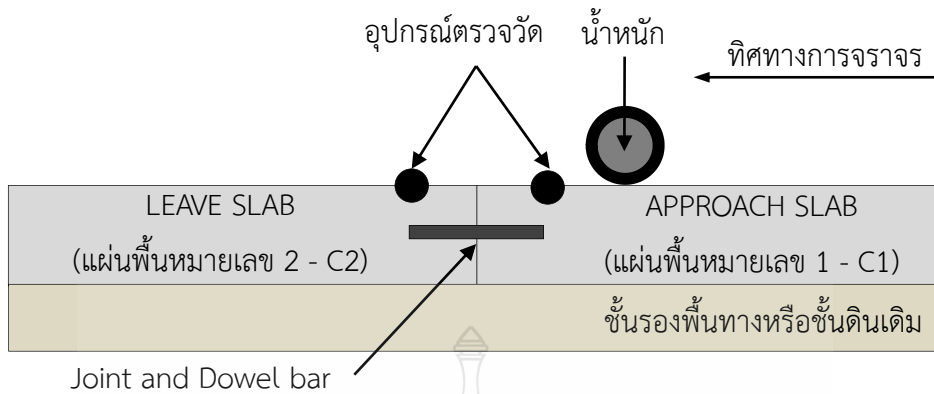


(B) ชุดโครงของเครื่อง port-LTE

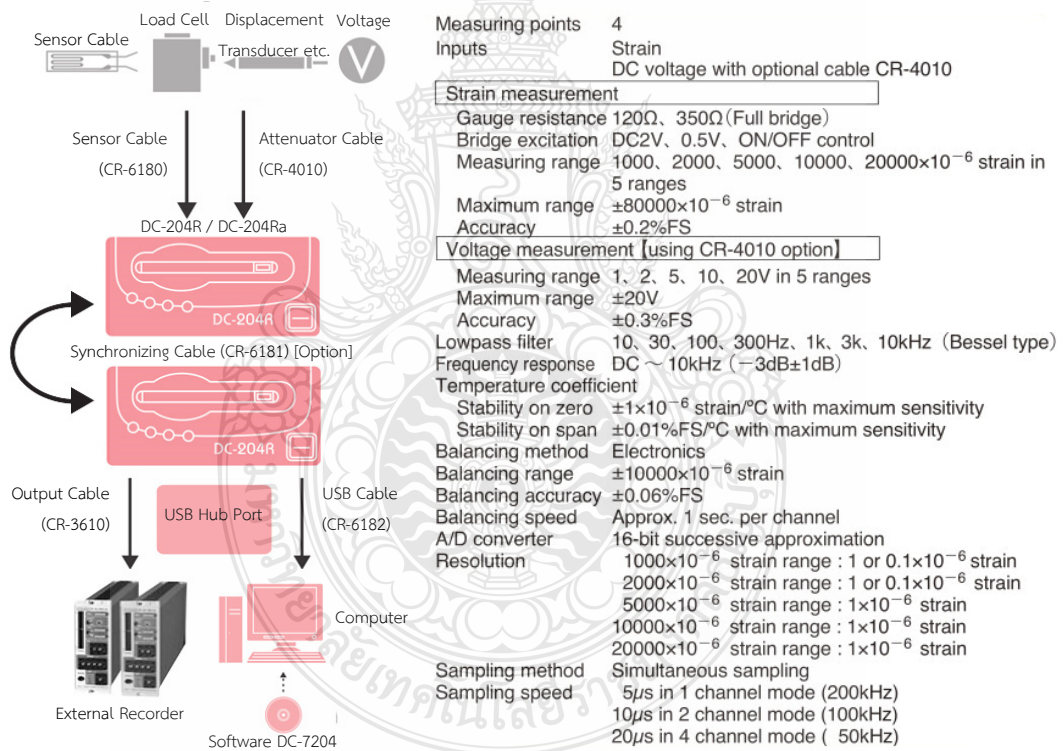
## รูปที่ 2.21 อุปกรณ์และชุด โครงของเครื่อง port-LTE

### 2.4.2 หลักการทำงานของเครื่อง port-LTE

หลักการทำงานของเครื่องมีดังกล่าว เป็นการวัดค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต จากแรงที่มากระทำในรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งหรือพลศาสตร์ (Dynamic) โดยติดตั้งเครื่อง port-LTE ในบริเวณรอยต่อระหว่างมุมของแผ่นพื้นคอนกรีต เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณ ดังกล่าว อุปกรณ์ตรวจวัดค่าการยุบตัวจะทำการวัดการยุบตัวที่เกิดขึ้นทันทีกับแผ่นพื้นคอนกรีต ดังรูปที่ 2.22 แล้วส่งข้อมูลกลับไปยังอุปกรณ์ DC-204R ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า จากนั้นอุปกรณ์ ควบคุม DC-204R จะแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าการยุบตัวในหน่วยไมโครเมตร และทำการบันทึก ข้อมูลทดสอบลงในการ์ดหน่วยความจำ โดยผังการทำงานของเครื่อง port-LTE แสดงดังรูปที่ 2.23 และการทำงานของเครื่อง port-LTE ระหว่างการตรวจวัดสามารถดูได้จากหน้าจอของคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 หลักการตรวจวัดของเครื่อง port-LTE



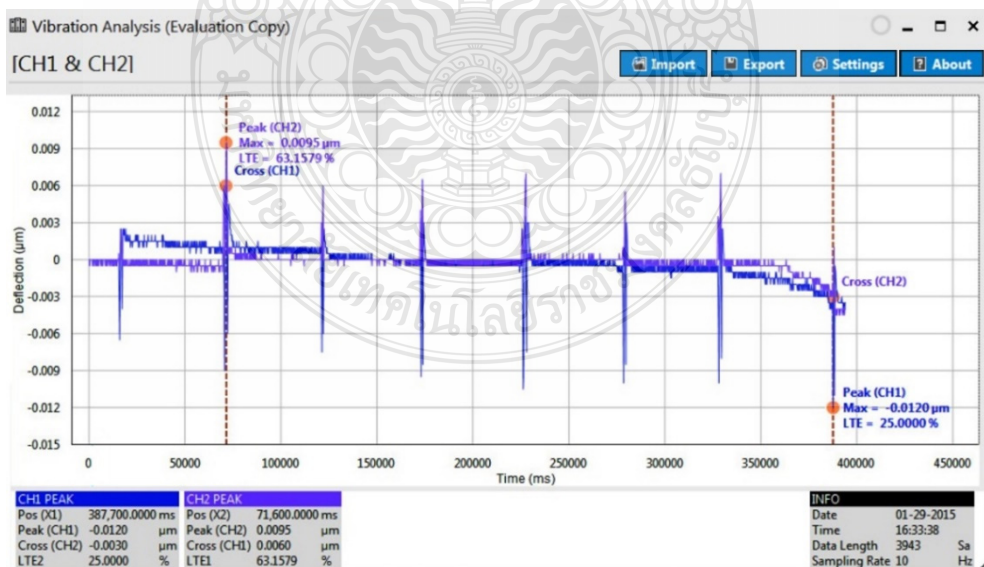
รูปที่ 2.23 แผนผังและข้อมูลจำเพาะของเครื่อง port-LTE [34]



รูปที่ 2.24 การทำงานของเครื่อง port-LTE บนหน้าจคอมพิวเตอร์

### 2.4.3 การวิเคราะห์ผลของเครื่อง port-LTE

ชุดโปรแกรมของเครื่อง port-LTE มีโปรแกรมที่มีชื่อว่า Raptre Vibration Analysis ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับคำนวณค่า LTE ให้แก่เครื่อง port-LTE ซึ่งโปรแกรมจะทำงานตามสมการที่ 2.2 ที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อความสัมพันธ์ของโพรงกับการถ่าน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้น โดยเราสามารถนำเข้าไฟล์ (Import) ผลการทดสอบไปที่โปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์ค่า LTE ทั้งด้านแผ่นพื้นขาเข้าและแผ่นพื้นขาออกให้โดยอัตโนมัติดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การทำงานของโปรแกรม Raptre Vibration Analysis

สำหรับการประเมินหาโพรงใต้แผ่นดินคอนกรีต จะนำข้อมูลจากการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้น ตามวิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นดินคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (VLCDA method)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อปี ค.ศ. 1976 Hironaka และคณะ [35] ทำการศึกษาการประเมินหาโพรงด้วยเครื่องมือแบบไม่ทำลาย จากการศึกษาพบว่า วิธีดังกล่าวไม่สามารถตรวจหาโพรงหรือตำแหน่งของโพรงได้ถูกต้องทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมและสภาพชั้นดินใต้แผ่นดินคอนกรีตของแต่ละพื้นที่ แต่มีวิธีวัดค่าการยุบตัวจากน้ำหนัก (Load Deflection) เป็นวิธีที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมค่อนข้างต่ำ แต่วิธีดังกล่าวจะไม่สามารถบอกขนาดของโพรงได้และมีค่าใช้จ่ายสูง โดยในงานวิจัยได้แนะนำวิธีที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด สำหรับการประเมินโพรงนั้นคือ วิธีวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Earth Resistivity), วิธีวัดคลื่นการสั่นสะเทือน (Seismic methods) และวิธีสำรวจผิวหน้า (Subsurface Radar) โดยสรุปผลการทดลองจะเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปผลการศึกษาของ M.C. Hironaka และคณะ [35]

Method	Quantity Measured	Measurement Equipment	Effectiveness For Void	Void Size and Depth Location	Surveying Speed
Magnetic intensity	anomalies in the earth's magnetic field	proton precession magnetometer	low	no	portable, vehicular or aircraft-mounted
Gravity variations	change in acceleration of gravity	gravimeter	low	possible	50 ft <sup>2</sup> /hr (5 m <sup>2</sup> /hr)
Earth resistivity	voltage, current and distance between electrodes	earth resistivity meter	good	possible	1,000 ft/day
Electromagnetic waves	Transmission characteristics of reflected electromagnetic waves	subsurface looking radar	good	possible	portable and towable at several miles/hour'
Seismic surveys	compressional wave velocities	seismograph, acoustic profile	fairly good	possible	speed similar to earth resistivity
Load deflection	magnitude and slope of surface deflections	nondestructive static and dynamic plate-bearing devices	variable	no	2-4 minute/test location (for dynamic)
Nuclear Detection	number of counts of backscattered radiation	nuclear particle counter : pulse-height analyzer	low	possible	50 ft <sup>2</sup> /hr (5 m <sup>2</sup> /hr)
Acoustic holography	phase and amplitude of acoustic wave	coherent acoustic-wave generator : hydrophone array	good	possible	100 ft <sup>2</sup> /hr (10 m <sup>2</sup> /hr)



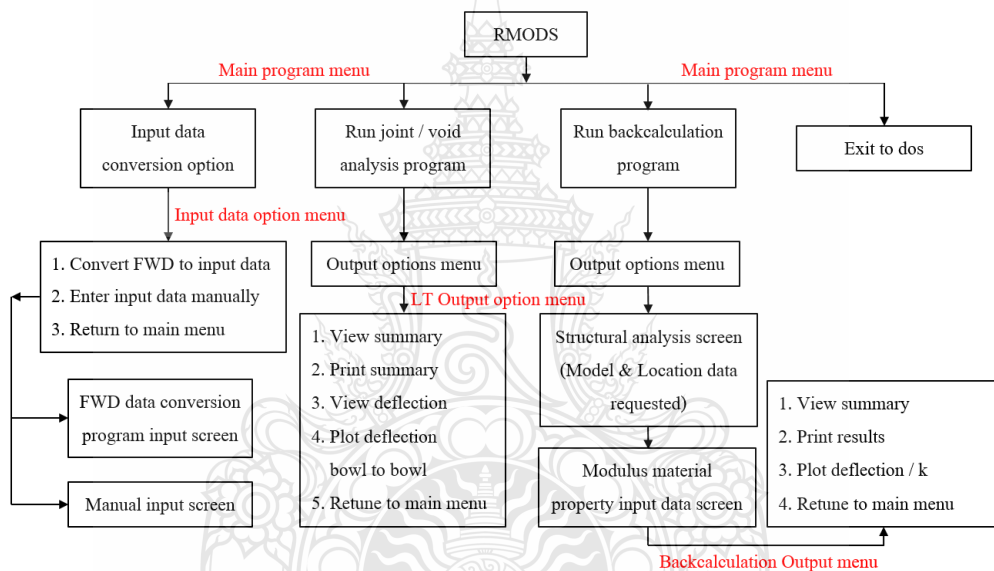
ในปี ค.ศ. 1979 Birkhoff และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาการประเมินหาโพรงด้วยวิธีการวัดค่าการยุบตัวจากน้ำหนัก โดยเลือกศึกษากับผิวทางคอนกรีตที่เกิดการอัดทะลักของมวลรวมละเอียดจากการศึกษาพบว่า เมื่อแผ่นพื้นคอนกรีตเริ่มยุบตัวจนกระทั่งสัมผัสกับชั้นรองพื้นทาง ค่าการยุบตัวที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.05 นิ้ว ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ว่าที่การยุบตัวมากกว่า 0.05 นิ้ว จะมีโพรงอยู่ใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบโดยใช้ระยะการยุบตัวที่ 0.05 นิ้ว เป็นเกณฑ์ พบว่า สามารถใช้สำหรับการตรวจหาโพรงได้ แต่จะมีความสำเร็จเพียงร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในพื้นที่ขนาด 18 ตารางฟุตและมีโพรงเกิดขึ้นขนาด 8 นิ้ว เมื่อใช้น้ำหนักกระทำขนาด 18000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความเครียดในผิวทางจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 12

ในปี ค.ศ. 1985 Ricci และคณะ ทำการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD รุ่น 8000 การทดสอบได้ทำการติดตั้งเครื่องมือ FWD บริเวณรอยต่อ โดยให้เซ็นเซอร์ที่อยู่ตรงจุดแผ่นน้ำหนัก (Loading Plate) เป็นหมายเลข S1 และเซ็นเซอร์ตัวอื่นอยู่ห่างกันเป็นระยะ 12 นิ้ว แล้ววัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นกับแต่ละเซ็นเซอร์ จากการศึกษาได้ทำการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ของการยุบตัวและตำแหน่งเซ็นเซอร์ของเครื่องมือ FWD โดยจากการวิเคราะห์กราฟ ทำให้ได้สมการคำนวณหาค่า  $Q$  และ  $M$  ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ จึงได้นำเสนอวิธีนี้สำหรับการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยวิธีนี้ถูกเรียกว่า CTR method

และในปีเดียวกัน Croveti และ Darter ทำการศึกษาวิธีการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่อง FWD รุ่น 8000 โดยได้ทำการทดสอบผิวทางคอนกรีตในบริเวณมุมแผ่นพื้นด้วยน้ำหนักกระทำที่ 22 40 และ 67 กิโลนิวตัน จากนั้นจึงวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักแต่ละขนาดที่ทำการทดสอบ จากการศึกษาได้ทำการเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่กระทำกับค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้น โดยจากการวิเคราะห์กราฟในเชิงเส้นทำให้ทราบว่าหากเส้นตรงตัดแกนค่าการยุบตัวที่ไม่ใช่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง (0,0) แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะมีโพรงเกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยวิธีนี้ถูกเรียกว่า NCHRP method

ต่อมาปี ค.ศ. 1993 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ได้จัดทำหนังสือมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผิวทางให้แก่วิศวกร ซึ่งในคู่มือดังกล่าวได้นำเสนอวิธีการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD ไว้สามวิธีด้วยกัน คือ วิธีเปรียบเทียบค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีต (Corner Deflection Profile), วิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (Variable Load Corner Deflection Analysis) และวิธีการประมาณหาพื้นที่ของโพรง (Void Size Estimation Procedure)

ในปี ค.ศ. 1995 Jacob และคณะ [37] ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบการประเมินผิวทางคอนกรีต (Rigid Pavement Evaluation System) โดยในการศึกษาครั้งนี้มีการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า RMODS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นำข้อมูลจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD มาคำนวณย้อนกลับเพื่อประเมินหาค่าต่างๆ เช่น ค่าโมดูลัสของดิน ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหน้าระหว่างแผ่นพื้น ประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เป็นต้น ในการคำนวณย้อนกลับหาโพรงนั้นโปรแกรมดังกล่าวได้เลือกใช้วิธีการประเมินหาโพรงด้วย CTR method และ NCHRP method จากการทดลองดังกล่าวผู้ทำการทดลองได้สรุปผลว่า CTR method สามารถตรวจหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้ดีกว่า NCHRP method โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรม RMODS ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แผนผังการทำงานของโปรแกรม RMODS [37]

ในปี ค.ศ. 2003 Julie [38] ทำการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตกับแผ่นพื้นคอนกรีตหนา 25 เซนติเมตร ด้วยเครื่องมือ FWD โดยทำการเปรียบเทียบโพรงที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบของเครื่องมือ FWD ( $Void_{FWD}$ ) กับโพรงที่เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของอุณหภูมิตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน ( $Void_{CW}$ ) จากผลวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2.2 จากการศึกษพบว่า โพรงที่วัดจากเครื่องมือ FWD มีค่าความลึกของโพรงมากกว่าโพรงที่เกิดจากการโก่งตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่เกิดจากน้ำหนักระทำส่งผลต่อผิวทางคอนกรีตมากกว่าเมื่อมีโพรงเกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

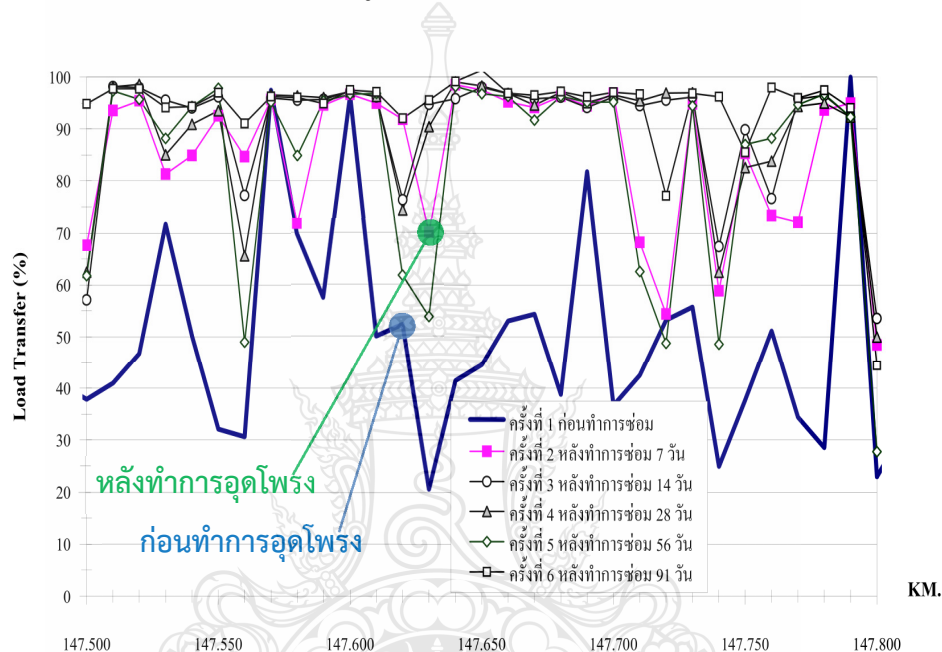
ตารางที่ 2.2 สรุปผลการทดลองของ Julie Marie Vandebossche [38]

Cell	Test Date	VOID <sub>FWD</sub> (microns)	T <sub>AVE</sub> (°C)	T <sub>MO</sub> (°C-cm)	Length (m)	Radius of Relative Stiffness (m)	VOID <sub>C/W</sub> (microns)	VOID <sub>FWD</sub> > VOID <sub>C/W</sub>
5	9/25/1995	-23	14	-126	6.1	0.697	19	No
5	9/25/1995	-25	18	-139	6.1	0.697	77	NO
5	9/25/1995	76	15	39	6.1	0.697	-45	Yes
5	9/26/1995	136	13	89	6.1	0.697	-51	Yes
5	4/17/1996	34	14	-60	6.1	0.697	-10	Yes
5	4/24/1996	469	7	91	6.1	0.697	-2	Yes
5	10/9/1996	100	18	177	6.1	0.697	-100	Yes
5	10/9/1996	142	18	179	6.1	0.697	-99	Yes
5	10/10/1996	662	8	158	6.1	0.697	13	Yes
5	10/11/1996	873	12	282	6.1	0.697	-33	Yes
5	10/16/1997	465	15	315	6.1	0.697	-82	Yes
6	10/9/1996	20	20	-139	4.5	0.788	50	No
6	10/11/1996	268	7	139	4.5	0.788	18	Yes
6	10/16/1996	28	16	-92	4.5	0.788	-15	Yes
9	10/8/1996	51	9	50	4.6	0.749	-75	Yes
9	10/10/1996	-20	14	-133	4.6	0.749	5	No
9	10/10/1996	25	12	120	4.6	0.749	-114	Yes

ในปีเดียวกัน Chuanxin [39] ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่อง FWD โดยได้ทำการทดสอบผิวทางคอนกรีตเพื่อวัดค่าการยุบตัวแล้วจึงนำมาคำนวณหาค่า LTE โดยเลือกพิจารณาค่า LTE ที่อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 79 ถึง 94 จากการศึกษาพบว่า เมื่อค่า LTE ต่ำกว่าร้อยละ 80 มีโอกาสที่จะเกิดโพรงใต้รอยต่อของผิวทางคอนกรีตแต่ตำแหน่งหรือขนาดของโพรงไม่สามารถคาดการณ์ได้จากการประเมินด้วยวิธีนี้

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Arnold [40] ทำการศึกษาเกี่ยวกับเกณฑ์การประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจากคำแนะนำของ Croveti และ Darter (1985) Wade และคณะ (1997) และ Green (2002) ซึ่งทั้งสามงานวิจัยได้แนะนำเกณฑ์การพิจารณาโพรง เมื่อกราฟเส้นตรงตัดแกนของค่ายุบตัวที่ 50 75 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เมื่อพิจารณาจุดตัดแกนที่ 50 75 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ สามารถตรวจพบว่ามีโพรงเกิดขึ้นร้อยละ 60.5 50.0 และ 88.0 จากผิวทางคอนกรีตที่ทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกเกณฑ์สำหรับการประเมินโพรงมีความสำคัญสำหรับการประเมินเช่นกัน

และในปีเดียวกัน สำนักวิจัยและพัฒนางานทางของกรมทางหลวง [41] ได้ทำรายงานเกี่ยวกับการตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยใช้เครื่องมือสองชนิดด้วยกัน คือ เครื่อง FWD และเครื่อง GPR ในรายงานได้นำเสนอผลการตรวจวัดและอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตก่อนและหลังทำการทดสอบ (Sub-sealing) จากการศึกษาทำให้ทราบว่า การอุดซ่อมโพรงสามารถช่วยให้แผ่นพื้นคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้ดีขึ้นและยังส่งผลต่อการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อของแผ่นพื้นคอนกรีต (Load Transfer) ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ผลการตรวจวัดก่อนและหลังทำการอุดซ่อมโพรง [41]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2005 ชันวิน และ เสกชัย [42] ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจากเครื่องมือ FWD และใช้วิธีการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตตามที่ AASHTO ได้นำเสนอไว้ โดยทำการทดสอบสองจุดคือ ที่มุมแผ่นด้านซ้ายและที่กึ่งกลางแผ่นพื้นคอนกรีต จากการศึกษาทำให้ทราบว่า วิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกันสามารถนำมาตรวจหาโพรงได้ และยังพบอีกว่าโพรงเกิดขึ้นที่ใต้แผ่นพื้นขาออก (Leave Slab) มากกว่าแผ่นพื้นขาเข้า (Approach Slab) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้าง

ในปี ค.ศ. 2008 Applied Research Associates [43] ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินหาโรงแรงใต้ แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่องมือต่างๆ ในงานวิจัยได้เสนอให้มีการประเมินความสามารถของเครื่องมือ 4 ปัจจัย ได้แก่ ประสิทธิภาพ (Effectiveness) ความเป็นไปได้ (Feasibility) การทำลาย (Invasiveness) และประสิทธิภาพ (Efficiency) เพื่อให้สามารถเลือกใช้เครื่องมือให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยได้ข้อสรุปดังตารางที่ 2.3 จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบเครื่องมือในภาคสนามเพื่อประเมินความสามารถที่แท้จริงของเครื่องมือ และพบว่าเกณฑ์ในการให้คะแนนนั้นสามารถช่วยให้เลือกเครื่องมือที่เหมาะสมกับการใช้งานได้จริง โดยเราควรเลือกเครื่องมือจากประสิทธิผลและประสิทธิภาพ เนื่องจากบางพื้นที่สำรวจมีขนาดใหญ่หากเลือกเครื่องมือที่ทดสอบได้ซ้าก็จะทำให้การทำงานช้าตามไปด้วย

ตารางที่ 2.3 คะแนนและเกณฑ์การประเมินความสามารถของเครื่องมือต่างๆ [43]

Method	Effectiveness (0.4)	Feasibility (0.2)	Invasiveness (0.2)	Efficiency (0.2)	Total
Ground Penetrating Radar	3	2	3	3	2.8
AC Resistivity	3	2	3	3	2.8
Falling Weight Deflectometer	3	2	3	2	2.6
Surface Wave Seismic	3	2	2	2	2.4
Seismic Reflection	2	3	2	1	2.0
Seismic Refraction	2	3	2	1	2.0
Electromagnetic Induction	1	2	3	3	2.0
Infrared Imaging	1	2	3	3	2.0
Cross-hole Seismic Tomography	3	2	1	1	2.0
Electrical Resistance Tomography	3	2	1	1	2.0
Cross-hole Radar	3	2	1	1	2.0
Gravity	2	2	3	1	2.0
Cone Penetrometer Testing	3	1	0	1	1.6
Boring, Drilling, and Excavation	3	1	0	1	1.6

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Yan-hui และคณะ [44] ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดโรงแรงที่ตรวจวัดด้วยน้ำหนักขนาด 40 60 และ 80 กิโลนิวตัน เปรียบเทียบกับขนาดโรงแรงจากผลวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเมื่อขนาดของโรงแรงเปลี่ยนไป จะทำให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นเปลี่ยนไปเช่นกัน สำหรับการวิเคราะห์โรงแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการยึดติดกันของชั้นทางมากกว่าพฤติกรรมจริง ซึ่งการยึดติดกันของชั้นทางมีผลต่อจุดตัดแกนค่าการยุบตัวที่ใช้สำหรับการประเมินหาโรงแรงและขนาดของโรงแรง

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 กรมทางหลวงในส่วนของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง [45] ได้จัดทำคู่มือการสำรวจเพื่อหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต ซึ่งเป็นการต่อยอดจากเมื่อปี ค.ศ. 2004 โดยเนื้อหาในหนังสือเป็นวิธีในการวิเคราะห์หาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งบอกถึงวิธีการทดสอบ และวิธีคำนวณหาโพรง โดยแบ่งเป็นสามวิธีหลัก คือ การสำรวจด้วยสายตา (Visual Inspection) เพื่อประเมินความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตก่อนทำการทดสอบ การทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และการทดสอบด้วยเครื่อง GPR ดังรูปที่ 2.28



(ก) ตัวอย่างการประเมินด้วยสายตา



(ข) ตัวอย่างการทดสอบด้วยเครื่อง FWD

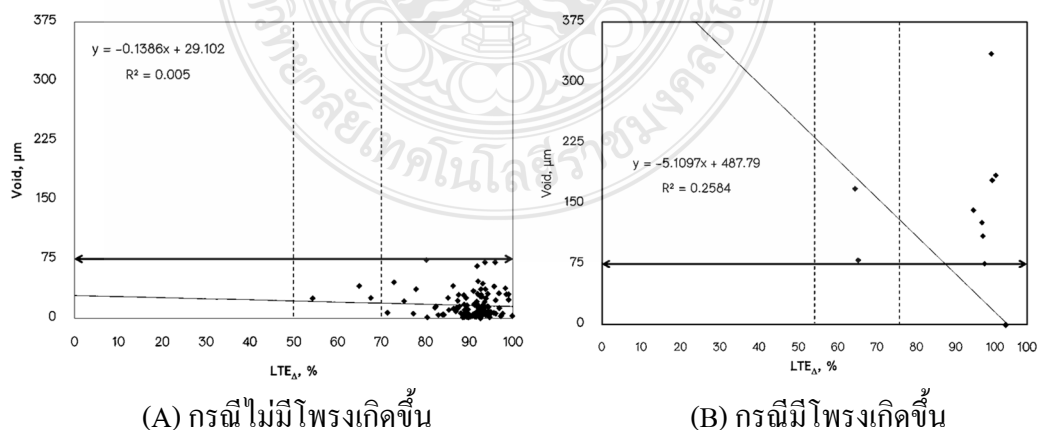
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างคู่มือการประเมินโพรงของกรมทางหลวงปี 2009 [45]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 Khaled และ Leanne [46] ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินหาโพรงด้วยเครื่องมือ FWD และใช้น้ำหนัก 40 กิโลนิวตัน กระทำที่กึ่งกลางแผ่นพื้นคอนกรีต ในการศึกษาเลือกใช้ VLCDA method จากการศึกษาทั้งสองท่านได้เสนอแนะให้ใช้ค่าการยุบตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ประมาณ 75 ไมโครเมตร และได้นำเสนอวิธีการเปรียบเทียบการทดสอบน้ำหนักกระทำที่กึ่งกลางแผ่นคอนกรีตระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กเดี่ยวและไม่มีการเสริมคังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การประเมิน โพรงจากค่าการยุบตัวที่กึ่งกลางแผ่นคอนกรีต [46]

Load Transfer	D0 (at center of the slab)	D0 (at slab corner)	D0 Function of thickness & load	D0 Normalized to 40 kN (for overlaid PCC must normalize to 20 °C or 70 °F)
Dowel	Example :	2.5 – 3 times measured	40 kN	≥ 187 – 225 microns
	75 microns (3 mils)	center deflection (D0)	(9,000 lbf)	(7.5 – 9.0 mils)
Non-Dowel	Example :	3.5 – 4 times measured	40 kN	≥ 262 – 300 microns
	75 microns (3 mils)	center deflection (D0)	(9,000 lbf)	(10.5 – 12.0 mils)

ในปี ค.ศ. 2012 จตุพล [47] ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า LTE กับ โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ทำการทดสอบกับสนามบินหาดใหญ่และสนามบินภูเก็ต โดยใช้เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบหนัก (HWD) ทดสอบที่กึ่งกลางแผ่นด้วยน้ำหนัก 220 กิโลนิวตัน และทดสอบที่มุมของแผ่นด้วยน้ำหนัก 3 ระดับ ได้แก่ 160 190 และ 220 กิโลนิวตัน จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า LTE กับ โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตนั้นหากใต้แผ่นพื้นคอนกรีตไม่มีโพรงเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LTE กับ โพรงนั้นไม่มีนัยสำคัญต่อกัน แต่หากใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีโพรงเกิดขึ้นความสัมพันธ์จึงเริ่มมีนัยสำคัญต่อกันมากขึ้น ดังรูปที่ 2.29

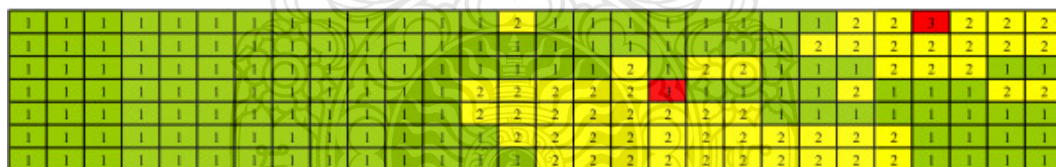


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ของการถ่วงน้ำหนักกับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต [47]

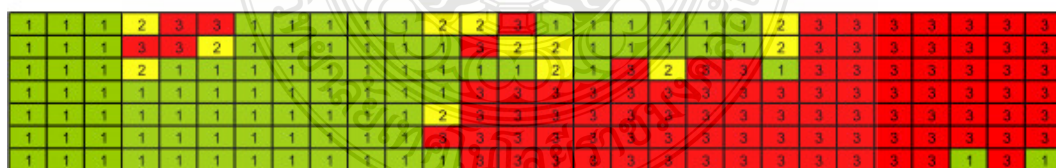
และในปี ค.ศ. 2014 Mathavan และคณะ [48] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำแผนภาพ เพื่อบอกสภาพรอยต่อของผิวทางคอนกรีต โดยในการศึกษาเลือกใช้เครื่องมือ FWD สำหรับวัดค่าการยุบตัว แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว ได้แก่ ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีต (Load Transfer Efficiency, LTE) โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต (Void Intercepts, VI) และค่าการยุบตัว (Absolute Deflection, D) จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ทั้งสามมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ ดังตารางที่ 2.5 แล้วจึงประมวลผลลัพธ์ออกมาเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.30 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์สองตัว คือ การถ่ายน้ำหนักกับค่าการยุบตัว ความแม่นยำของแผนภาพมีค่าประมาณร้อยละ 87.5 และเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งสามตัวความแม่นยำของแผนภาพมีค่าประมาณร้อยละ 65 ถึง 70

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การพิจารณาสภาพรอยต่อของผิวทางคอนกรีตของ Mathavan และคณะ [48]

Parameters	Good	Marginal	Poor
Load Transfer Efficiency (LTE) (%)	> 75%	50-75%	< 50%
Void Intercepts (VI) ( $\mu\text{m}$ )	< 25	25-50	> 50
Absolute Deflection (D) ( $\mu\text{m}$ )	< 200	201-225	> 225



Trained Network – based on the Three Category (LTE, VI and D) Average Ranking.



Trained network – based on the Three Category (LTE, VI and D) Worst Ranking.

รูปที่ 2.30 ตัวอย่างแผนภาพจากการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม [48]



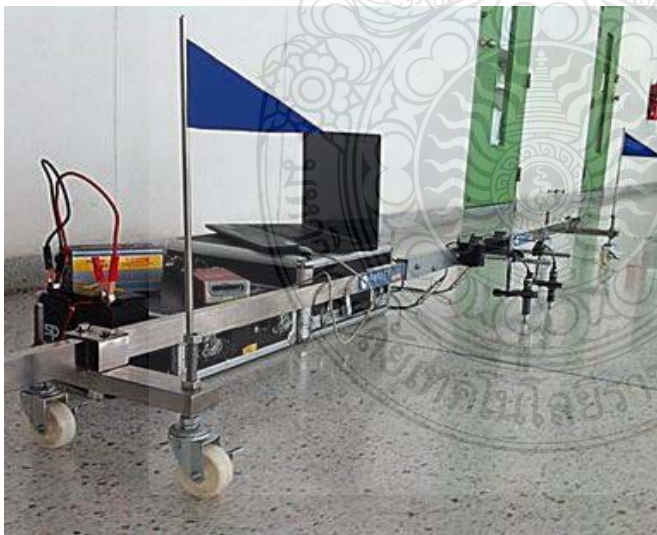


### 3.2 การพัฒนาเครื่อง port-LTE

จากความต้องการพัฒนาการประเมินสภาพผิวทางคอนกรีตแบบไม่ทำลาย โดยไม่ต้องปิดการจราจรหรือรบกวนการจราจรให้น้อยที่สุด นำไปสู่การคิดค้นและประดิษฐ์เครื่อง port-LTE ด้วยความมุ่งมั่นว่าเครื่องมือดังกล่าวจะสามารถตอบสนองกับการใช้งานที่ง่าย เหมาะกับทุกสภาพผิวทางคอนกรีต มีราคาต่ำและมีประสิทธิภาพในการทำงาน โดยลักษณะของเครื่อง port-LTE แสดงดังรูปที่ 3.1 (A) แต่เครื่องมือดังกล่าวยังขาดความสามารถในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ เนื่องจากไม่มีที่สำหรับจัดเก็บอุปกรณ์ของเครื่องมือ ในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาโครงสร้างสำหรับจัดเก็บอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 การออกแบบโครงสร้างจัดเก็บอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE

เป้าหมายในการออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือ คือ เพิ่มความสามารถการเคลื่อนที่ให้กับเครื่อง port-LTE พร้อมทั้งเพิ่มความสามารถของการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE ซึ่งจะทำให้มีความสะดวก ความคล่องตัวในการทำงาน และเหมาะกับงานใช้งานตามลักษณะของแต่ละพื้นที่มากขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบโครงสร้างจัดเก็บอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE เป็นโครงสร้างอลูมิเนียมลักษณะรถเข็น โดยโครงสร้างสำหรับจัดเก็บอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE ที่พัฒนาขึ้นจะแสดงดังรูปที่ 3.1 (B)



(A) โครงของเครื่อง port-LTE

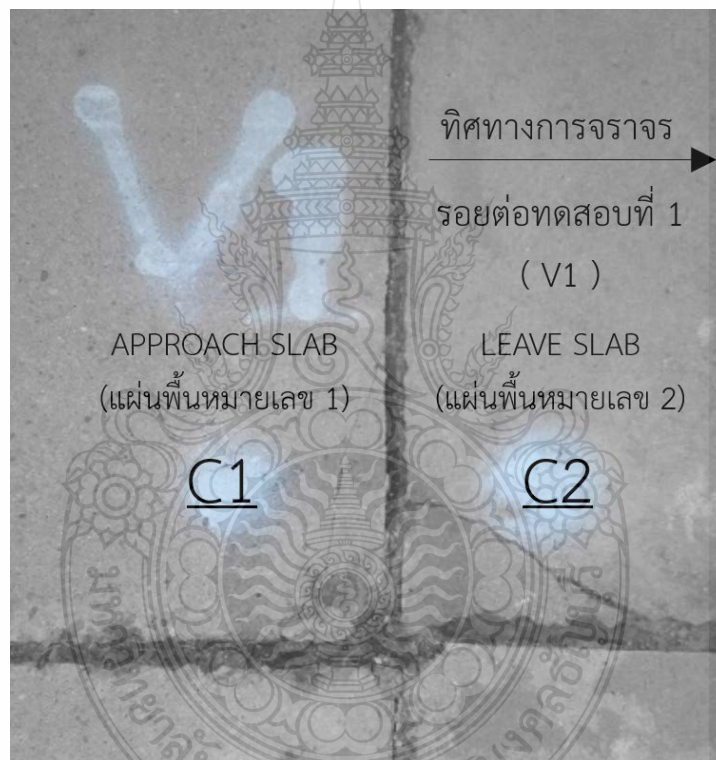


(B) โครงสำหรับจัดเก็บอุปกรณ์

รูปที่ 3.1 โครงของเครื่อง port-LTE

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบกับลานจอดรถยนต์ผิวทางคอนกรีตชนิดที่มีรอยต่อตามขวาง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยได้ดำเนินการทดสอบกับรอยต่อ 5 ตำแหน่ง (V1 ถึง V5) บนแผ่นพื้นคอนกรีต 10 แผ่น (แผ่นพื้น C1 ถึง C10) ตัวอย่างของรอยต่อทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยตำแหน่งของรอยต่อทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก สำหรับการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบด้วยเครื่อง LWD การทดสอบด้วยเครื่อง port-LTE รูปแบบน้ำหนักสถิต (Static) และการทดสอบด้วยเครื่อง port-LTE รูปแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ (Dynamic) รายละเอียดการทดสอบมีดังต่อไปนี้



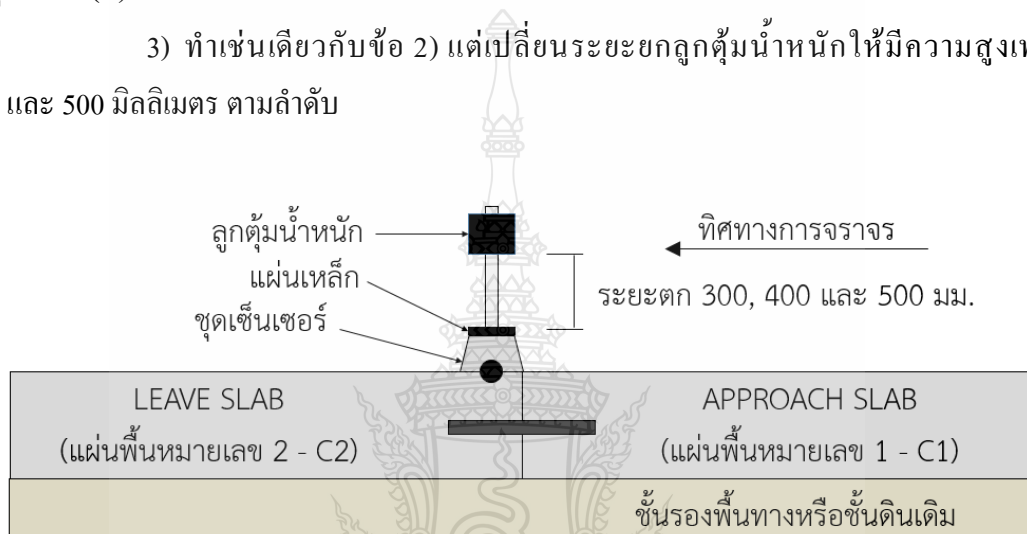
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

### 3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

1) ทำการติดตั้งเครื่อง LWD ในบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตซึ่งรายละเอียดของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3 (A)

2) ยกตุ้มน้ำหนักขึ้นให้มีความสูงเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ปล่อยตุ้มน้ำหนักลงกระทบกับแผ่นเหล็ก บันทึกขนาดของแรงและค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักกระทำนั้น ดังรูปที่ 3.3 (B)

3) ทำเช่นเดียวกับข้อ 2) แต่เปลี่ยนระยะยกตุ้มน้ำหนักให้มีความสูงเท่ากับ 400 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ



(A) รายละเอียดการทดสอบด้วยเครื่อง LWD



(B) การทดสอบด้วยเครื่อง LWD

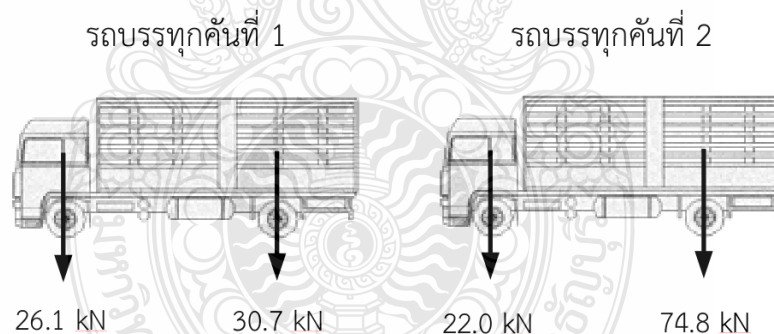
### รูปที่ 3.3 ขั้นตอนและการทดสอบภาคสนามด้วยเครื่อง LWD

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่อง port-LTE

1) เตรียมรถบรรทุกขนาดมาตรฐาน 2 เพลา 6 ล้อ จำนวน 2 คัน ดังรูปที่ 3.4 (A) โดยที่รถบรรทุกทั้งสองคันต้องมีน้ำหนักเพลาหน้าและเพลาหลังที่แตกต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้รถบรรทุกคันที่ 1 ซึ่งมีน้ำหนักเพลาหน้าเท่ากับ 26.1 กิโลนิวตัน (2,665 กิโลกรัม) และเพลาหลังเท่ากับ 30.7 กิโลนิวตัน (3,135 กิโลกรัม) ส่วนรถบรรทุกคันที่ 2 มีน้ำหนักเพลาหน้าเท่ากับ 22.0 กิโลนิวตัน (2,245 กิโลกรัม) และเพลาหลังเท่ากับ 74.8 กิโลนิวตัน (7,625 กิโลกรัม) ดังรูปที่ 3.4 (B)



(A) รถบรรทุก 2 เพลา 6 ล้อที่ใช้ทำการทดสอบ



(B) น้ำหนักเพลาหน้าและเพลาหลังของรถบรรทุกที่ใช้ทำการทดสอบ

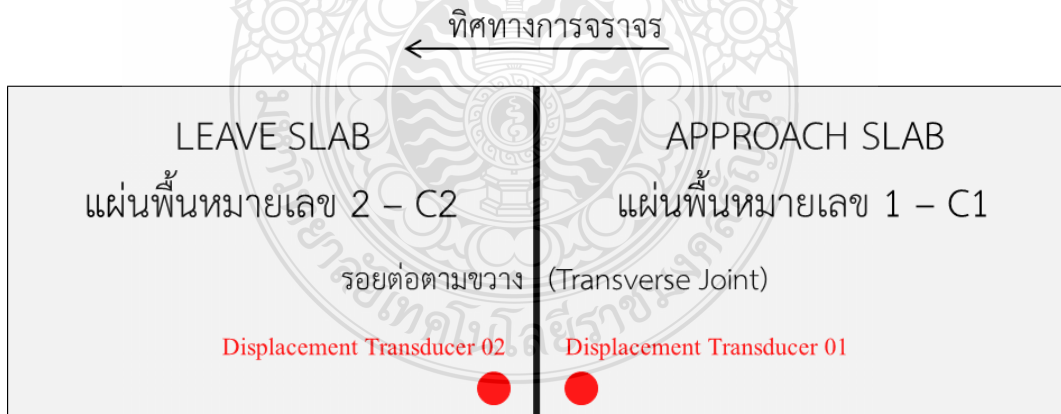
### รูปที่ 3.4 รถบรรทุกสำหรับทดสอบ

2) เตรียมอุปกรณ์ของเครื่อง port-LTE ได้แก่ ชุดอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว ชุดอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ อุปกรณ์สำหรับบันทึกค่า DC-204R แบตเตอรี่ หรือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ ไม้วัดระดับน้ำ คอมพิวเตอร์ติดตั้งโปรแกรม DC-7204 และ โปรแกรม Raptre Vibration Analysis และ โครงของเครื่อง port-LTE ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เตรียมอุปกรณ์และติดตั้งเครื่อง port-LTE

3) กำหนดตำแหน่งทดสอบ โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวในตำแหน่งระหว่างรอยต่อของมุมของแผ่นพื้นคอนกรีต ให้อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวหมายเลข 1 อยู่บนแผ่นพื้นคอนกรีตหมายเลข 1 และอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวหมายเลข 2 อยู่บนแผ่นพื้นคอนกรีตหมายเลข 2 ดังรูปที่ 3.6



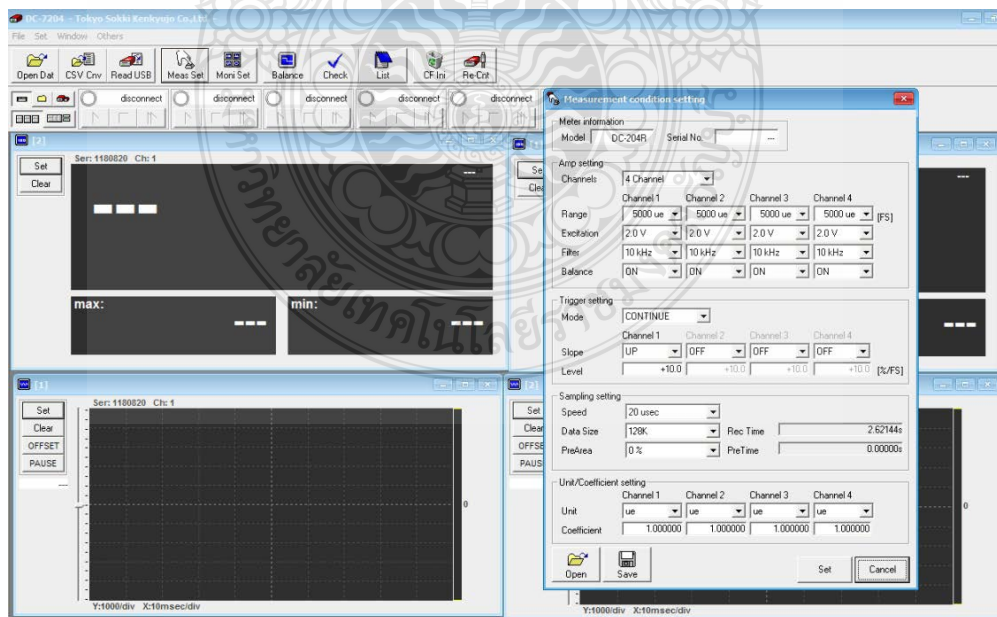
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว

4) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวหมายเลข 1 และ 2 ตามข้อที่ 3 เรียบร้อยแล้วให้ทำการวัดแนวระดับของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวให้เท่ากันด้วยไม้ระดับ ดังรูปที่ 3.7



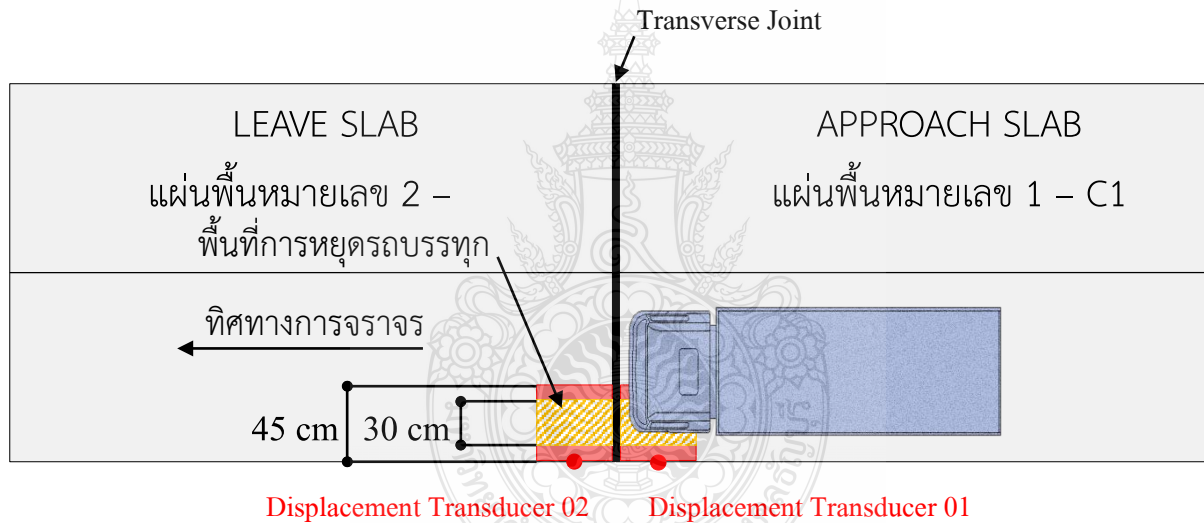
รูปที่ 3.7 วัดระดับของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวด้วยไม้ระดับน้ำ

5) เปิดคอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุม DC-7204 ดังรูปที่ 3.8 ทำการตั้งค่าโปรแกรมและสังเกตการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวที่บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หากมีความผิดปกติเกิดขึ้นให้ตรวจสอบสายเคเบิ้ลว่าเชื่อมต่อถูกต้องหรือไม่ เมื่อพร้อมให้จักรบรรทุกในตำแหน่งที่ได้กำหนด โดยให้รถบรรทุกเริ่มเคลื่อนออกจากผิวทางคอนกรีตที่ไม่ได้ต้องการทดสอบเพื่อไม่ให้แผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำการทดสอบได้รับผลกระทบจากน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกและดำเนินการทดสอบวัดค่าการยุบตัวของผิวทางคอนกรีต



รูปที่ 3.8 การตั้งค่าโปรแกรมควบคุม DC-7204

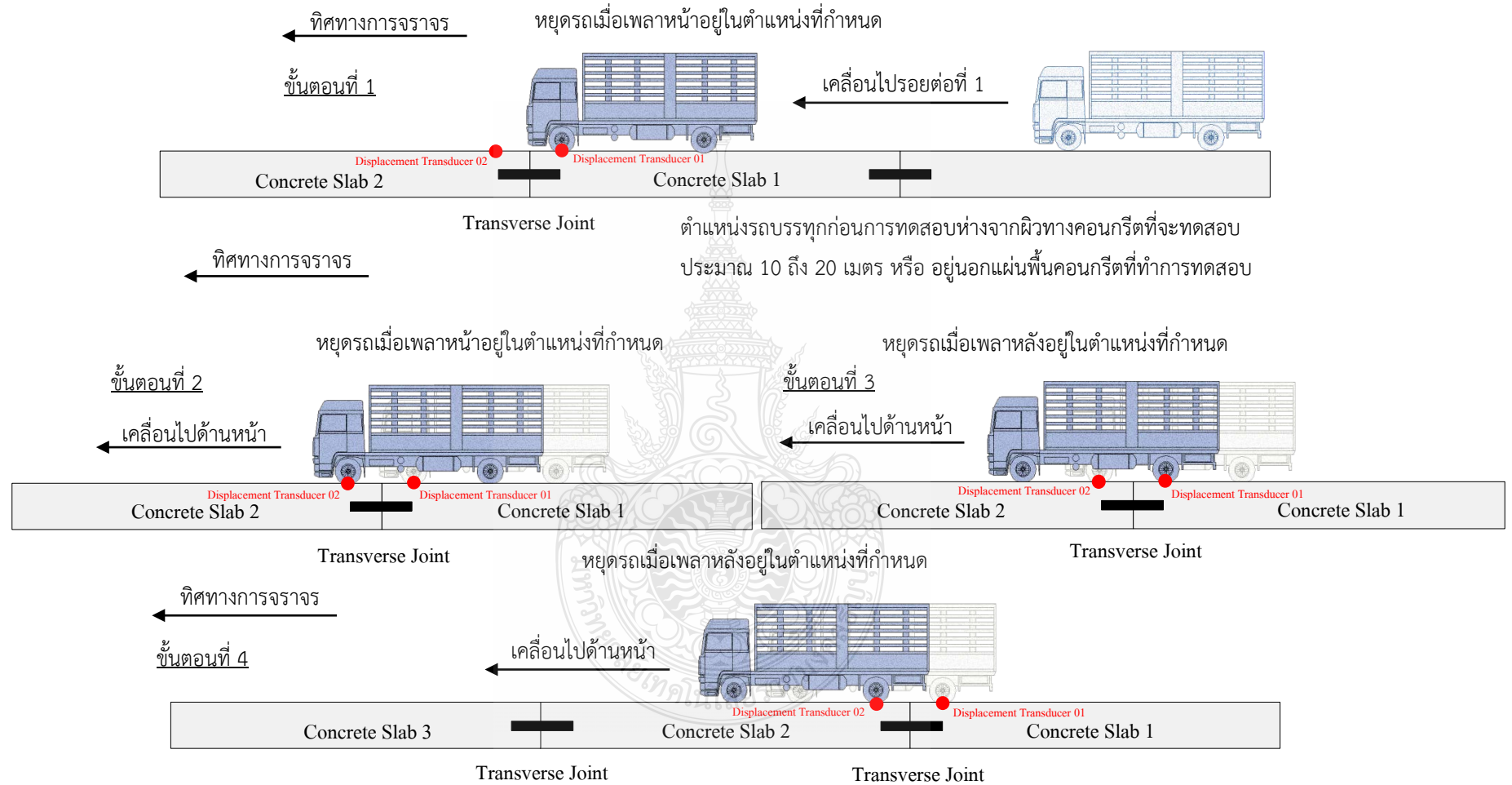
6) เริ่มทำการทดสอบแบบน้ำหนักสถิต เคลื่อนที่รถบรรทุกจากตำแหน่งที่กำหนดไปยังรอยต่อ ให้เคลื่อนรถบรรทุกจนกระทั่งล้ออยู่ในตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3.9 แล้วจึงหยุดรถบรรทุกเพื่อวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของเพลารถบรรทุก เมื่อหยุดรถบรรทุกให้สังเกตค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นบนหน้าจocomพิวเตอร์ ให้หยุดรถจนกระทั่งค่าการยุบตัวคงที่ เมื่อวัดค่าเสร็จให้ทำการเคลื่อนที่รถบรรทุกตามขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 3.10



การหยุดรถจะต้องให้ล้อรถอยู่ในพื้นที่ที่กำหนดไว้

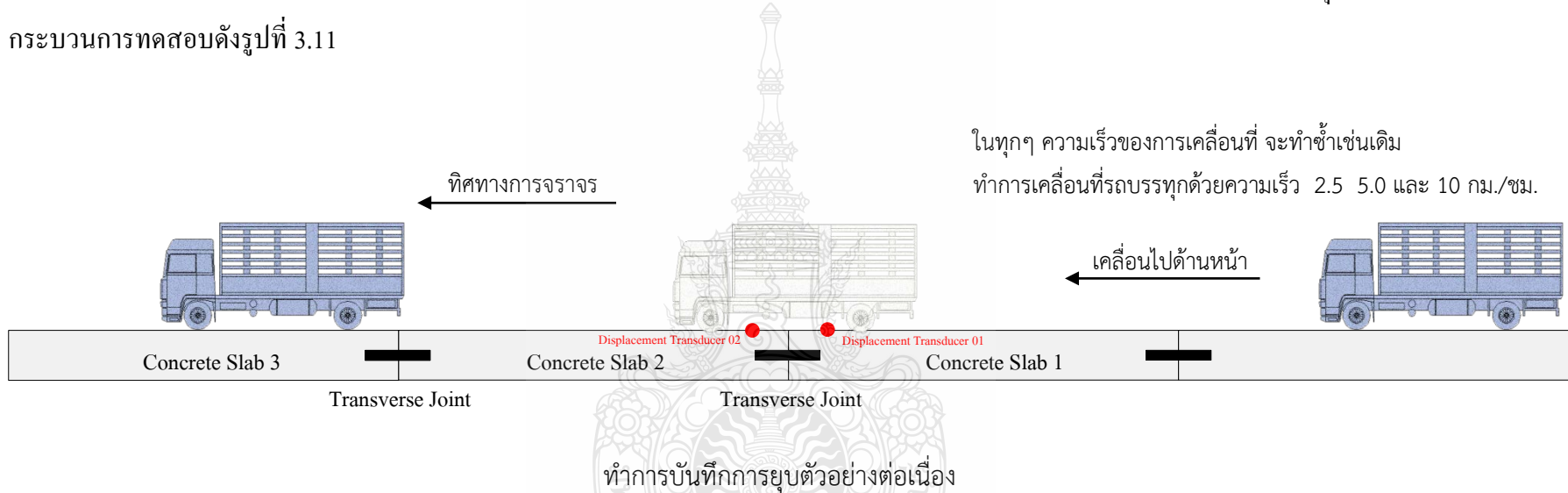
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของการหยุดรถบรรทุก





รูปที่ 3.10 การจักรรถบรรทุกและการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกแบบน้ำหนักสถิต

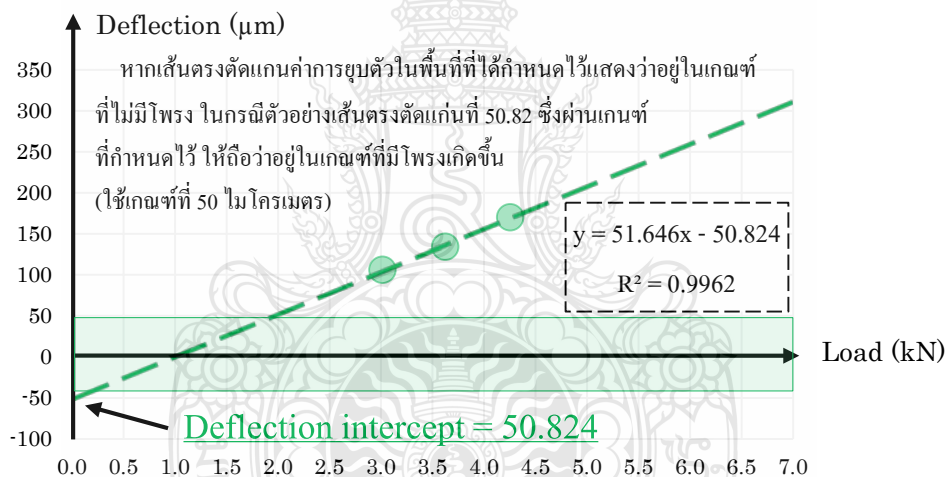
7) ทำการทดสอบแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ ให้ใช้รถบรรทุกคันเดิมที่ใช้ทำการทดสอบแบบน้ำหนักสถิต เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังแผ่นพื้นทดสอบด้วยความเร็ว 2.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จนกระทั่งเพลาล้ออยู่นอกตำแหน่งของแผ่นพื้นทดสอบ ให้ทำการถอยหลังด้วยความเร็วเช่นเดิมโดยให้ทำซ้ำเช่นเดิมอย่างน้อย 2 รอบ แล้วจึงเปลี่ยนความเร็วทดสอบเป็น 5 และ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทำการบันทึกค่าการยุบตัวอย่างต่อเนื่องจนจบกระบวนการทดสอบดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การจักรรถบรรทุกและการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกแบบน้ำหนักเคลื่อนที่

### 3.4 แนวทางการวิเคราะห์และประมวลผล

ผลการตรวจวัดค่าการยุบตัวของกระบวนทดสอบภาคสนามของเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต สำหรับการวิเคราะห์โพรงจะวิเคราะห์จากค่ายุบตัวที่มุมแผ่นคอนกรีตด้วย VLCDA method และเลือกใช้จุดตัดแกนค่าการยุบตัวเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ตามข้อแนะนำของ AASHTO เป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาโพรงแสดงดังรูปที่ 3.12 เนื่องจากเครื่อง LWD เป็นเครื่องมือทดสอบที่มีมาตรฐานรองรับและมีการใช้งานอยู่ในหลายประเทศ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบของเครื่อง LWD เป็นค่าอ้างอิงความถูกต้องของผลการทดสอบจากเครื่อง port-LTE พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาโพรงของเครื่องมือทั้งสอง เพื่อสรุปผลวิเคราะห์และข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาโพรงด้วย VLCDA method

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์และวิจัย

#### 4.1 ผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีต

ผลการทดสอบนี้ เป็นผลการทดสอบที่ได้จากการตรวจวัดค่าการยุบตัวจากลานจอดรถยนต์ผิวทางคอนกรีตชนิดที่มีรอยต่อตามขวาง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยดำเนินการทดสอบกับรอยต่อ 5 ตำแหน่ง (V1 ถึง V5) บนแผ่นพื้นคอนกรีต 10 แผ่น (แผ่นพื้น C1 ถึง C10) ด้วยเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE รูปแบบน้ำหนักสถิตและรูปแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ โดยผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD

ผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD จะแสดงดังตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาการคำนวณค่าการยุบตัวตามสมการที่ 2.1 พบว่า เมื่อคำนวณค่าการยุบตัวจากผิวทางคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเท่ากัน หากมีน้ำหนักกระทำกับแผ่นพื้นคอนกรีตมากขึ้น ค่าการยุบตัวที่คำนวณได้จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จากนิยามดังกล่าวจึงนำมาใช้เพื่อพิจารณาความถูกต้องของค่าการยุบตัวที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง LWD ซึ่งพบว่า ค่าการยุบตัวที่ตรวจวัดจากเครื่อง LWD มีความถูกต้องตามนิยามของสมการที่ 2.1

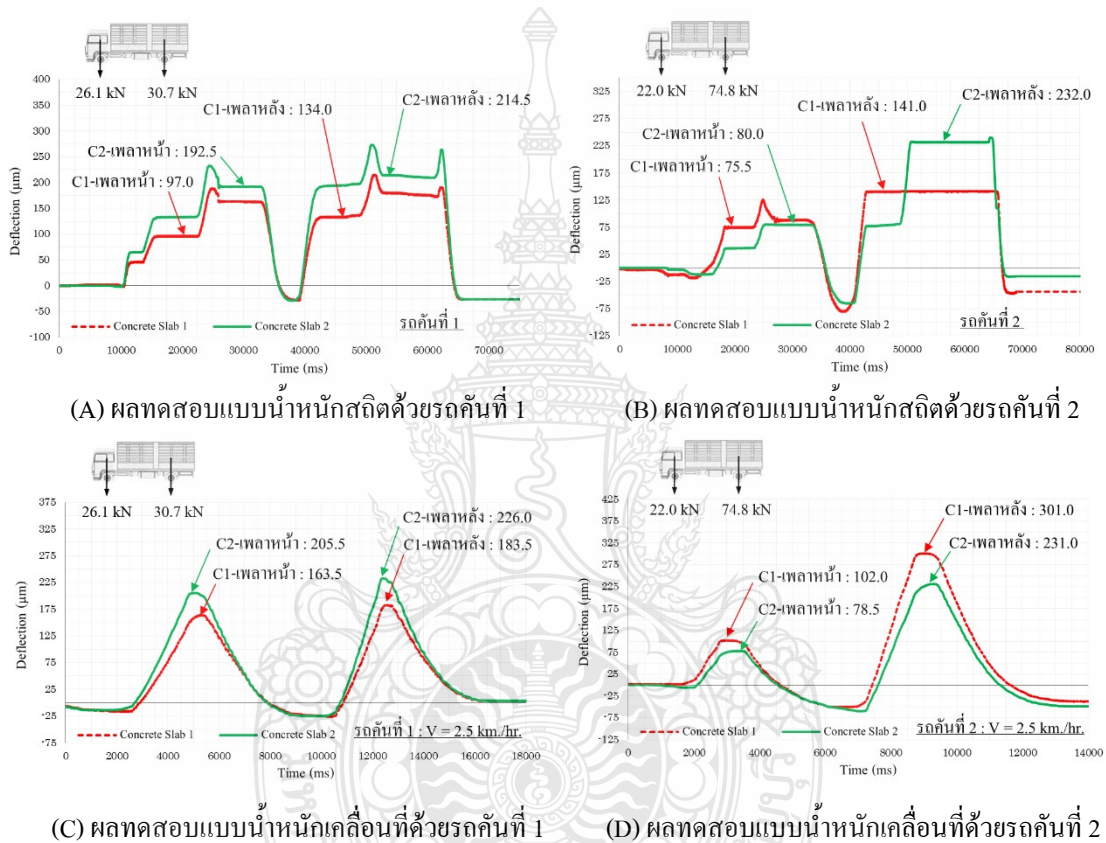


ตารางที่ 4.1 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD ที่แผ่นพื้นคอนกรีต C1 ถึง C10

แผ่น	ระยะตก (มม.)	แรง (กิโลนิวตัน)	ค่าการยุบตัว (ไมโครเมตร)
C1	300	3.014	106.0
	400	3.623	134.0
	500	4.254	170.0
C2	300	3.035	108.0
	400	3.604	129.0
	500	4.113	164.0
C3	300	3.026	94.0
	400	3.612	96.0
	500	4.120	130.0
C4	300	3.048	96.0
	400	3.616	160.0
	500	4.293	165.0
C5	300	3.049	115.0
	400	3.603	121.0
	500	4.131	162.0
C6	300	3.052	114.0
	400	3.626	115.0
	500	4.113	164.0
C7	300	3.054	91.0
	400	3.598	103.0
	500	4.129	116.0
C8	300	3.072	102.0
	400	3.663	120.0
	500	4.203	157.0
C9	300	3.059	92.0
	400	3.574	110.0
	500	4.116	119.0
C10	300	3.052	82.0
	400	3.562	91.0
	500	4.122	111.0

#### 4.1.2 ผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE

การวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE ใช้รถบรรทุกสองคันที่มีน้ำหนักเพลาแตกต่างกัน โดยวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักเพลาบรรทุกทุกด้วยรูปแบบน้ำหนักสถิตและรูปแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ ตัวอย่างผลการวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยผลการทดสอบด้วยเครื่อง port-LTE ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

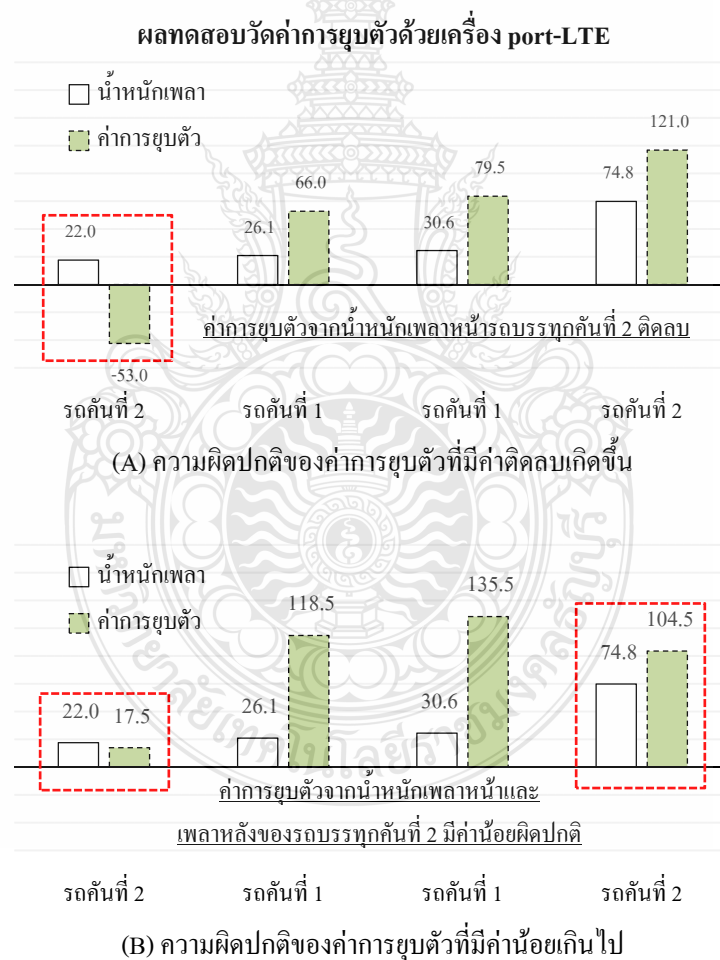


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE

เมื่อพิจารณาถึงความถูกต้องของค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตและแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ตามสมการที่ 2.1 เช่นเดียวกับที่พิจารณาผลทดสอบจากเครื่อง LWD พบว่าผลการทดสอบจากเครื่อง port-LTE มีผลบางส่วนที่ไม่เป็นไปตามนิยามของสมการที่ 2.1 กล่าวคือเมื่อใช้น้ำหนักมากขึ้นค่าการยุบตัวกลับไม่มากขึ้นและพบว่าค่าการยุบตัวบางข้อมูลมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการยกตัวขึ้นของแผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตที่ต้องการศึกษา

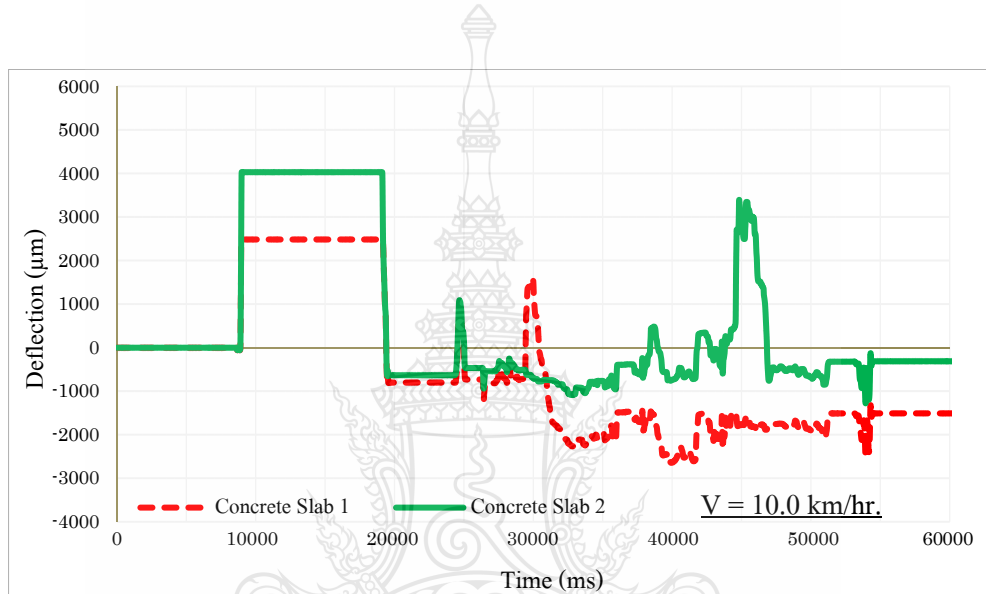
จึงนำค่าการยุบตัวดังกล่าวมาเขียนเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.2 เพื่อพิจารณาถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับผลทดสอบ ซึ่งพบว่า ค่าการยุบตัวมีค่าเป็นลบและบางตำแหน่งมีค่าน้อยผิดปกติ โดยค่าการยุบตัวดังกล่าวเกิดขึ้นกับผลทดสอบของรถบรรทุกครั้งที่ 2 ทั้งกรณีการทดสอบด้วยน้ำหนักสถิตและน้ำหนักเคลื่อนที่ โดยรถบรรทุกครั้งที่ 2 มีน้ำหนักของเพลาน้ำและเพลาลังแตกต่างกันถึง 52.8 กิโลนิวตัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการรบกวนจากน้ำหนักเพลาลังเมื่อวัดค่าการยุบตัวด้วยน้ำหนักเพลาน้ำ

เนื่องจากค่าการยุบตัวบางส่วนเกิดความผิดปกติและไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการยุบตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต จึงไม่นำค่าการยุบตัวดังกล่าวที่เป็นลบหรือมีค่าน้อยผิดปกติไปพิจารณาโปรแกรมด้วย VLCDA method



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE ที่ผิดปกติ

นอกจากนี้ผลการทดสอบจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม. เกิดความผิดปกติของผลจากการทดสอบขึ้น ลักษณะความผิดปกติดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของเครื่อง port-LTE กับความเร็วที่ใช้สำหรับการทดสอบ โดยหากมีการใช้ความเร็วทดสอบที่สูงเกินไป อาจทำให้การวัดค่าขยุบตัวของเครื่อง port-LTE เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นความเร็วที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 10 กม./ชม. จึงอาจไม่เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบร่วมกับเครื่อง port-LTE

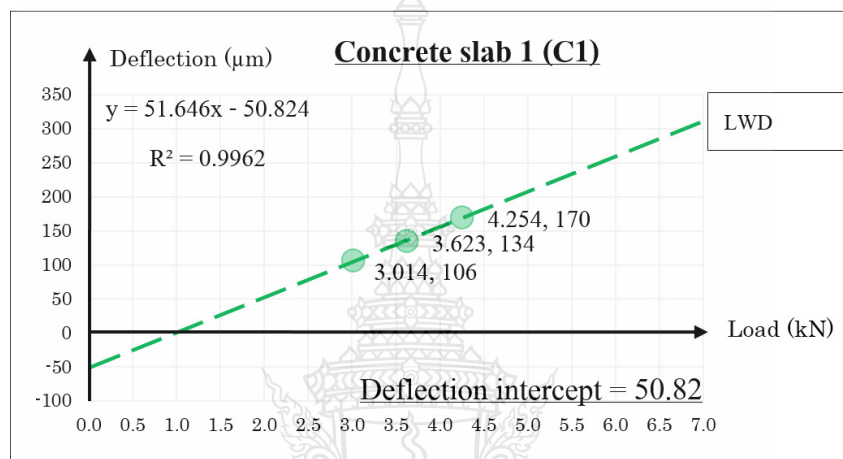


รูปที่ 4.3 ผลทดสอบที่ผิดปกติจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.

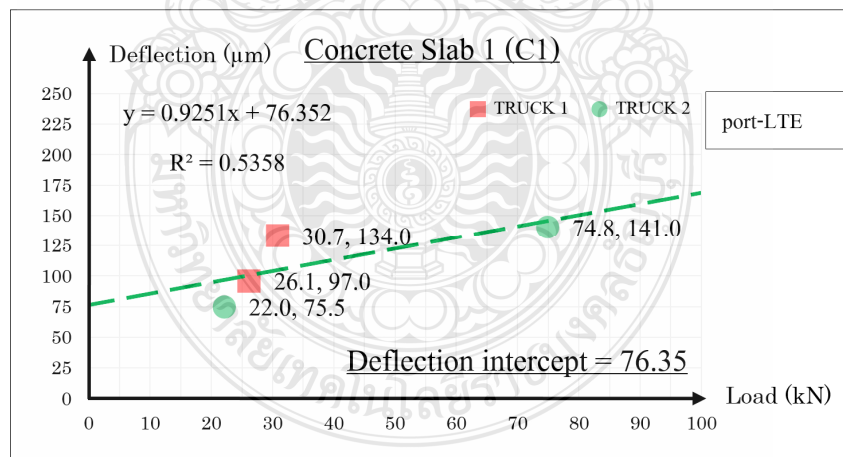


## 4.2 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE

นำค่าการยุบตัวที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง LWD และ port-LTE ไปประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วย VLCDA method และเลือกใช้เกณฑ์ที่ 50 ไมโครเมตร เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาหาโพรง โดยตัวอย่างการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจากผลทดสอบของเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE แสดงดังรูปที่ 4.4 และผลการประเมินหาโพรงทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ค



(A) ผลการประเมินหาโพรงด้วย VLCDA method จากผลของเครื่อง LWD



(B) ผลการประเมินหาโพรงด้วย VLCDA method จากผลของเครื่อง port-LTE

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการประเมินหาโพรงจากผลทดสอบของเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE

เนื่องจากเครื่อง LWD เป็นเครื่องมือที่มีมาตรฐานรองรับ จึงใช้ผลการประเมินหาโพรงจากเครื่อง LWD เป็นเกณฑ์อ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินหาโพรงจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตและแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ โดยผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตและแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และผลการพิจารณาความสอดคล้องของเครื่องมือทั้งสอง แสดงดังตารางที่ 4.2

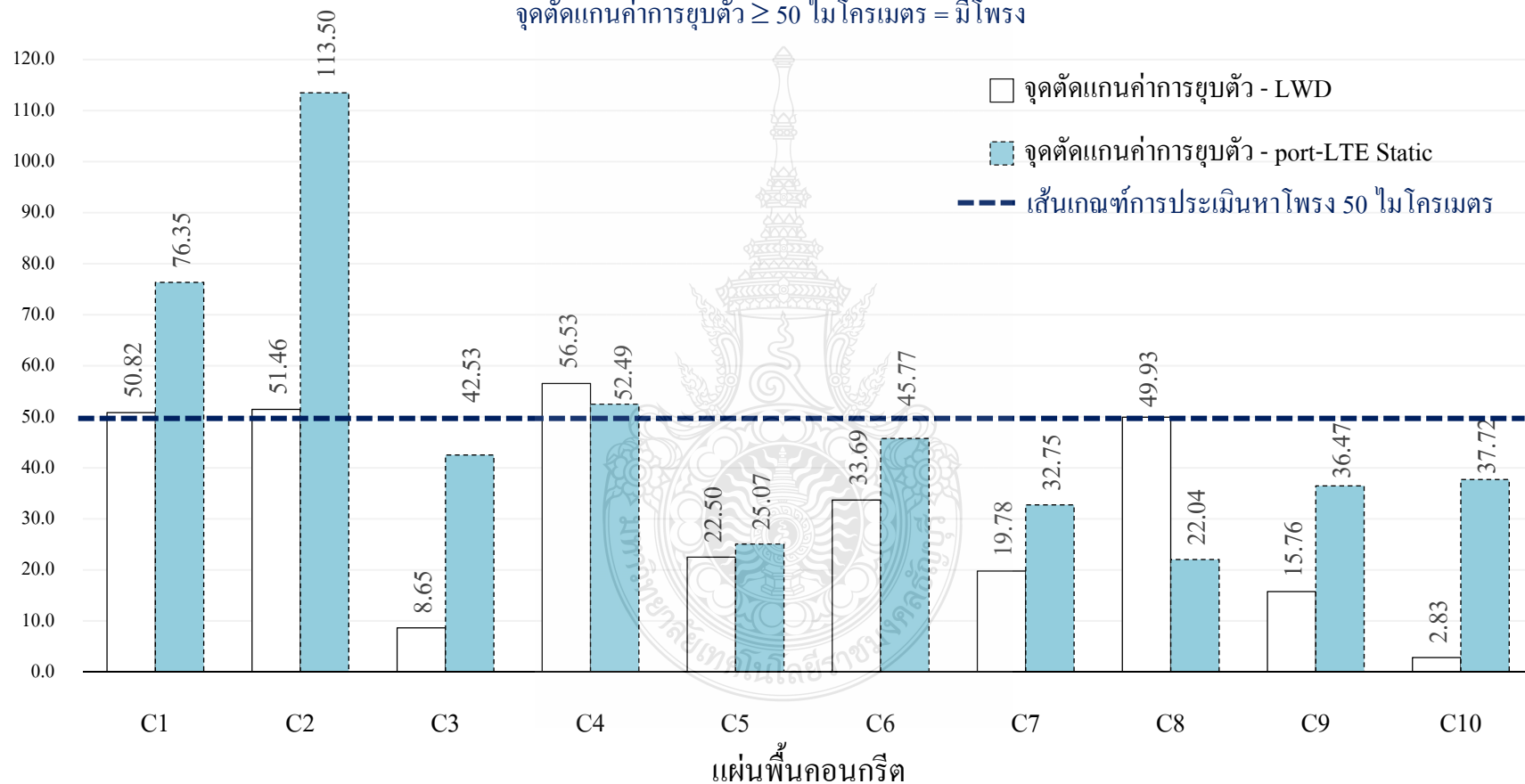
ผลเปรียบเทียบการประเมินหาโพรงด้วยวิธี VLCDA method ระหว่างเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตจากรูปที่ 4.5 พบว่า เครื่องมือทั้งสองให้ผลการประเมินหาโพรงสอดคล้องกันทุกแผ่นพื้น กล่าวคือ เครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE ให้ผลลัพธ์ว่าที่ตำแหน่งแผ่นพื้นคอนกรีต C1 C2 และ C4 อยู่ในเกณฑ์ที่มีโพรงและแผ่นพื้นอื่นๆอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่มีโพรงเหมือนกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตสามารถนำมาประยุกต์ในทดสอบเพื่อประเมินหาโพรงได้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วย VLCDA method ได้

ผลเปรียบเทียบการประเมินหาโพรงด้วยวิธี VLCDA method ระหว่างเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่จากรูปที่ 4.6 พบว่า เครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม. ให้ผลการประเมินหาโพรงสอดคล้องกับเครื่อง LWD ทุกแผ่นพื้น ส่วนกรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 และ 10 กม./ชม. ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับเครื่อง LWD เฉพาะในตำแหน่งรอยต่อที่ 3 4 และ 5 เท่านั้น



เปรียบเทียบผลวิเคราะห์หาโพรงจากผลทดสอบ LWD กับ port-LTE แบบน้ำหนักรถสถิต

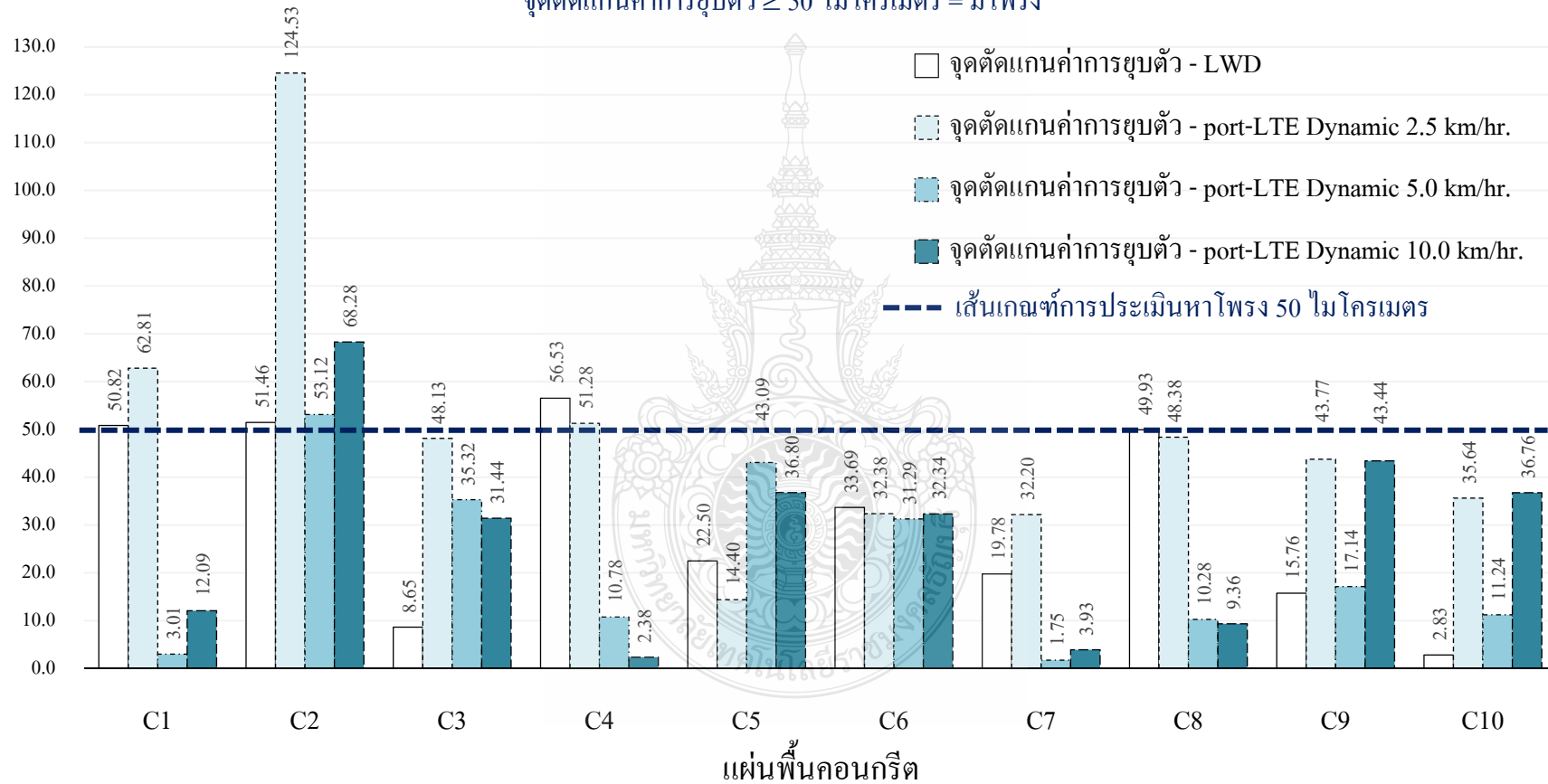
จุดตัดเกณฑ์การขุดตัว  $\geq 50$  ไมโครเมตร = มีโพรง



รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD เทียบกับ port-LTE แบบน้ำหนักรถสถิต

## เปรียบเทียบผลวิเคราะห์หาโพรงจากผลทดสอบ LWD กับ port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่

จุดตัดเกณฑ์การยุบตัว  $\geq 50$  ไมโครเมตร = มีโพรง

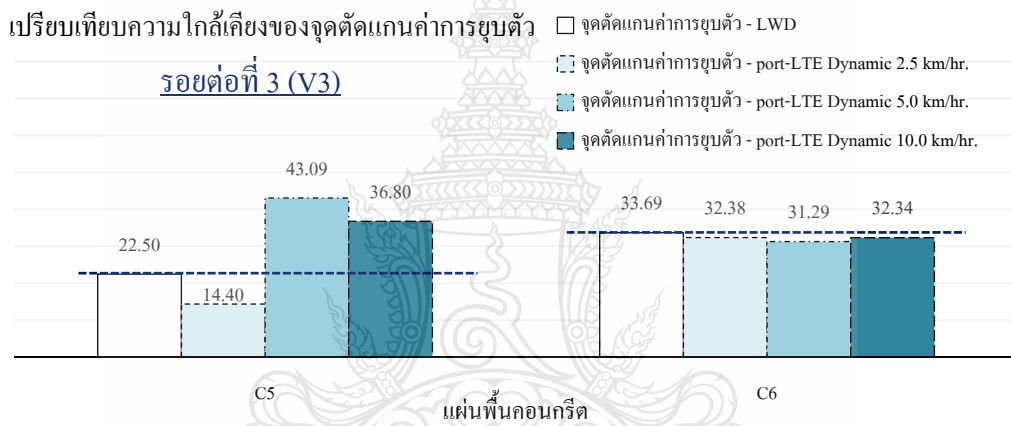


รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์หาโพรงจากเครื่อง LWD เทียบกับ port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่

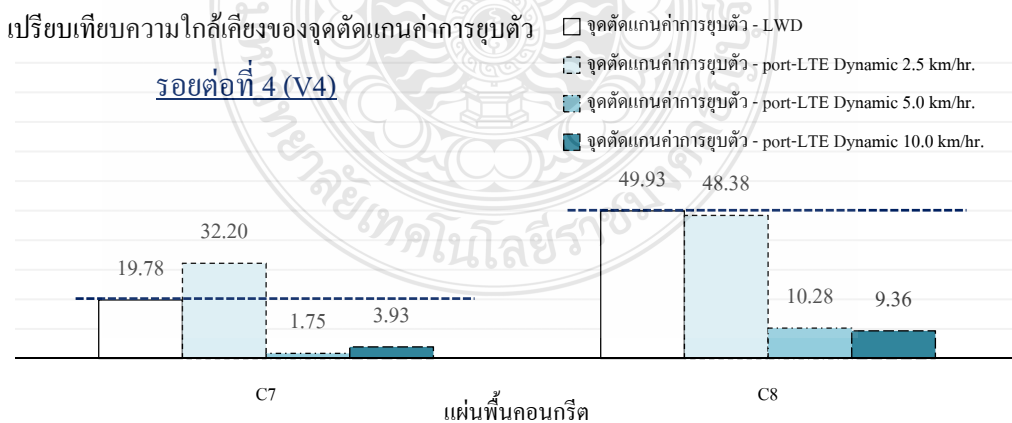
ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินหาโพรงและพิจารณาความสอดคล้องของเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE จากการทดสอบที่รอยต่อ V1 ถึง V5

แผ่น	เครื่อง LWD		เครื่อง port-LTE แบบ น้ำหนักสถิต		เครื่อง port-LTE แบบน้ำหนัก เคลื่อนที่ 2.5 กม./ชม.		เครื่อง port-LTE แบบน้ำหนัก เคลื่อนที่ 5.0 กม./ชม.		เครื่อง port-LTE แบบน้ำหนัก เคลื่อนที่ 10.0 กม./ชม.	
	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว	โพรง	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว	โพรง	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว	โพรง	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว	โพรง	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว	โพรง
	C1	50.82	มี	76.35	มี	62.81	มี	3.01	ไม่มี	12.09
C2	51.46	มี	113.50	มี	124.53	มี	53.12	มี	68.28	มี
เปรียบเทียบกับเครื่อง LWD			สอดคล้อง		สอดคล้อง		ไม่สอดคล้อง		ไม่สอดคล้อง	
C3	8.65	ไม่มี	42.53	ไม่มี	48.13	ไม่มี	35.32	ไม่มี	31.44	ไม่มี
C4	56.53	มี	52.49	มี	51.28	มี	10.78	ไม่มี	2.38	ไม่มี
เปรียบเทียบกับเครื่อง LWD			สอดคล้อง		สอดคล้อง		ไม่สอดคล้อง		ไม่สอดคล้อง	
C5	22.50	ไม่มี	25.07	ไม่มี	14.40	ไม่มี	43.09	ไม่มี	36.80	ไม่มี
C6	33.69	ไม่มี	45.77	ไม่มี	32.38	ไม่มี	31.29	ไม่มี	32.34	ไม่มี
เปรียบเทียบกับเครื่อง LWD			สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง	
C7	19.78	ไม่มี	32.75	ไม่มี	32.20	ไม่มี	1.75	ไม่มี	3.93	ไม่มี
C8	49.93	ไม่มี	22.04	ไม่มี	48.38	ไม่มี	10.28	ไม่มี	9.36	ไม่มี
เปรียบเทียบกับเครื่อง LWD			สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง	
C9	15.76	ไม่มี	36.47	ไม่มี	43.77	ไม่มี	17.14	ไม่มี	43.44	ไม่มี
C10	2.83	ไม่มี	37.72	ไม่มี	35.64	ไม่มี	11.24	ไม่มี	36.76	ไม่มี
เปรียบเทียบกับเครื่อง LWD			สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง		สอดคล้อง	

เนื่องจากผลการประเมินหาโพรงที่ตำแหน่งรอยต่อ 3 4 และ 5 จากเครื่อง port-LTE แบบนำหนักเคลื่อนที่ให้ผลสอดคล้องกับเครื่อง LWD ทุกความเร็ว จึงพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความใกล้เคียงของจุดตัดแกนค่าการขยับตัว ดังรูปที่ 4.7 พบว่า จุดตัดแกนค่าการขยับตัวที่ตำแหน่งรอยต่อที่ 3 และ 4 จากความเร็วที่ 2.5 กม./ชม. มีค่าใกล้เคียงกับจุดตัดแกนค่าการขยับตัวจากเครื่อง LWD มากกว่าความเร็วอื่น ส่วนตำแหน่งรอยต่อที่ 5 ความเร็วที่ 5.0 กม./ชม. มีค่าใกล้เคียงที่สุด โดยภาพรวมแสดงให้เห็นว่า เครื่อง port-LTE แบบนำหนักเคลื่อนที่ที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อประเมินหาโพรงได้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วย VLCD method ได้ โดยความเร็วที่เหมาะสมสำหรับใช้งานร่วมกับเครื่อง port-LTE อยู่ที่ประมาณ 2.5 กม./ชม.

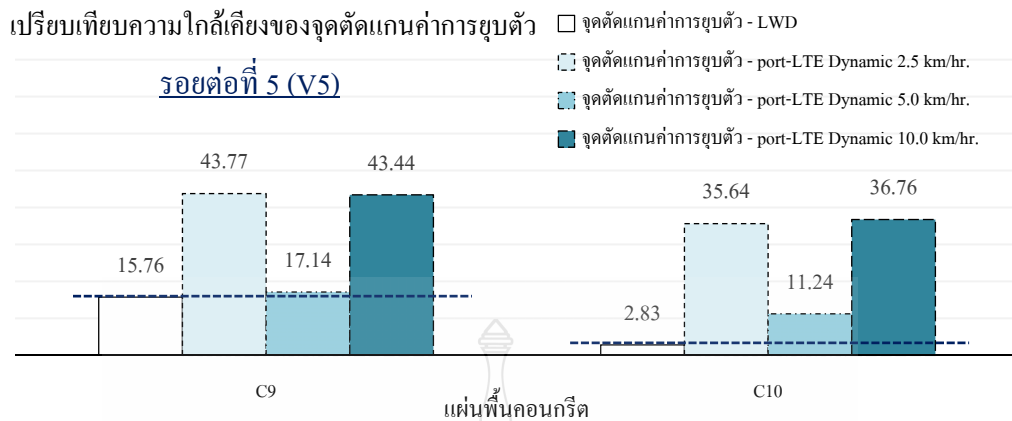


(A) เปรียบเทียบจุดตัดแกนค่าการขยับตัวที่ตำแหน่งรอยต่อ 3 (V3)



(B) เปรียบเทียบจุดตัดแกนค่าการขยับตัวที่ตำแหน่งรอยต่อ 4 (V4)

รูปที่ 4.7 วิเคราะห์จุดตัดแกนค่าการขยับตัวจากเครื่อง port-LTE แบบนำหนักเคลื่อนที่



(C) เปรียบเทียบจุดตัดแกนค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งรอยต่อ 5 (V5)

#### รูปที่ 4.7 วิเคราะห์จุดตัดแกนค่าการยุบตัวจากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ (ต่อ)

### 4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดค่าการยุบตัวของเครื่อง port-LTE

เมื่อเปรียบเทียบผลจากเครื่อง LWD กับเครื่อง port-LTE จะเห็นว่าค่าการยุบตัว หรือผลวิเคราะห์โพรงมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1) ลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ใช้ทำการทดสอบทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้การวัดค่าการยุบตัวของเครื่อง port-LTE มีความแปรผันของข้อมูลเกิดขึ้น โดยเฉพาะอิทธิพลของน้ำหนักจากเพลาน้ำหนักและเพลาลังขณะทำการทดสอบ ในขณะที่เครื่อง port-LTE วัดค่าการยุบตัวจากน้ำหนักเพลาน้ำหนักอาจมีการรบกวนจากน้ำหนักของเพลาลังที่อยู่บนแผ่นคอนกรีตเดียวกัน จึงทำให้ค่าการยุบตัวที่วัดได้เกิดความแปรผันขึ้น ซึ่งแตกต่างจากเครื่อง LWD ที่สามารถควบคุมน้ำหนักทดสอบได้ดีกว่า

2) การควบคุมตำแหน่งของล้อให้กดทับที่เดิมสำหรับการทดสอบแบบเคลื่อนที่ในแต่ละครั้งนั้นมีความยากกว่าการทดสอบแบบสถิตมาก ในขณะที่การทดสอบของเครื่อง LWD สามารถควบคุมตำแหน่งการทดสอบได้แม่นยำกว่ามาก

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเพื่อประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตของเครื่อง LWD และ port-LTE แบบน้ำหนักสถิต พบว่า ทดสอบหาโพรงใต้แผ่นคอนกรีตด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต ได้ผลการวิเคราะห์โพรงที่มีความสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง LWD คือ ชี้ว่ามีโพรงหรือไม่มีโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตเหมือนกันทุกแผ่นพื้น และความลึกของโพรงที่ได้จากเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต โดยส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าความลึกของโพรงที่ได้จากเครื่อง LWD

ในขณะที่การทดสอบหาโพรงใต้แผ่นคอนกรีตด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ พบว่า ผลวิเคราะห์โพรงของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม. เท่านั้น ที่ให้ผลวิเคราะห์สอดคล้องกับเครื่อง LWD ทุกแผ่นพื้น ส่วนกรณีความเร็วที่ 5 และ 10 กม./ชม. ให้ผลสอดคล้องเฉพาะรอยต่อที่ 3 4 และ 5 เท่านั้น และผลทดสอบด้วยเครื่อง port-LTE ร่วมกับการใช้น้ำหนักของรถบรรทุกทำการทดสอบมีความผิดพลาดของผลการทดสอบเกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและการใช้น้ำหนักเพลาน้ำหนักเพลาล้อหลังทำการทดสอบ

โดยในภาพรวมของผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า วิธีการทดสอบที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้ โดยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตสามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจหาโพรงในพื้นที่การจราจรแบบปิดได้ เช่น ทดสอบกับถนนที่ก่อสร้างใหม่ หรือ ทดสอบกับท่าอากาศยาน เป็นต้น และเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจหาโพรงได้ แต่ยังไม่สามารถใช้ในการตรวจหาโพรงในพื้นที่การจราจรแบบเปิดได้ เนื่องจากความเร็วของการเคลื่อนที่น้ำหนักทดสอบที่เหมาะสมในการประเมินหาโพรงร่วมกับเครื่อง port-LTE มีความเร็วที่ต่ำ เช่น ที่ความเร็ว 2.5 กม./ชม. เป็นต้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวบริเวณมุมของแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (VLCDA method) สามารถใช้ร่วมกับผลการตรวจวัดจากเครื่อง port-LTE เพื่อประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตได้



ในอนาคตจะต้องมีการศึกษาพัฒนาวิธีการทดสอบที่เหมาะสมและระบบการประมวลผลให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นต่อไป เพื่อให้เครื่อง port-LTE สามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจหาโพรงในพื้นที่สภาวะการจราจรแบบเปิดได้และเพื่อลดความผิดพลาดให้น้อยลง ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากขึ้น

ทั้งนี้นักวิจัยเชื่อว่าการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถผลิตได้เองในประเทศอย่างต่อเนื่อง เช่น เครื่อง port-LTE เป็นต้น จะสามารถช่วยส่งเสริมความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและส่งเสริมเศรษฐกิจภายในประเทศได้ และยังช่วยลดการนำเข้าเทคโนโลยีหรือการเป็นผู้สั่งซื้อเทคโนโลยีแต่เพียงฝ่ายเดียวของประเทศไทยได้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้เป็นผลทดสอบจริงในสนาม ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ณ เวลาที่ทำการทดสอบ จึงมีหลายปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม เช่น อุณหภูมิและความชื้นภายในบริเวณสนามทดสอบ เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อการวัดค่าการยุบตัวและมีผลต่อการเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ควรมีการตรวจสอบข้อมูลของผิวทางที่ใช้ทดสอบ เช่น ความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต เป็นต้น เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและความถูกต้องของค่าการยุบตัวที่ตรวจวัดได้ และการใช้น้ำหนักของรถบรรทุกจริงมาทำการทดสอบควรจะต้องให้น้ำหนักของเพลาน้ำหนักและเพลาลังมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันจนเกินไป เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของน้ำหนักเพลาน้ำหนัก

## บรรณานุกรม

- [1] กรมการขนส่งทางบก, *แผนยุทธศาสตร์กรมการขนส่งทางบก (พ.ศ. 2554-2558)*, กรุงเทพมหานคร : กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก, 2553.
- [2] กรมการขนส่งทางบก, จำนวนรถจดทะเบียน (สะสม) ณ วันที่ 30 มิถุนายน 2557 (online), 2557, Available: [www.insure.co.th/images/state/whole\\_jun14.xls](http://www.insure.co.th/images/state/whole_jun14.xls), (21 ธันวาคม 2557).
- [3] Klaus Schwab, "The Global Competitiveness Index 2013–2014 rankings and 2012–2013 comparisons," in *The Global Competitiveness Report 2013–2014*. Switzerland : World Economic Forum, 2013, pp. 15-22.
- [4] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, "การเชื่อมโยงโครงสร้างพื้นฐานสู่อาเซียน," ใน *เส้นทางประเทศไทยสู่ประชาคมอาเซียน*. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2556, นน. 126-132.
- [5] สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม, *ระยะทางในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง (online)*, 2557, Available: [http://www.mot.go.th/statmot\\_distance.html](http://www.mot.go.th/statmot_distance.html), (21 ธันวาคม 2557).
- [6] สำนักงานงบประมาณ สำนักนายกรัฐมนตรี, "งบประมาณรายจ่ายของกรมทางหลวง," ใน *เอกสารงบประมาณ ฉบับที่ 3 งบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 เล่มที่ 4*. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานงบประมาณ, 2556, นน. 79-102.
- [7] สำนักงานงบประมาณ สำนักนายกรัฐมนตรี, "สาระสำคัญของงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557," ใน *งบประมาณ โดยสังเขป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557*. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานงบประมาณ, 2557, นน. 1-32.
- [8] State of California Department of Transportation, *Slab Replacement Guidelines*, California : State of California Department of Transportation, 2004.
- [9] สำนักงานงบประมาณ สำนักนายกรัฐมนตรี, "ค่าครุภัณฑ์ ที่ดินและสิ่งก่อสร้าง," ใน *เอกสารงบประมาณ ฉบับที่ 3 งบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 เล่มที่ 4*. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานงบประมาณ, 2558, นน. 79-102.
- [10] พุทธิพล ทองอินทร์ดำ "เครื่องมือต้นแบบทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นของถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตม," รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, พ.ศ. 2557.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] กรมทางหลวง, การออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต, กรุงเทพมหานคร : สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, 2546.
- [12] กรมทางหลวงชนบท, "แบบมาตรฐานถนนคอนกรีต," ใน *แบบมาตรฐานงานทาง*. กรมทางหลวงชนบท : สำนักสำรวจและออกแบบ, 2556, นน. 15-22.
- [13] ผศ. นิรชร นกแก้ว, "การออกแบบถนนคอนกรีต," ใน *วิศวกรรมผิวทาง*. ปีที่. 2554, ครั้งที่ 2. ปทุมธานี : งานเอกสารการพิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, นน. 398-429.
- [14] NPTEL, Basic concept of pavement analysis and design (online), 2003, Available: <http://nptel.ac.in/courses/105104098/TransportationII/lecture6/5slide.htm>, (28 ธันวาคม 2557).
- [15] E.J. Yoder and M.W. Witzak, "Design of Rigid Highway Pavements," in *Principles of Pavement Design Second Edition*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 1975, pp. 596-624.
- [16] Shreenath .P RAO, "Characterizing Effective Built-in Curling and its Effect on Concrete Pavement Cracking," Doctor of Philosophy Thesis, Civil Engineering, Graduate College of Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, Illinois, 2005.
- [17] Gustavo E. Morales-Valentin, A. H. Meyer, W. R. Hudson, "Temperature Differential Effect on The Falling Weight Deflectometer Deflections used for Structural Evaluation of Rigid Pavements," Research, The University of Texas at Austin, Center for Transportation Research, 1987.
- [18] Kshitija Nadgouda, *Consolidation of soil Geotechnical Engineering (online)*, 2006, Available: <https://kshitija.wordpress.com/2006/11/20/consolidation-of-soil/>, (28 ธันวาคม 2557).
- [19] Julie M. Vandenbossche, "Effects of Slab Temperature Profiles on Use of Falling Weight Deflectometer Data to Monitor Joint Performance and Detect Voids," *Transportation Research Record No. 2005*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 75-85, 2007.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Ying-Haur Lee, Ying-Ming Lee, and Shao-Tang Yen, "Corner Loading and Curling Stress Analysis of Concrete Pavements," Research, Civil Engineering, Tamkang University, Taiwan, 2002.
- [21] Youn su Jung, Dan G. Zollinger, "Design and Construction Transition Guidelines for Concrete Pavement," Research, Civil Engineering, Transportation, The Texas A&M University System College Station, Texas, 2007.
- [22] Paul Thomas Foxworthy, "Concepts for the Development of a Nondestructive Testing and Evaluation System for Rigid Airfield Pavements," Doctor of Philosophy Thesis, Graduate College of Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, Illinois, 1985.
- [23] Dr. Sergio Perez, Dr. Carl Van Geem, "FWD On Concrete Roads: Load Transfer Efficiency, Faulting and Bearing Capacity," Research, Belgium Road Research Center, Belgium, 2010.
- [24] Youn su Jung, Thomas J. Freeman and Dan G. Zollinger, "Evaluation and Selection Guide of Method of Repair for Routine Maintenance," Research, Civil Engineering, Transportation, The Texas A&M University System College Station, Texas, 2008.
- [25] American Concrete Pavement Association, "Slab Stabilization Guidelines for Concrete Pavements," Concrete Paving Technology, pp. 1-20, 1994.
- [26] Youn su Jung, Thomas J. Freeman, and Dan G. Zollinger, "Guidelines for Routine Maintenance of Concrete Pavement," Research, Civil Engineering, Transportation, The Texas A&M University System College Station, Texas, 2008.
- [27] Hunter Smith Management Pty. Ltd., Ground Penetrating Radar (GPR) Project (online), 2010, Available: <http://www.hsmlocating.com.au/projects.html>, (15 มกราคม 2558).
- [28] จักรพงษ์ นามหาไชย, "การเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2556.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

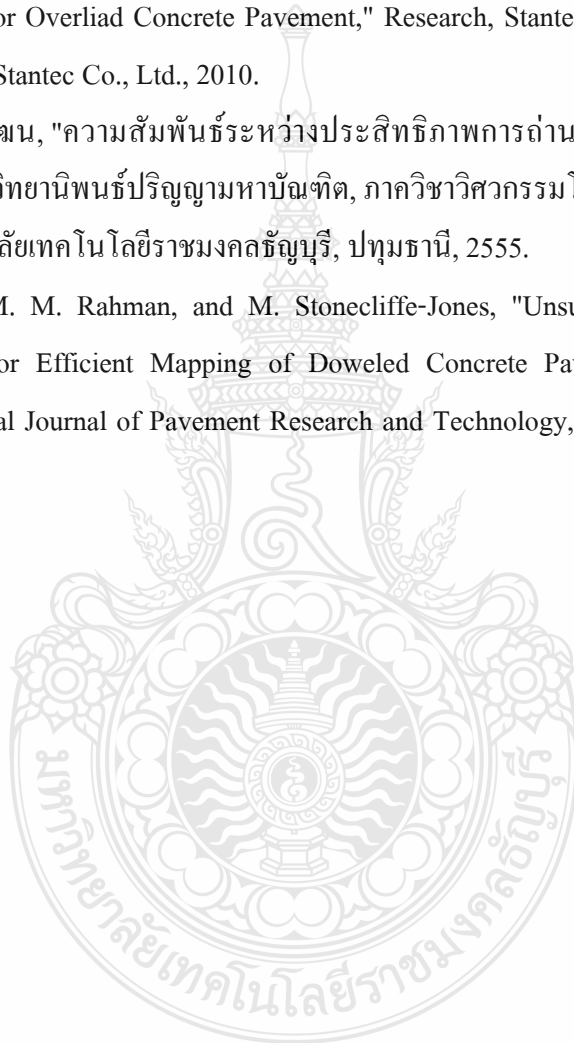
- [29] Crovetti, J.A., and Darter, M.I., Void Detection for Jointed Concrete Pavements, Transportation Research Record No. 1041, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp 59-68, 1985.
- [30] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Washington D.C. : AASHTO, 1993.
- [31] U.S. Department of Transportation, "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements," in Advisory Circular 150/5370-11B. Washington, D.C. : Michael J. O'Donnell, 2011, pp. 66.
- [32] Eduardo A. Ricci, A. H. Meyer, W. R. Hudson, K. H. Stokoe II, "The Falling Weight Deflectometer for Nondestructive Evaluation of Rigid Pavements," Research, Texas State Department of Highways and Public Transportation, The University of Texas at Austin, Texas, 1985.
- [33] Tokyo Sokki Kenkyojo Co., Ltd, Small FWD Application, Japan : Tokyo Sokki Kenkyojo Co., Ltd., 2013.
- [34] Tokyo Sokki Kenkyojo Co., Ltd, Smart Dynamic Strain Recorder, Japan : Tokyo Sokki Kenkyojo Co., Ltd., 2013.
- [35] M. C. Hironaka, R. D. Hitchcock, and J. B. Forrest, "Detection of Voids Underground and Under Pavements," Research, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center Port Hueneme, United States, 1975.
- [36] John W. Birkhoff, B. Frank McCullough, "Detection of Voids Underneath Continuously Reinforced Concrete Pavements," Research, Texas State Department of Highways and Public Transportation, The University of Texas at Austin, Texas, 1979.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] Jacob Uzan, Satish Kodavali, Tom Scullion, "Rigid Pavement Evaluation System - Implementation of RMOD," Research, Texas Department of Transportation, the University of Texas at Austin, Texas, 1995.
- [38] Julie Marie Vandebossche, "Interpreting Falling Weight Deflectometer Results for Curled and Warped Portland Cement Concrete Pavements," Doctor of Philosophy Thesis, Civil Engineering, The Graduate School of The University of Minnesota, United States, 2003.
- [39] Chuanxin Fang, "Cost-Effectiveness of Joint/Crack Sealing," Doctor of Philosophy Thesis, University Of Purdue, United States, 2003.
- [40] Stuart John Arnold, "Load Transfer across Cracks and Joints in Concrete Slabs on Grade," Doctor of Philosophy Thesis, University of Loughborough, United Kingdom, 2004.
- [41] บัญชา ฟุตระกูล, ม.ล.วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจานง, เสรี ศรีธรรมธำรง, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศีลารมย์, "การตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ GPR และ FWD," รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, 2547.
- [42] ดร.ธันวิน สวัสดิ์ศานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, "การตรวจหาโพรงใต้ถนนคอนกรีตด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD)," รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, 2548.
- [43] Applied Research Associates, Inc., "Detection And Mitigation Of Subsidence And Voids On Vermont Roadways: I-89 Hartford And Us 7 Manchester, Vermont," Research, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vermont, United States, .
- [44] Zhong Yan-hui, Zhang Bei, Liu Qiang, Wang Fu-ming, "Theoretical Research on Three Points Regression Method for Identifying the Voids of Concrete Pavement," in Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, pp. 341-345.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [45] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, "การสำรวจเพื่อหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต," ใน คู่มือการสำรวจเพื่อหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต. กรมทางหลวงชนบท : กรมทางหลวง, 2552, นน. 7-105.
- [46] Khaled Galal and Leanne Whiteley-Lagace, "FWD/HWD Void Detection Beneath Concrete Pavement or Overliad Concrete Pavement," Research, Stantec Consulting Charlotte and Hamilton, Stantec Co., Ltd., 2010.
- [47] จตุพล สายัณห์วัฒน์, "ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่านน้ำหน้ากับโพรงใต้ผิวทางแผ่นพื้น," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2555.
- [48] S. Mathavan, M. M. Rahman, and M. Stonecliffe-Jones, "Unsupervised Artificial Neural Network for Efficient Mapping of Doweled Concrete Pavement Joints Condition," International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 7, No.4, pp. 287-296, Jul, 2015.



ภาคผนวก

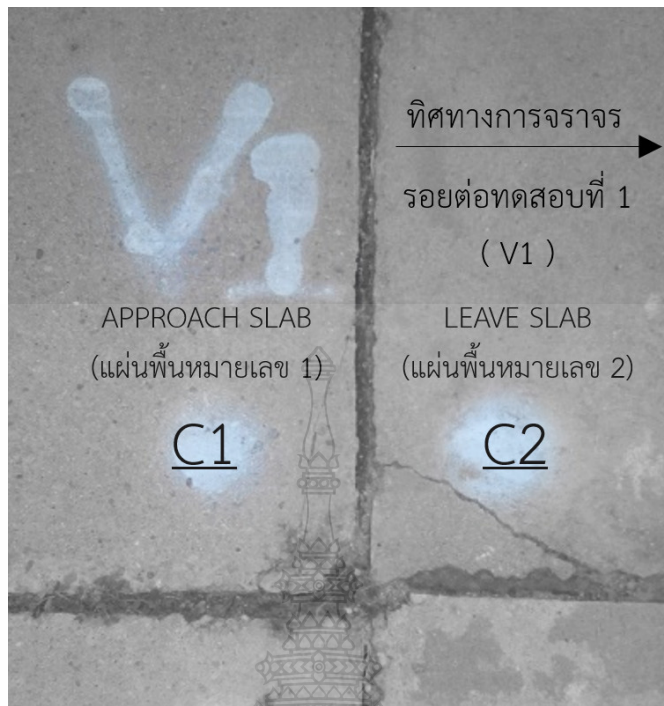




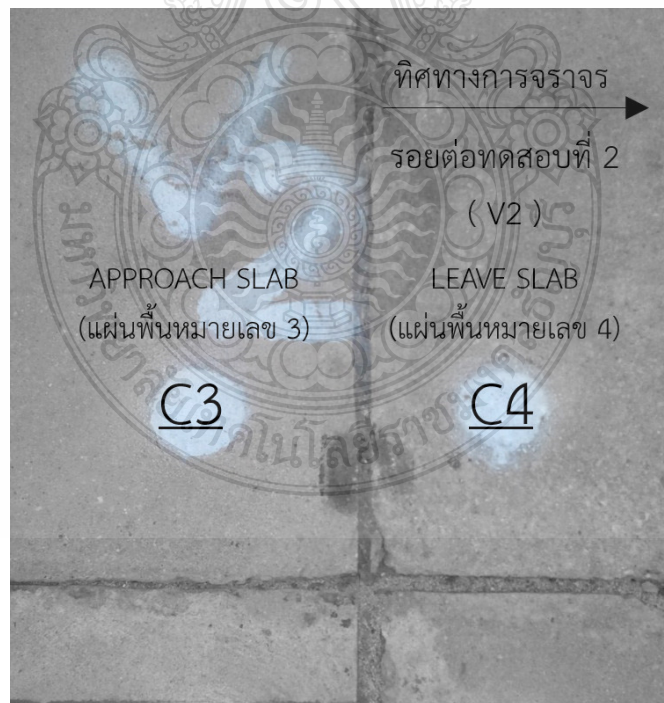
ภาคผนวก ก

ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

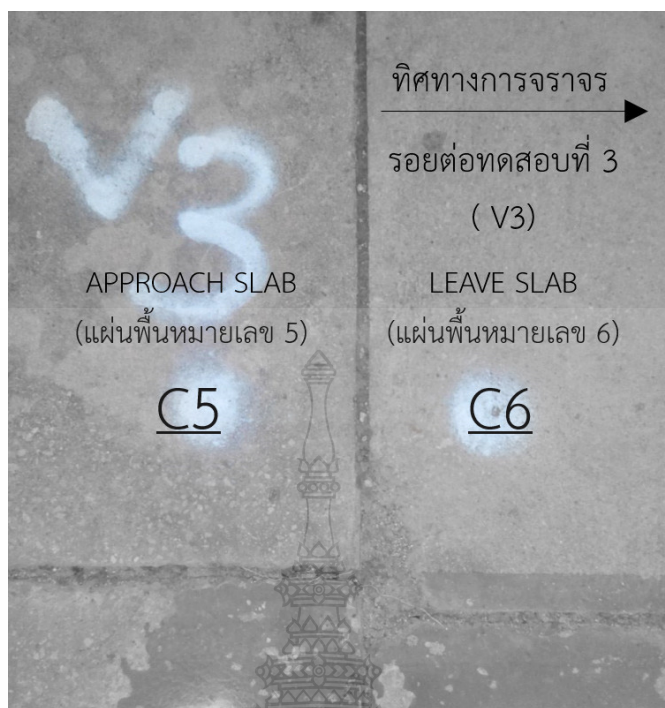




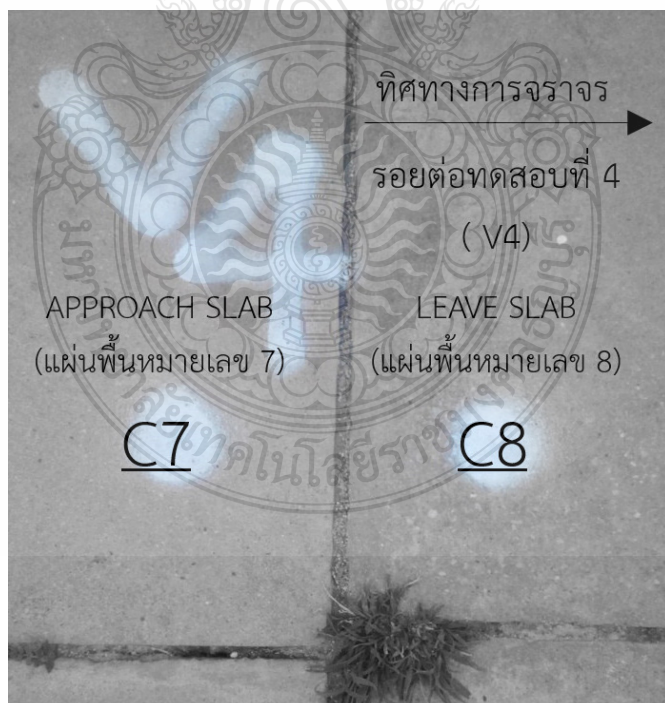
รูปที่ ก.1 ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตทดสอบที่ 1 (V1)



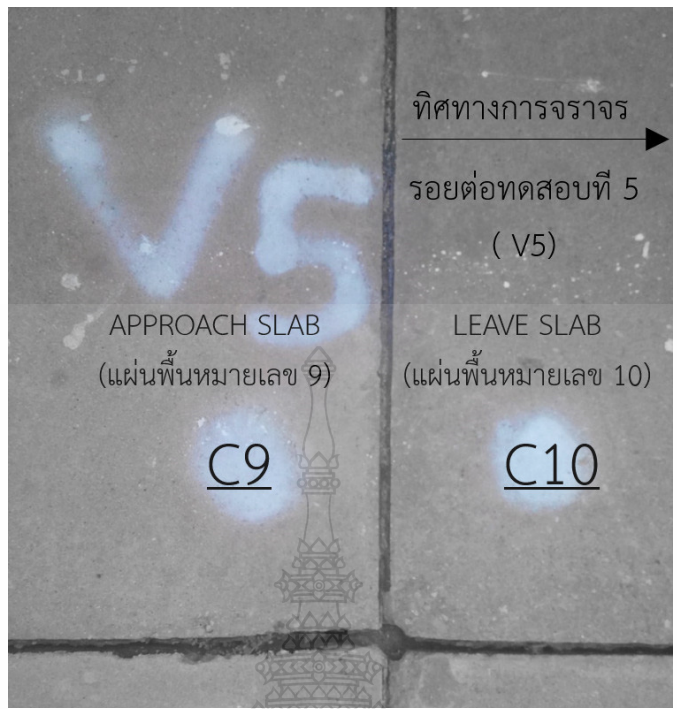
รูปที่ ก.2 ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตทดสอบที่ 2 (V2)



รูปที่ ก.3 ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตทดสอบที่ 3 (V3)



รูปที่ ก.4 ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตทดสอบที่ 4 (V4)



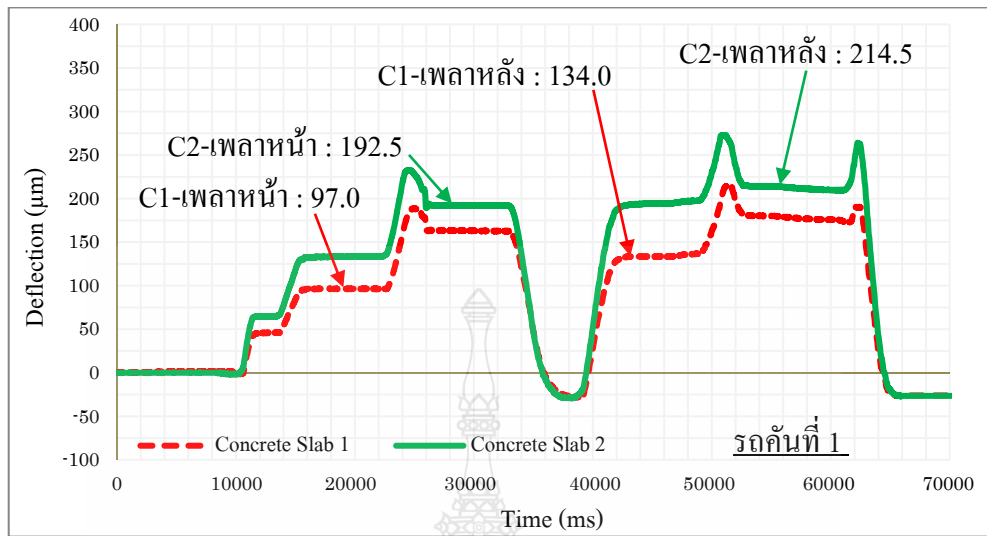
รูปที่ ก.5 ตำแหน่งรอยต่อและแผ่นพื้นคอนกรีตทดสอบที่ 5 (V5)



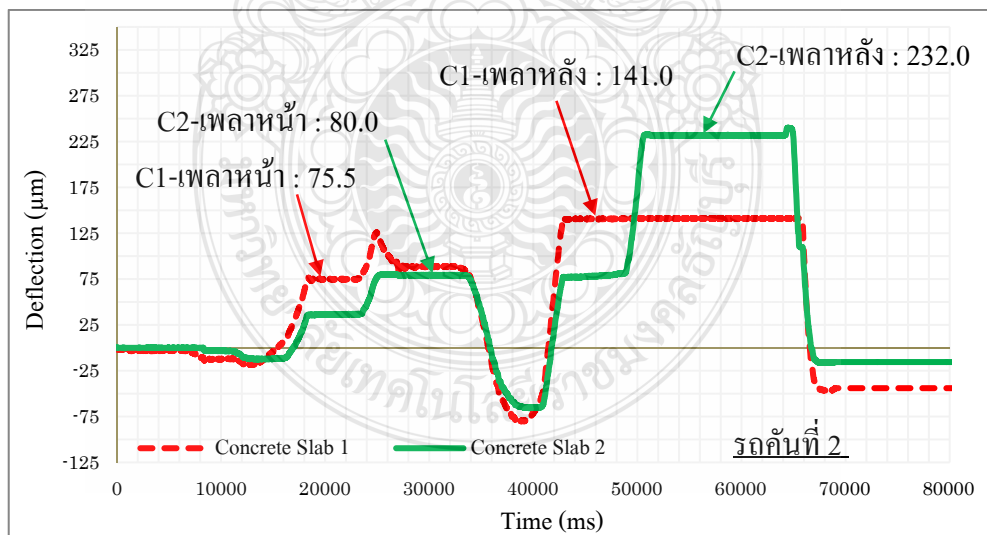


**ภาคผนวก ข**

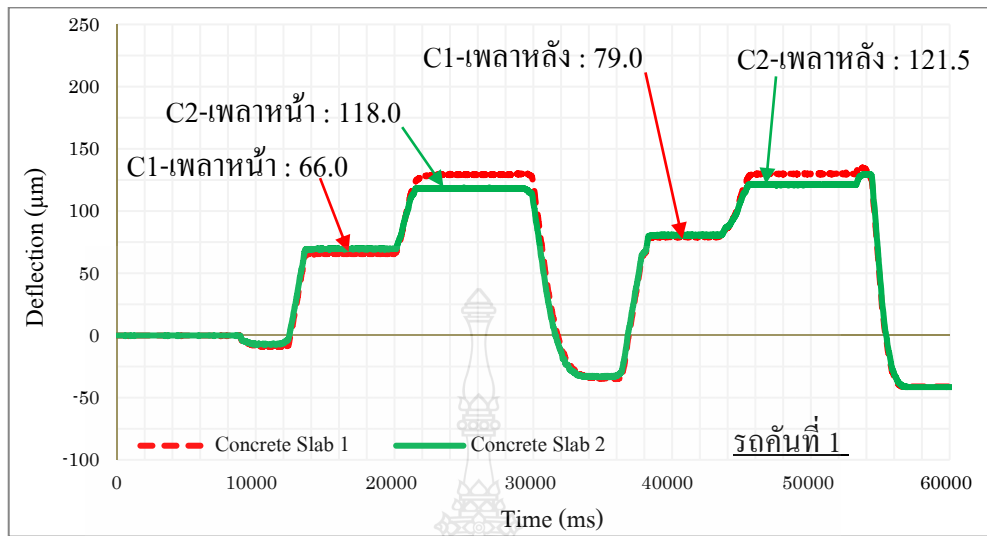
**ผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE**



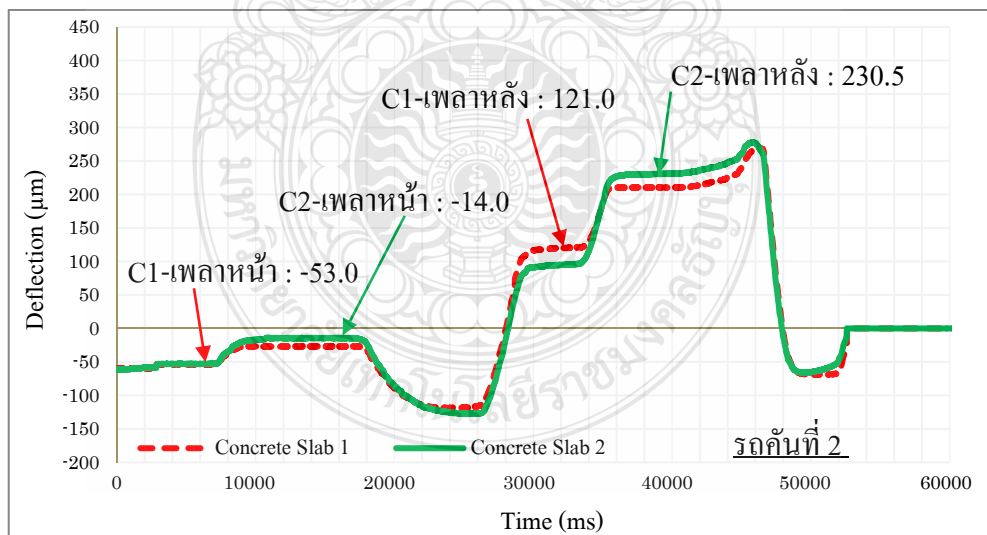
รูปที่ ข.1 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตบริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1



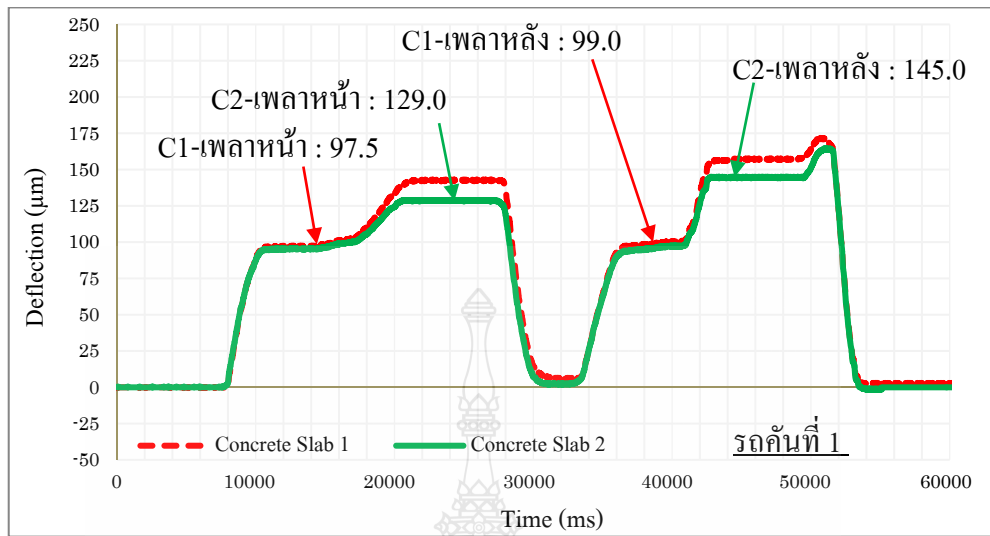
รูปที่ ข.2 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตบริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2



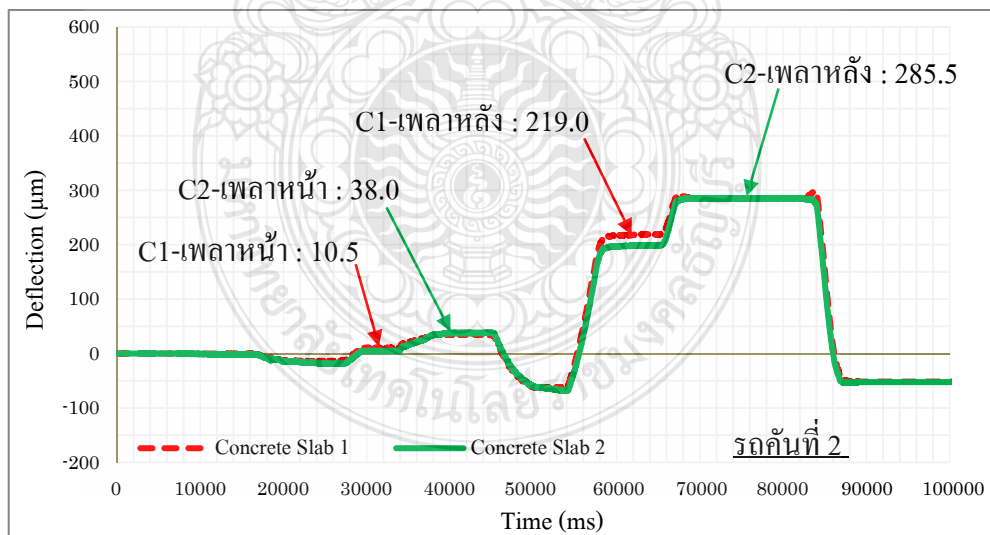
รูปที่ ข.3 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตบริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1



รูปที่ ข.4 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2

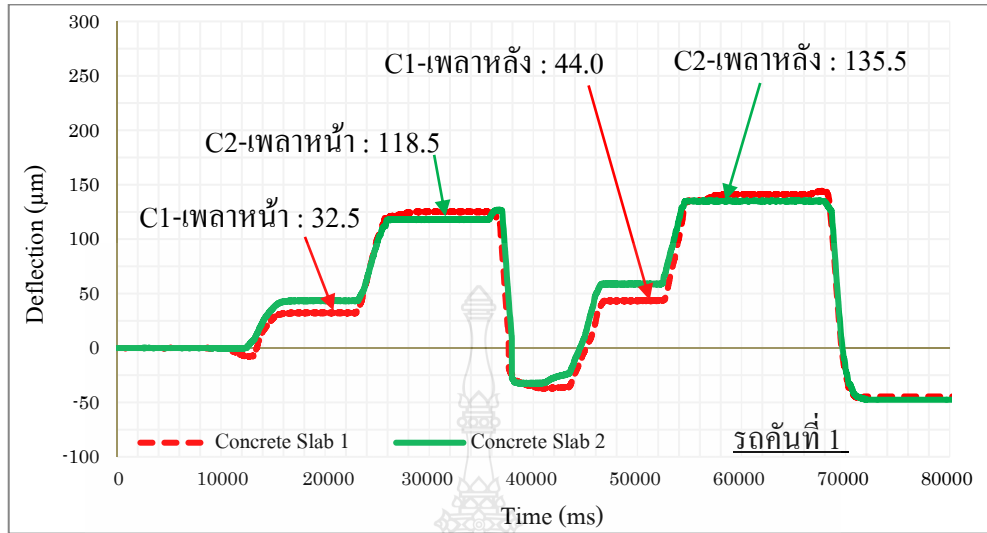


รูปที่ ข.5 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1

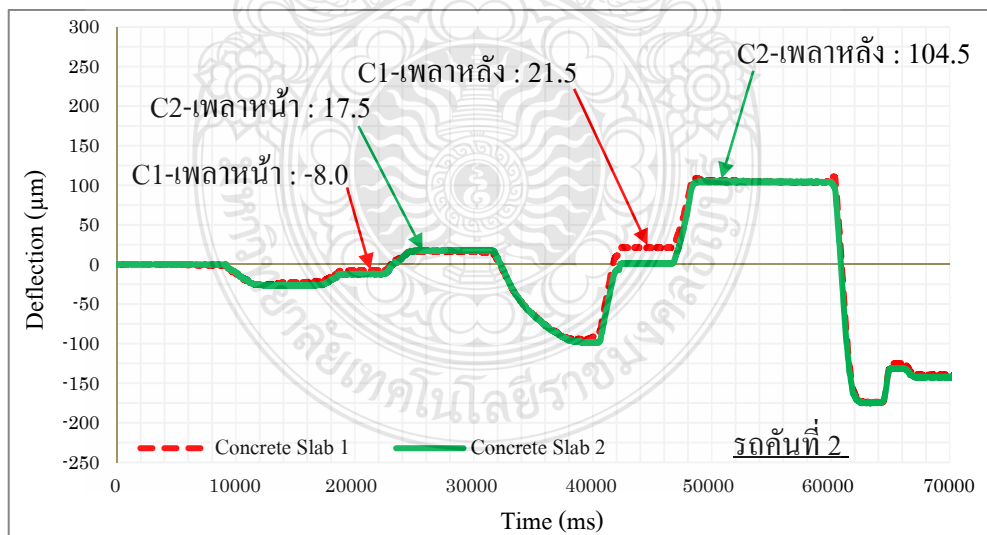


รูปที่ ข.6 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2

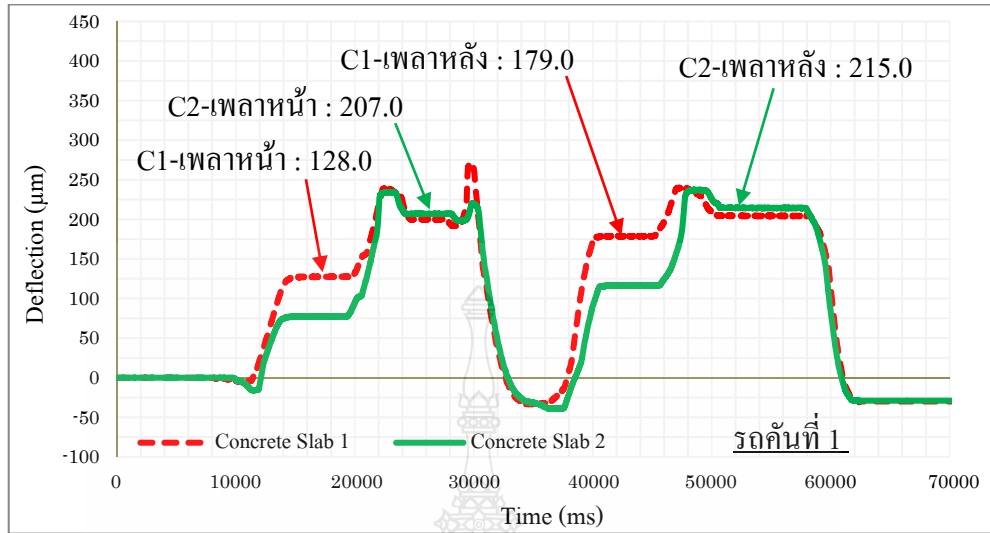




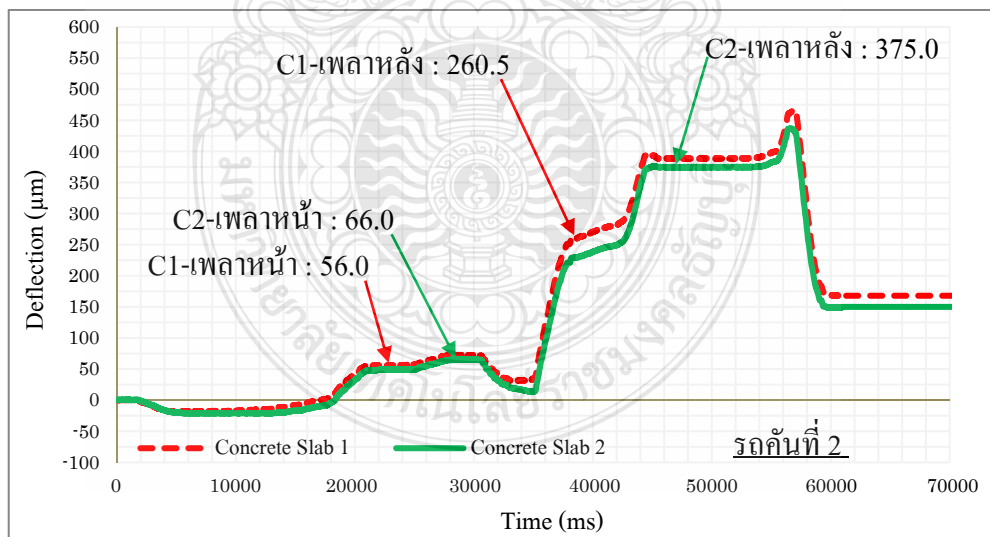
รูปที่ ข.7 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1



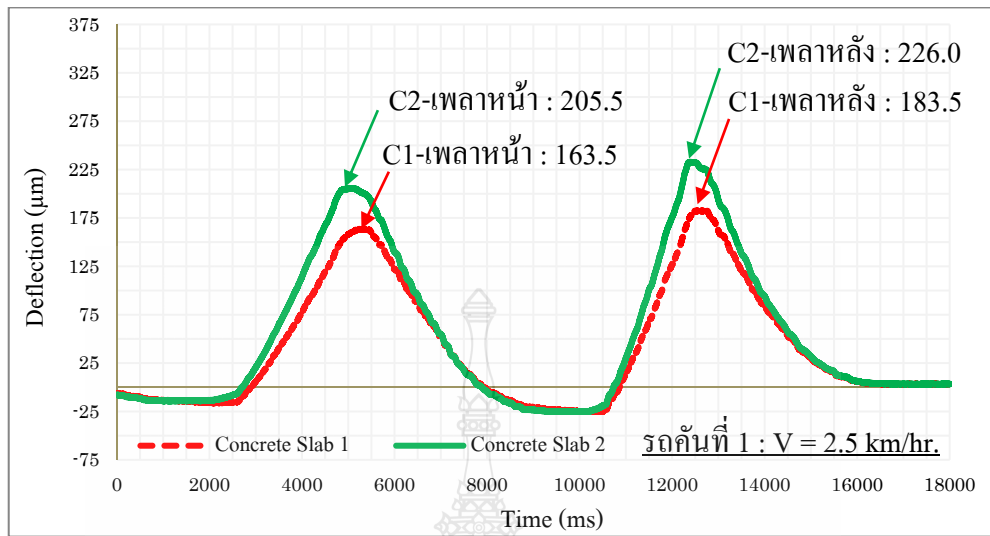
รูปที่ ข.8 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2



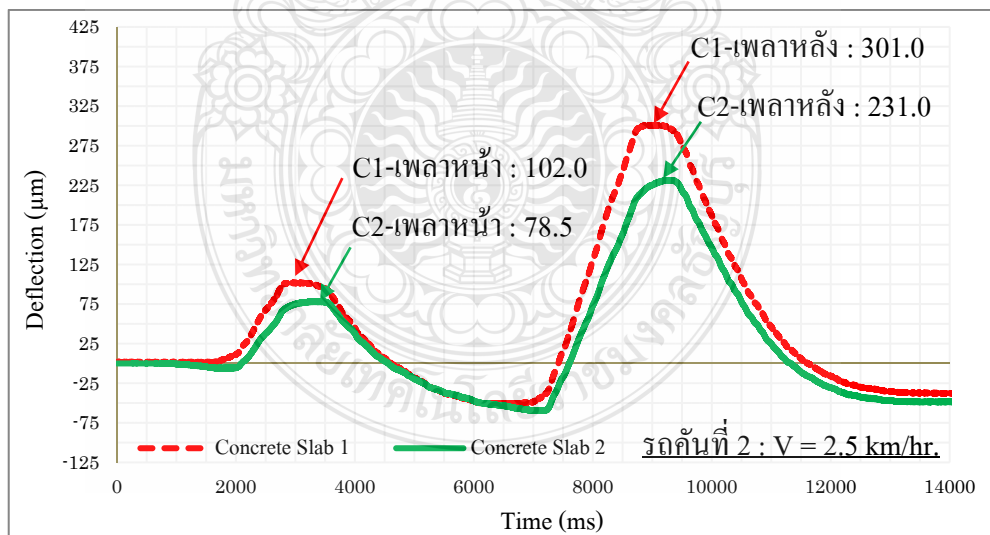
รูปที่ ข.9 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1



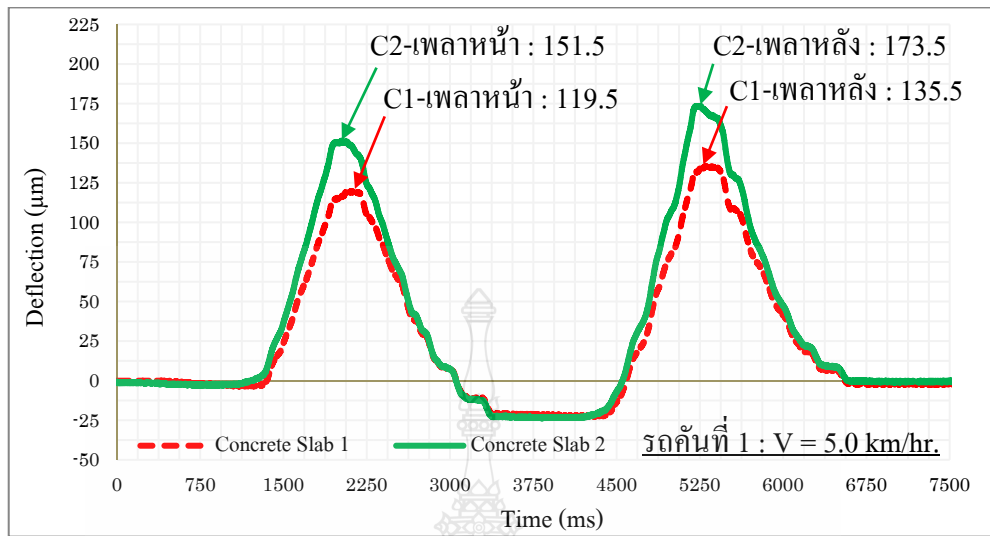
รูปที่ ข.10 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิตที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2



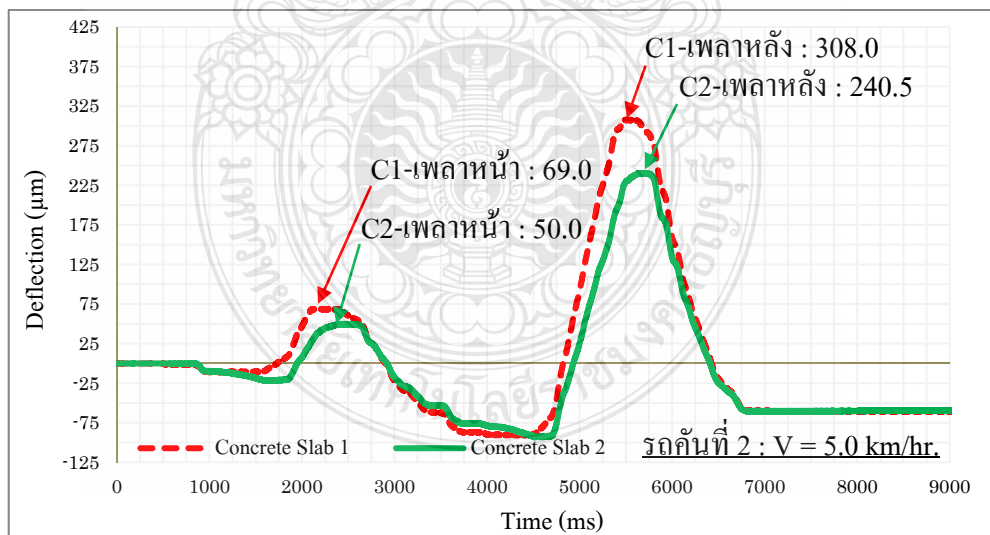
รูปที่ ข.11 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



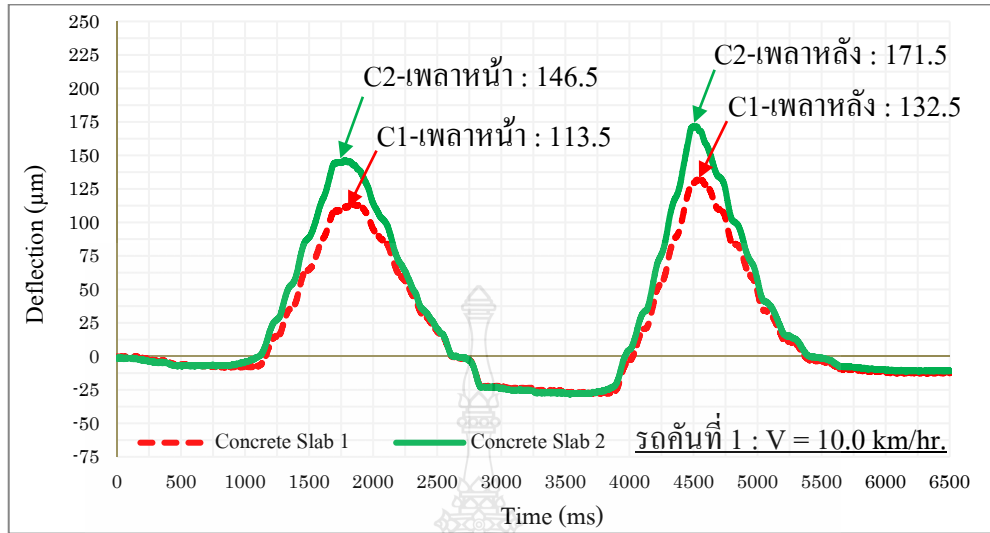
รูปที่ ข.12 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



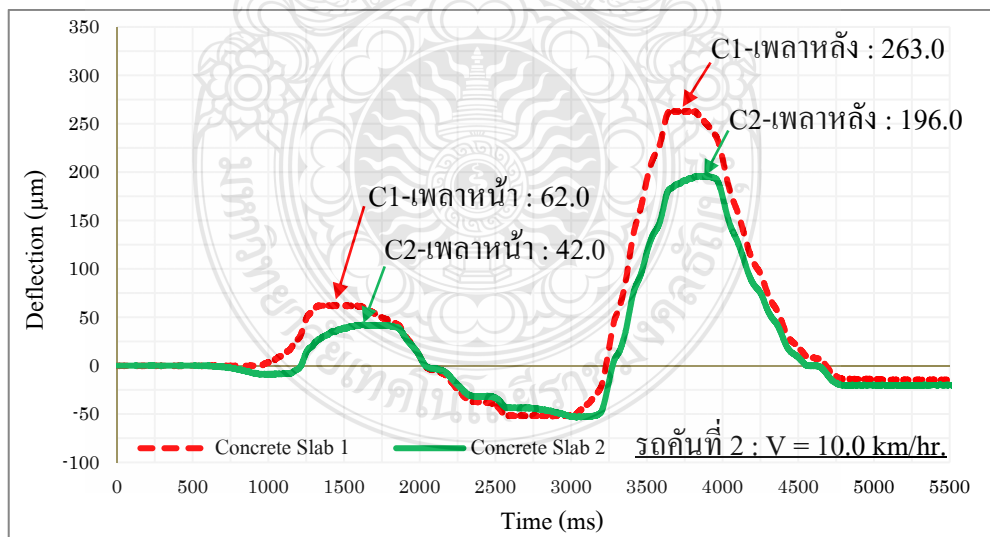
รูปที่ ข.13 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



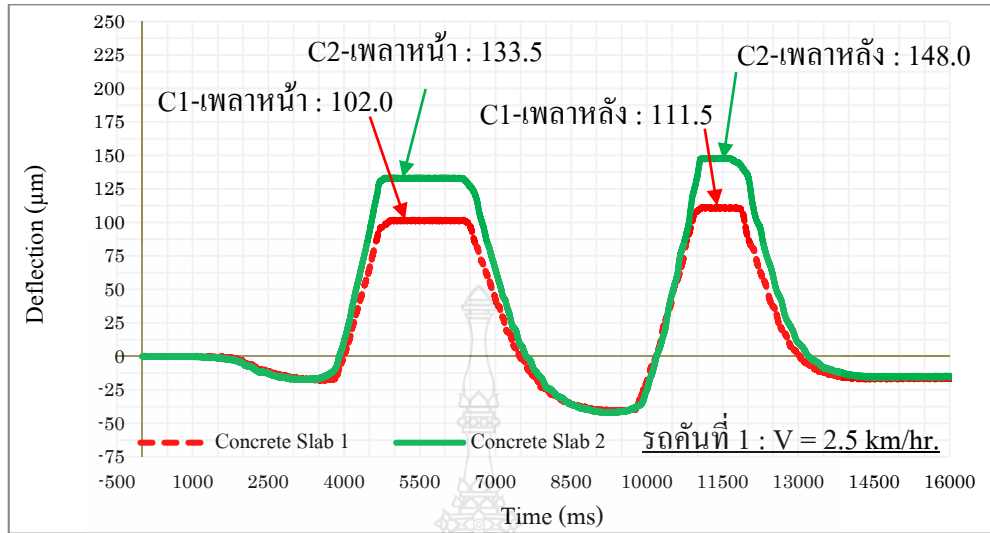
รูปที่ ข.14 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



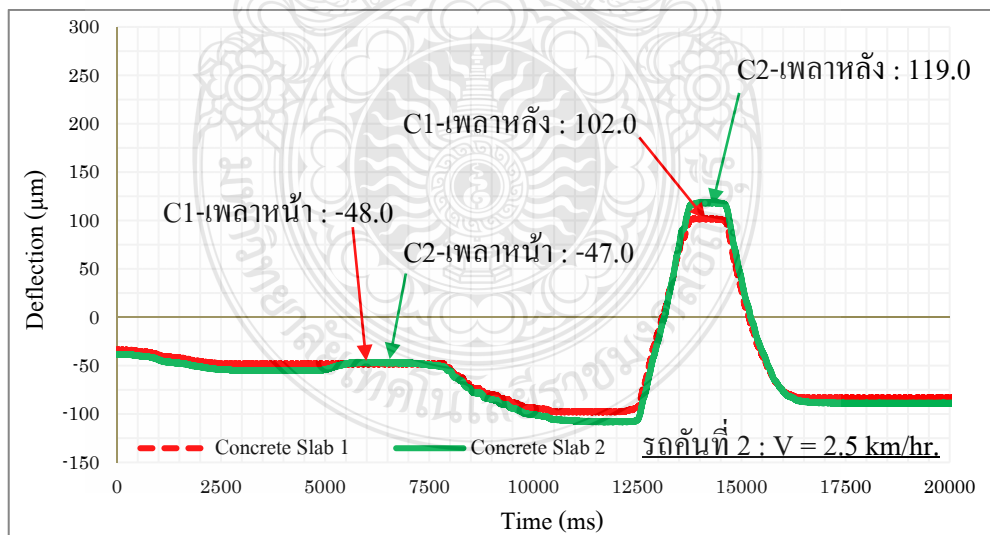
รูปที่ ข.15 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



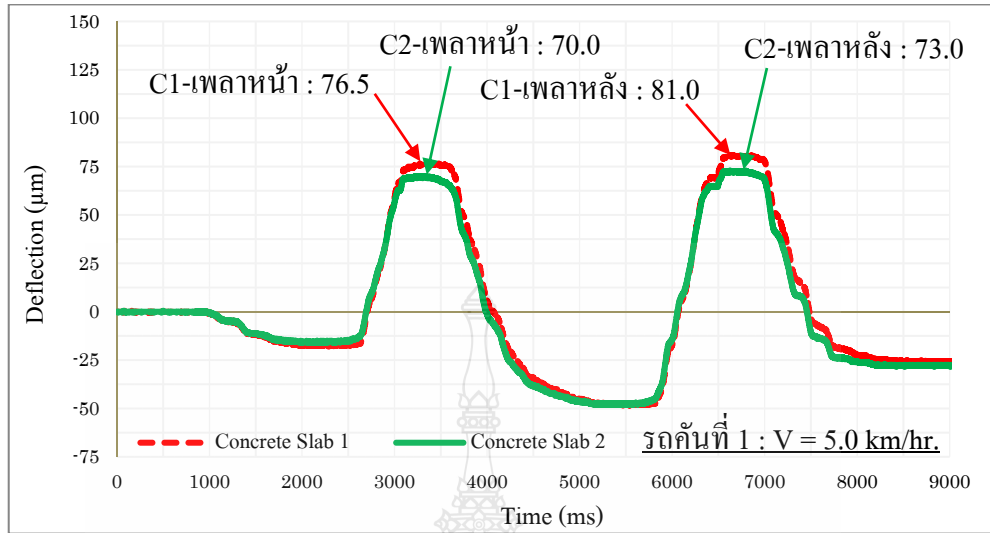
รูปที่ ข.16 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V1 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



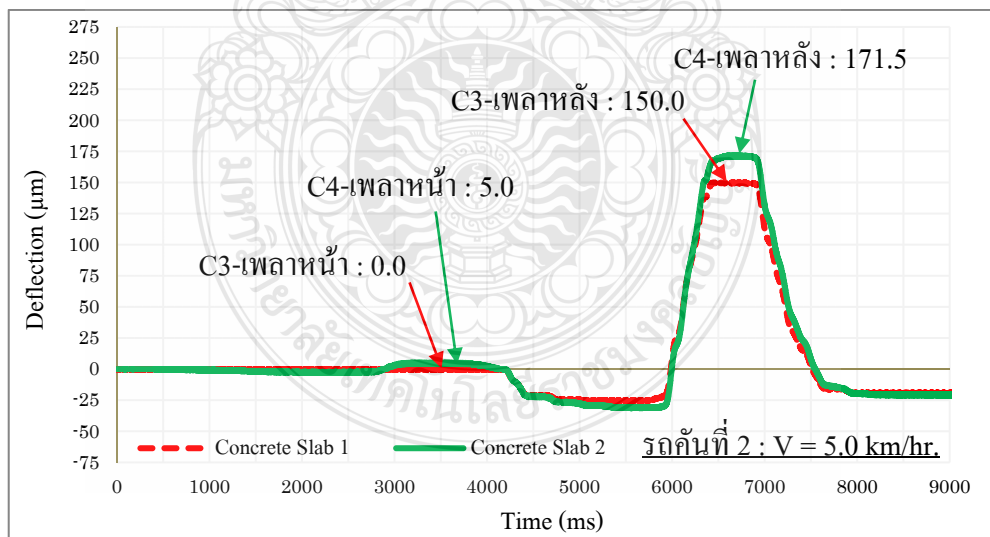
รูปที่ ข.17 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



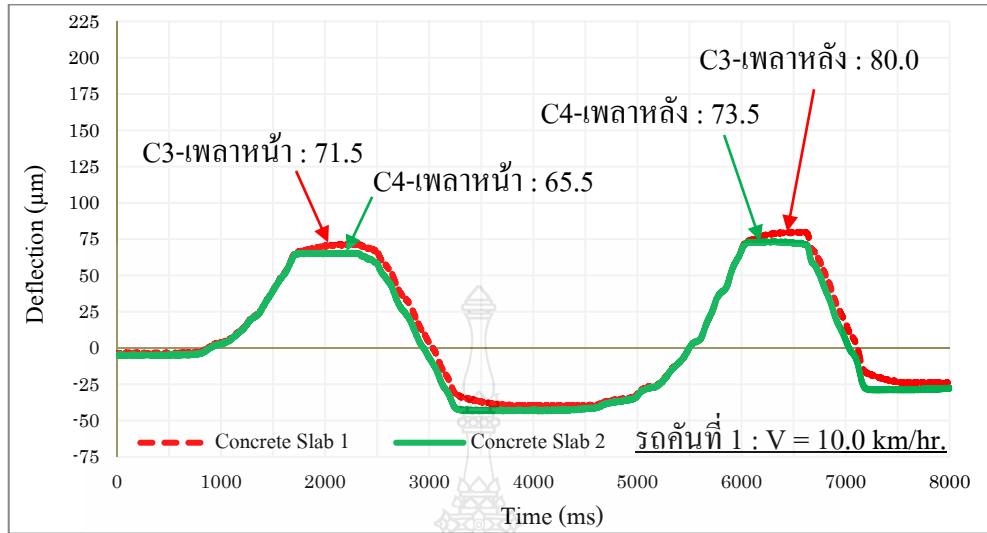
รูปที่ ข.18 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



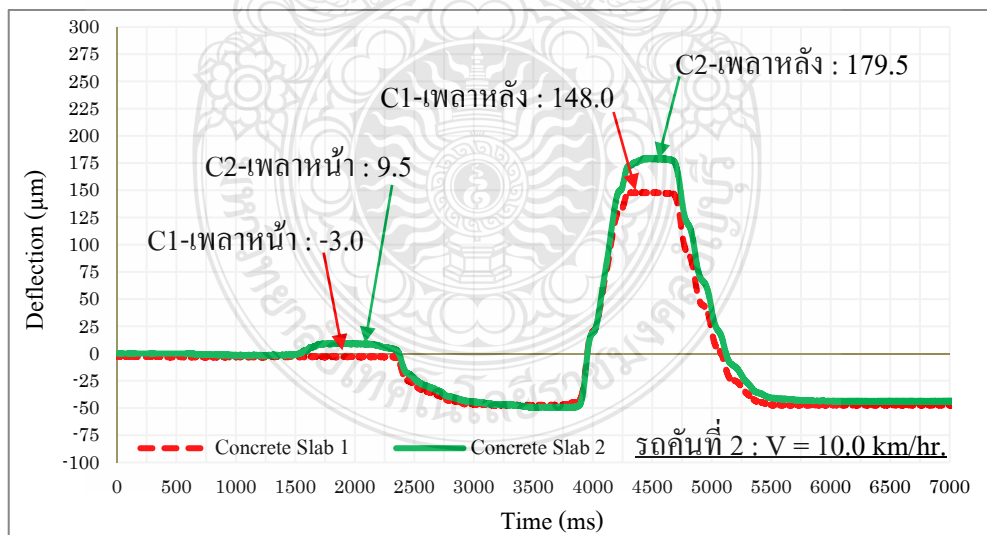
รูปที่ ข.19 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



รูปที่ ข.20 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.

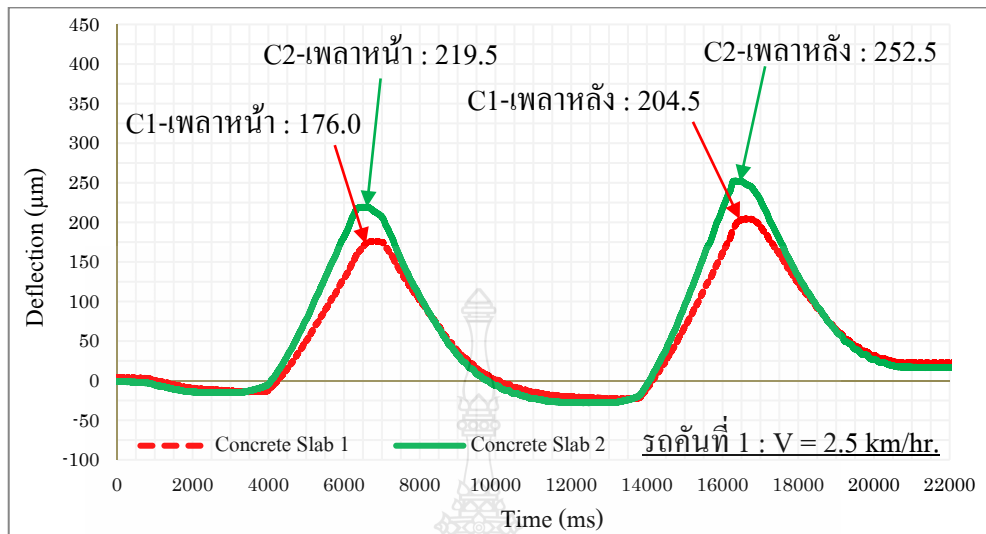


รูปที่ ข.21 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.

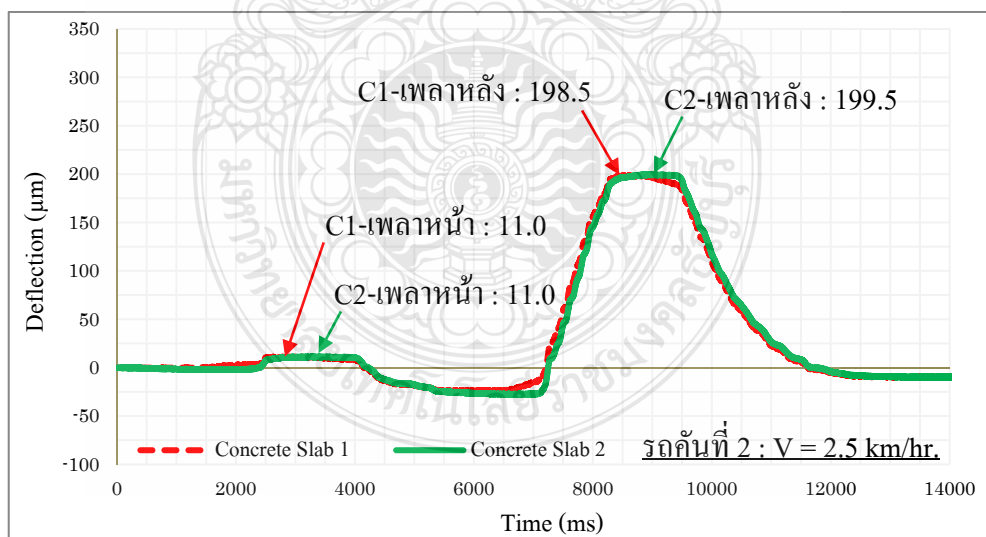


รูปที่ ข.22 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V2 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.

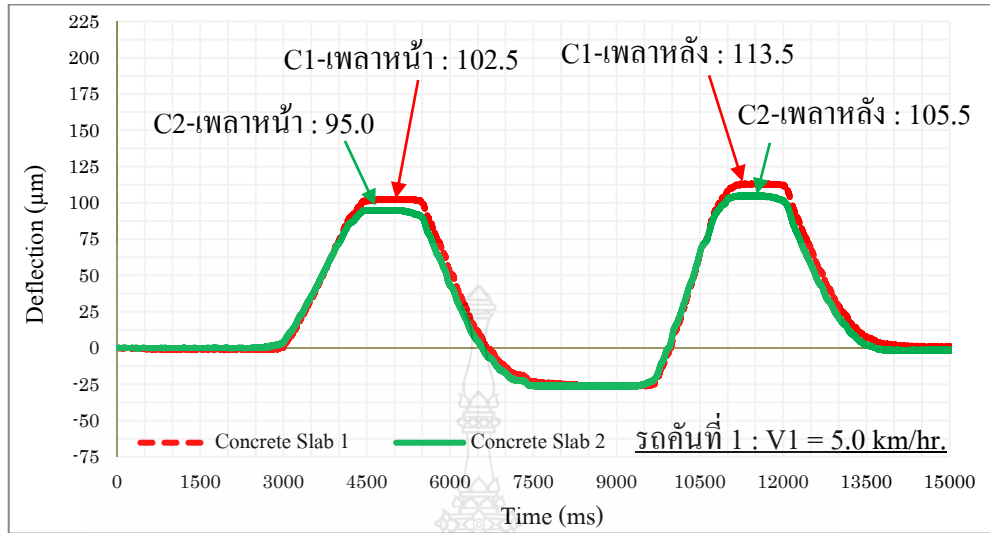




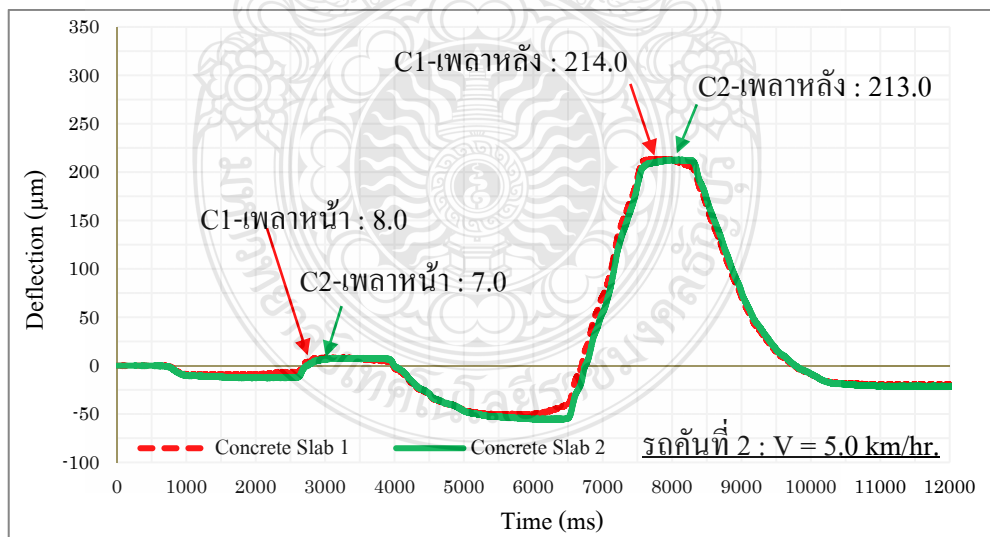
รูปที่ ข.23 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



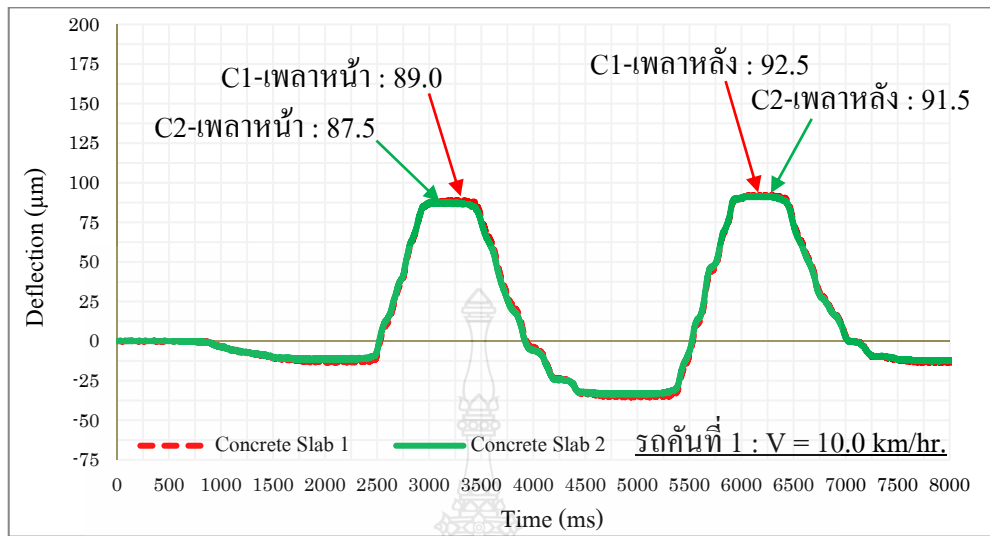
รูปที่ ข.24 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



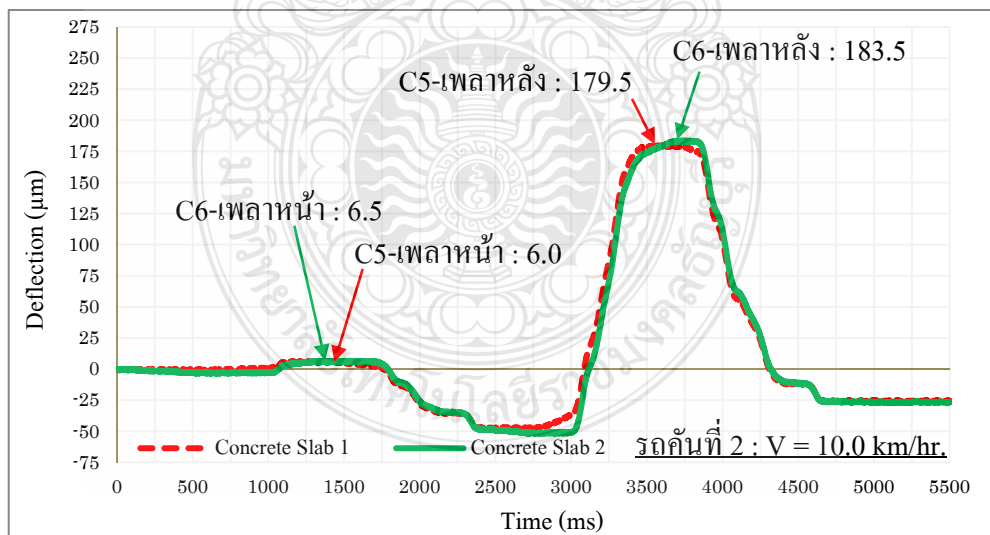
รูปที่ ข.25 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



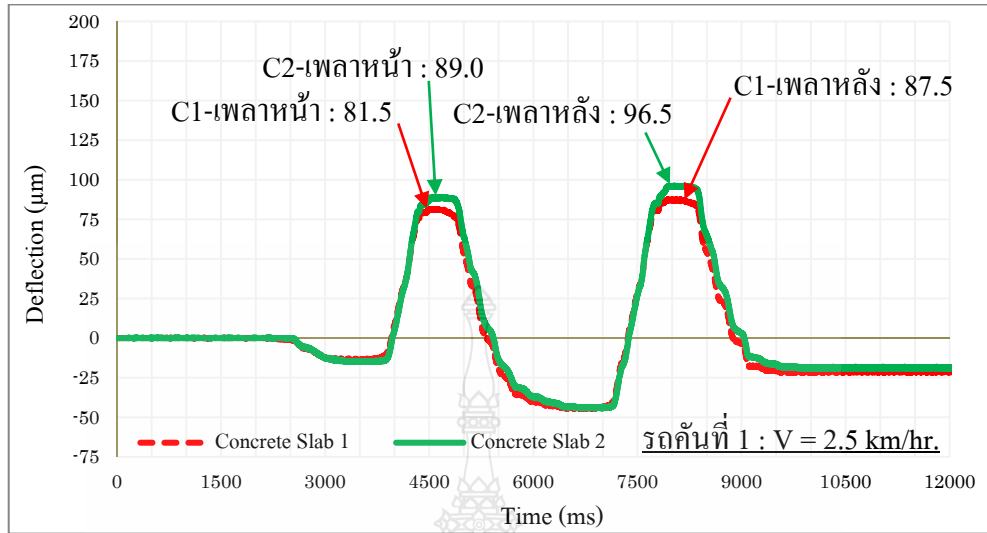
รูปที่ ข.26 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



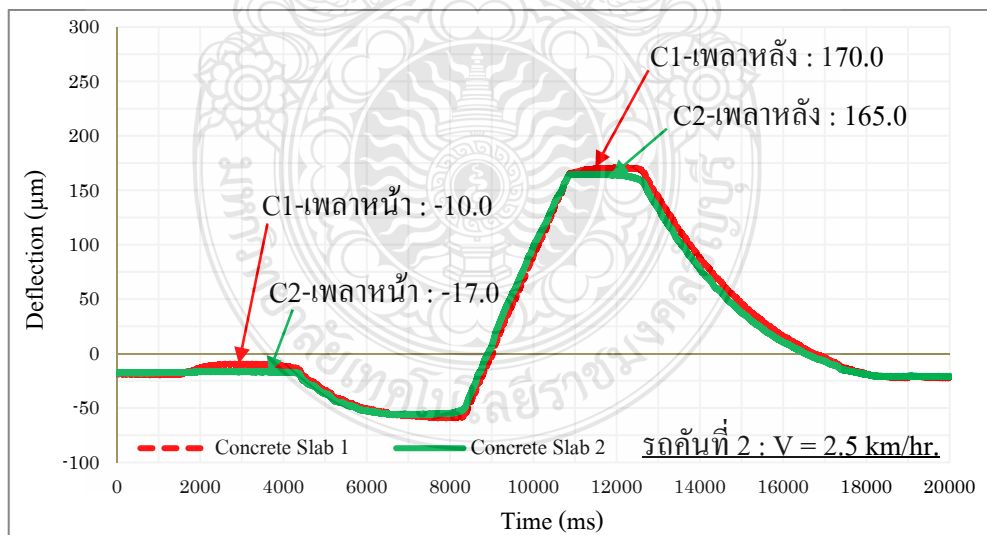
รูปที่ ข.27 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



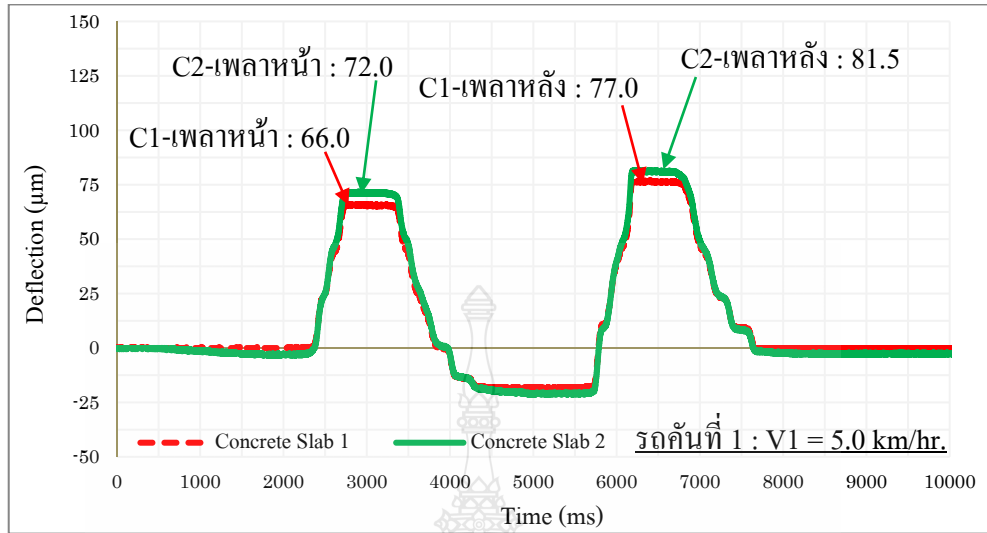
รูปที่ ข.28 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V3 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



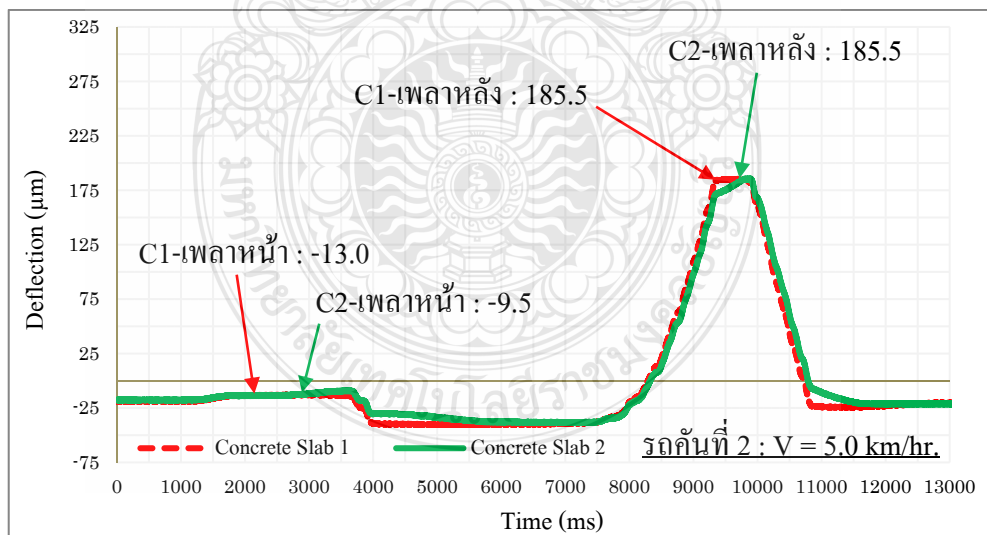
รูปที่ ข.29 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



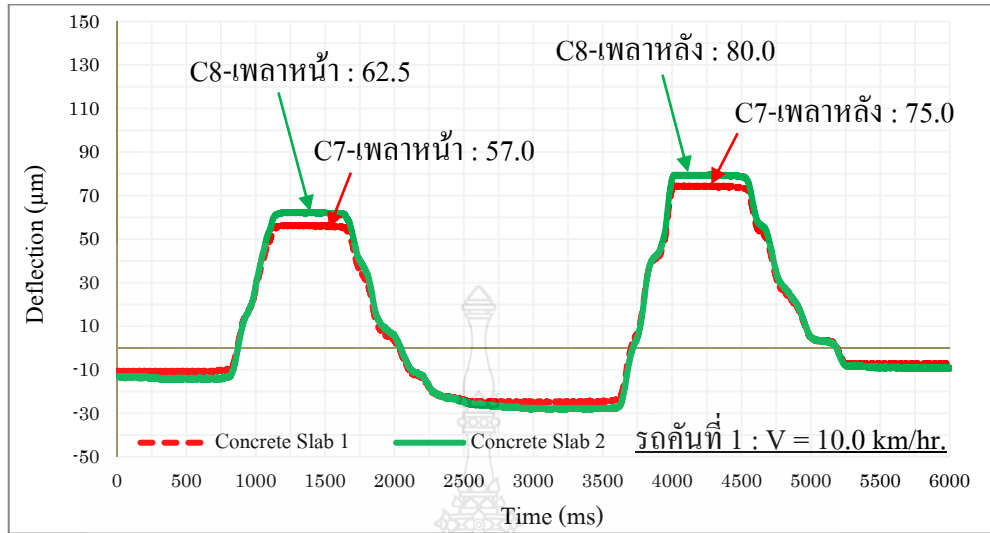
รูปที่ ข.30 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



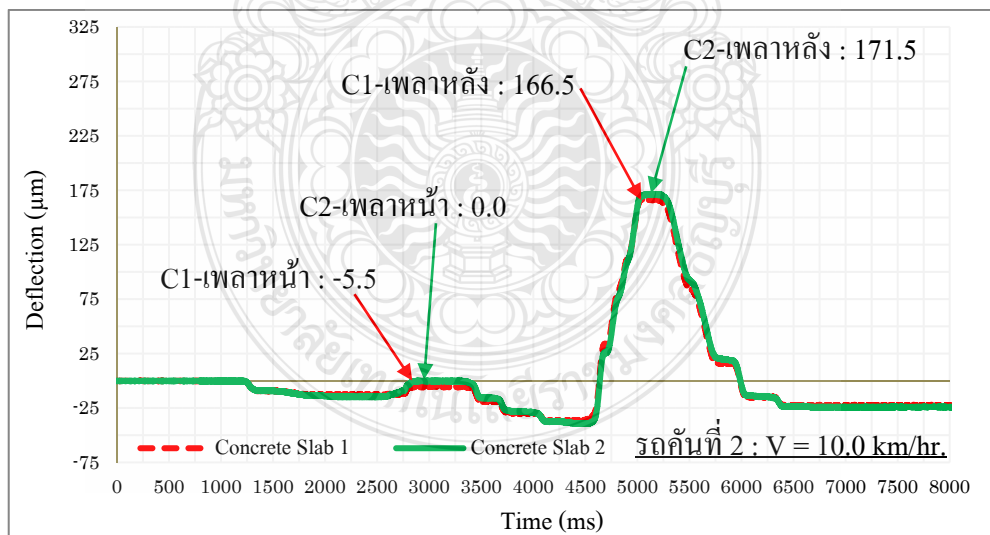
รูปที่ ข.31 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



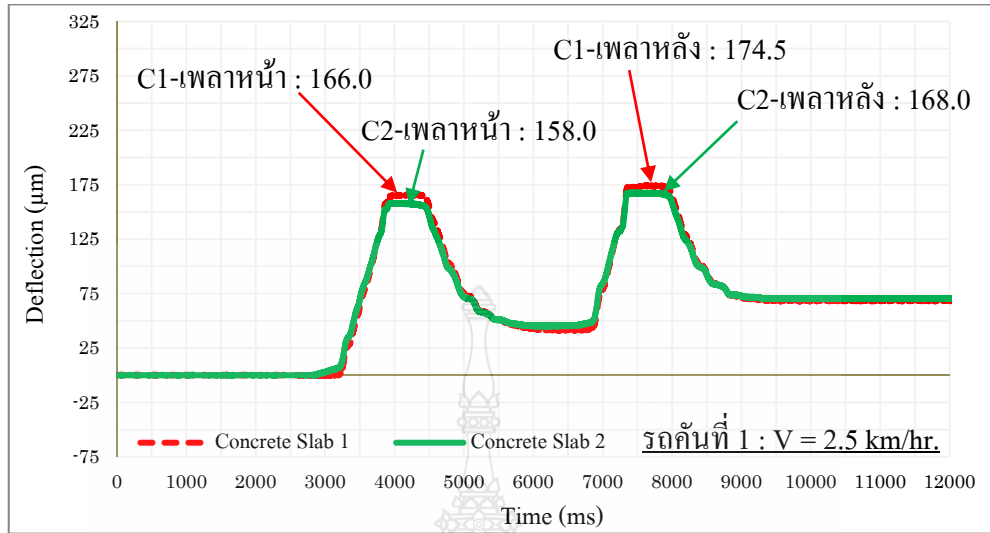
รูปที่ ข.32 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.



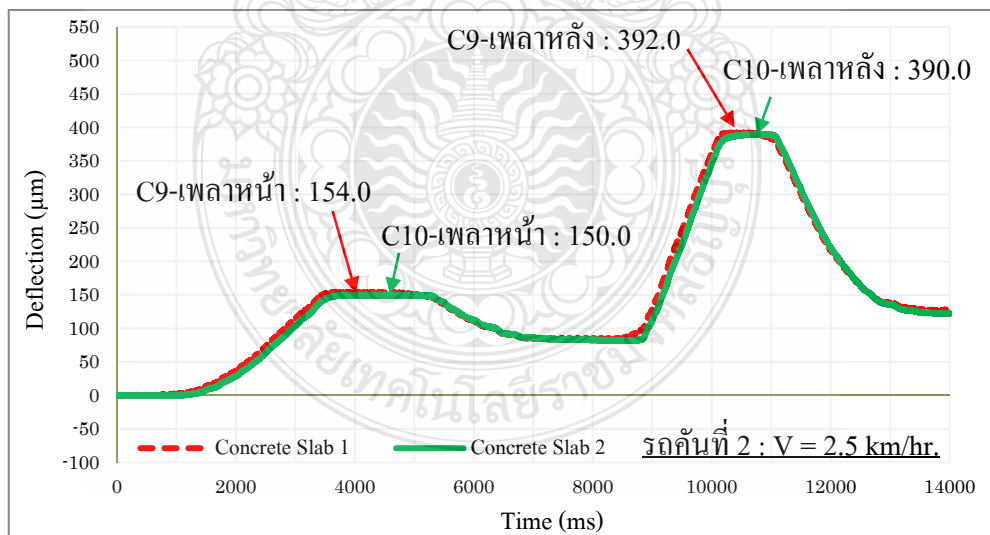
รูปที่ ข.33 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



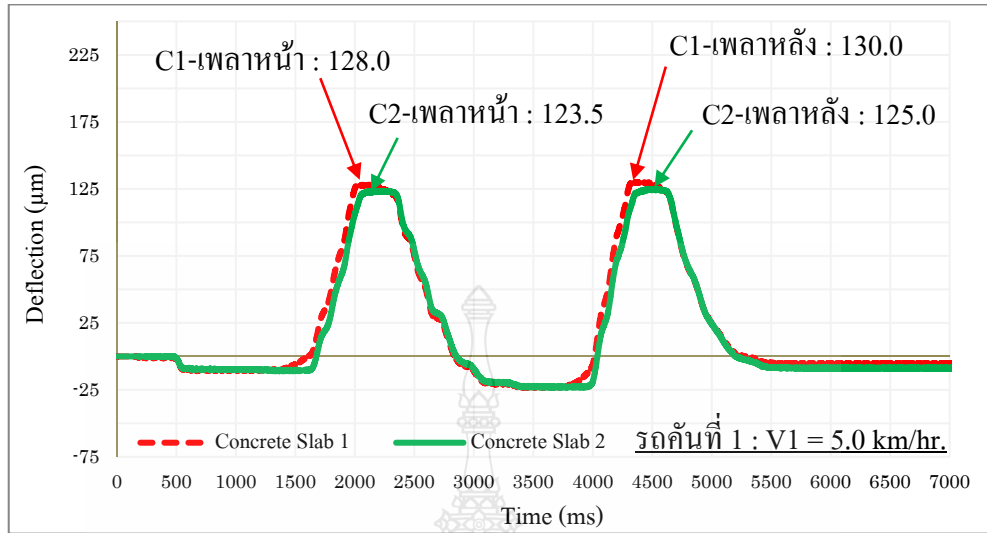
รูปที่ ข.34 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V4 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.



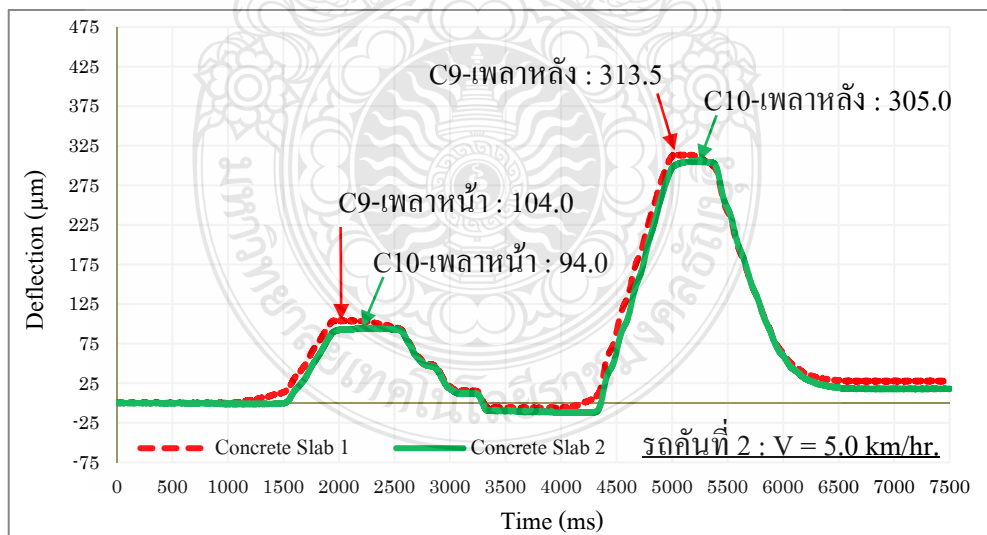
รูปที่ ข.35 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.



รูปที่ ข.36 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 2.5 กม./ชม.

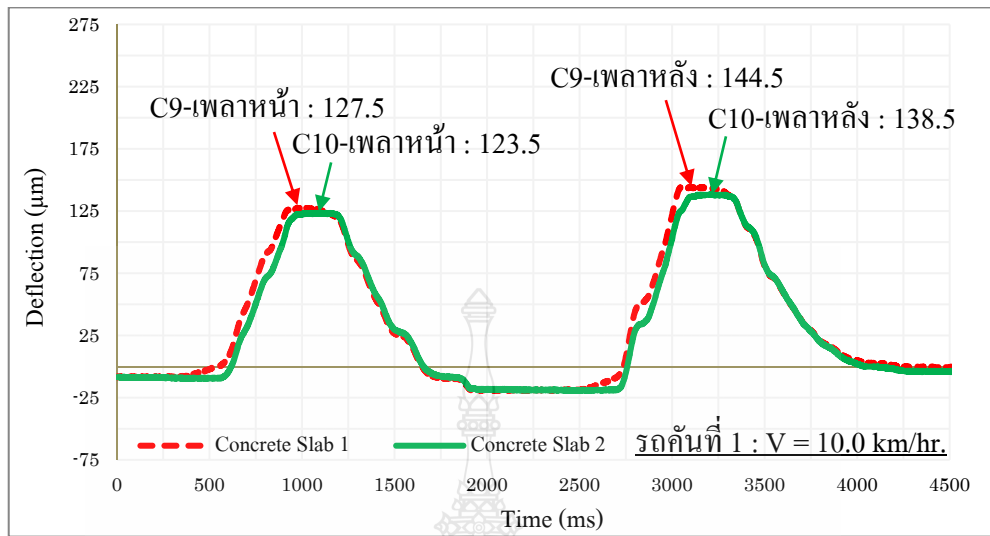


รูปที่ ข.37 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.

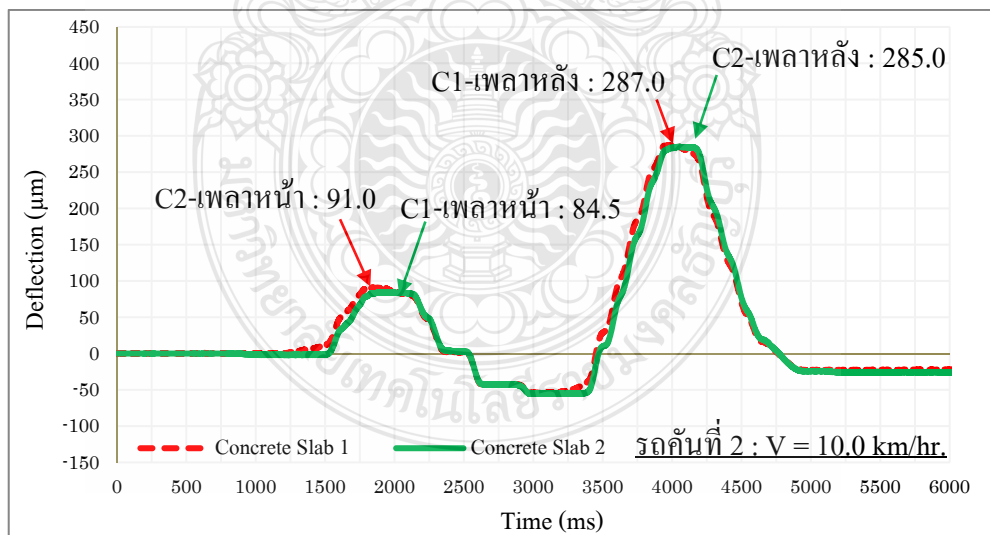


รูปที่ ข.38 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 5.0 กม./ชม.





รูปที่ ข.39 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.

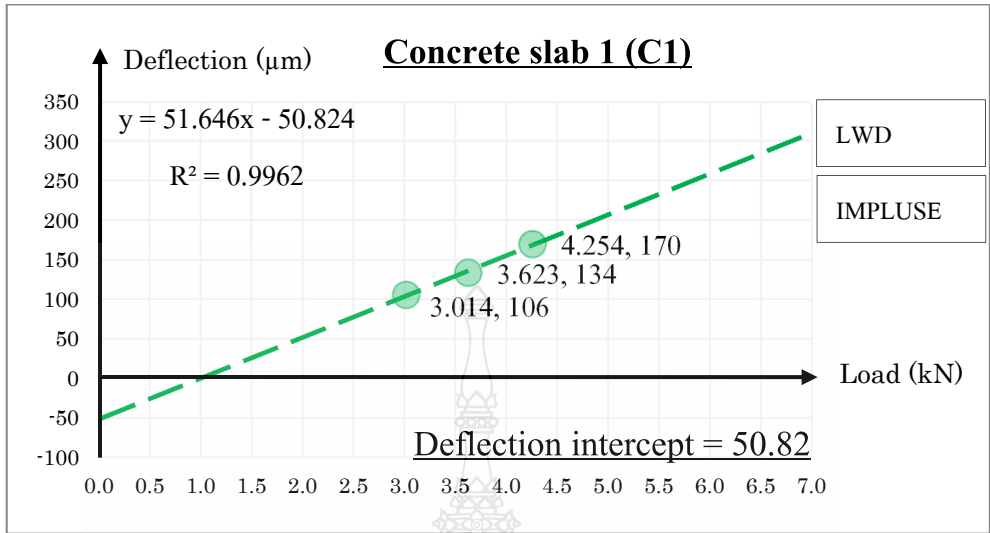


รูปที่ ข.40 ผลวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อ V5 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 ความเร็ว 10.0 กม./ชม.

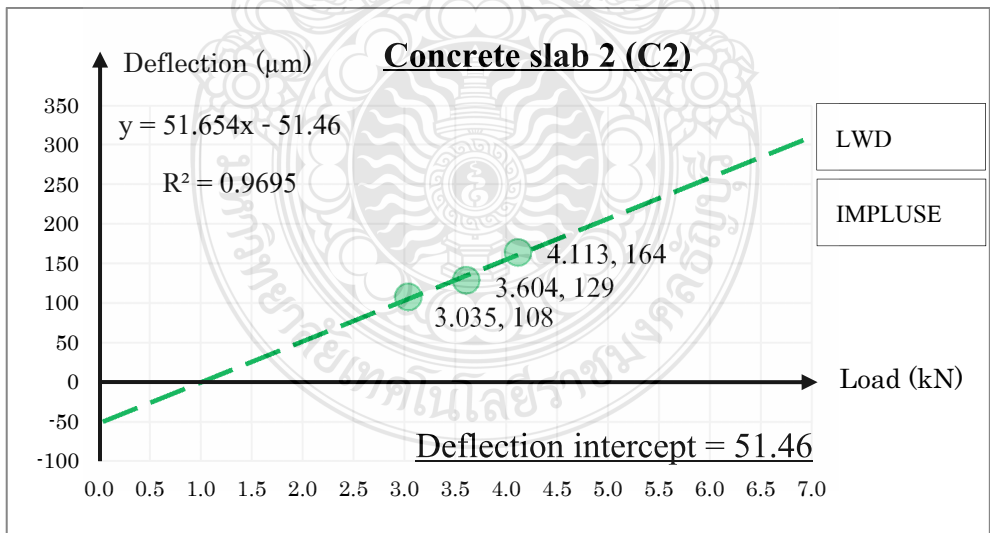
ภาคผนวก ค

ผลวิเคราะห์หาโพรงจากผลทดสอบของเครื่อง LWD และเครื่อง port-LTE

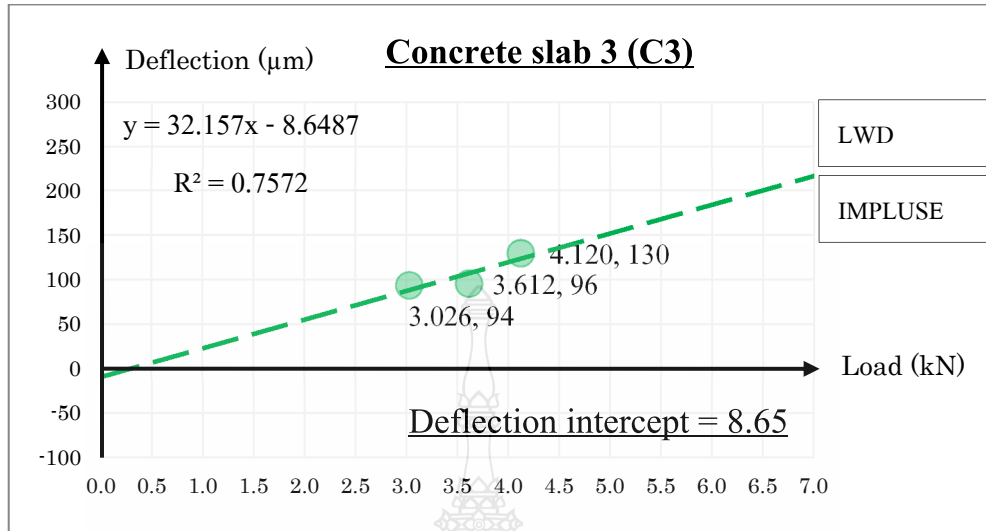




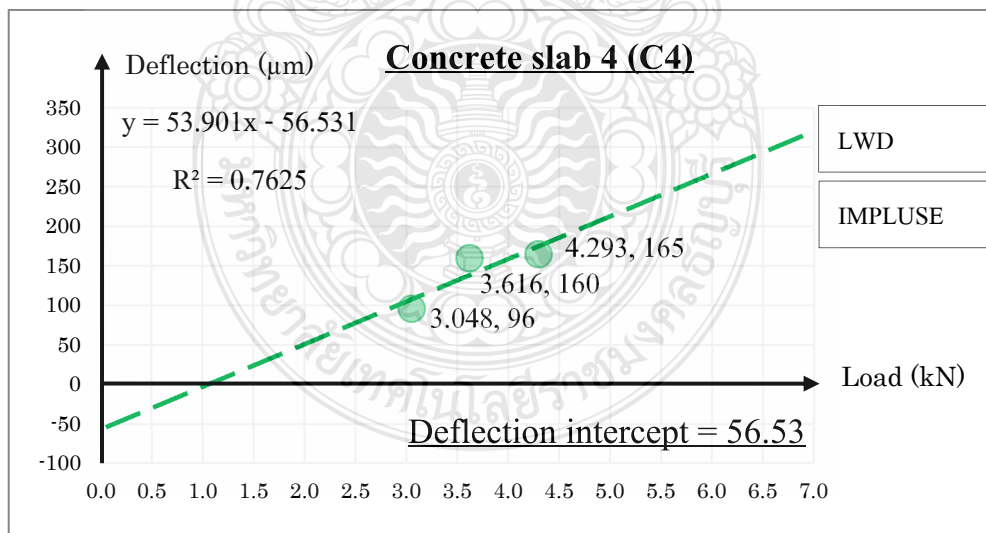
รูปที่ ค.1 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C1 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



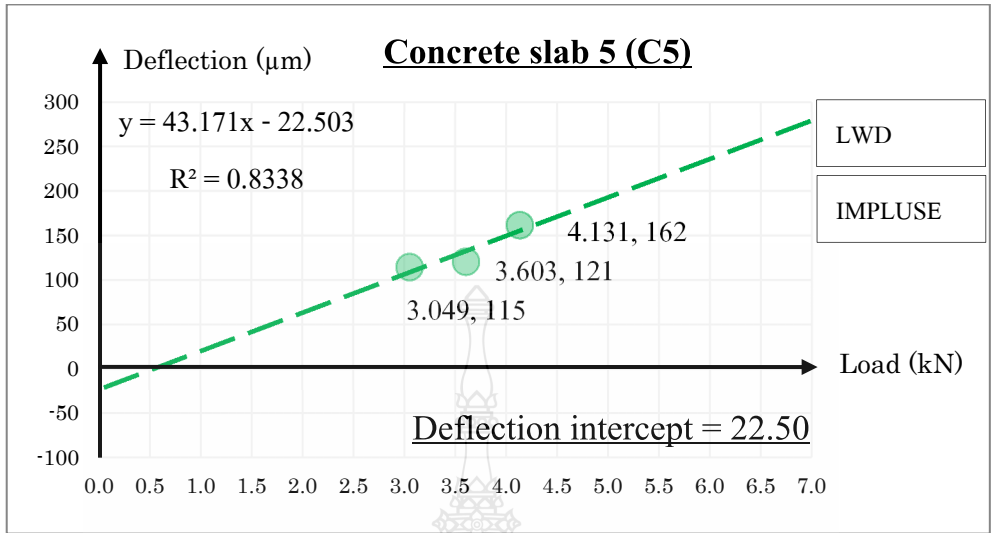
รูปที่ ค.2 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C2 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



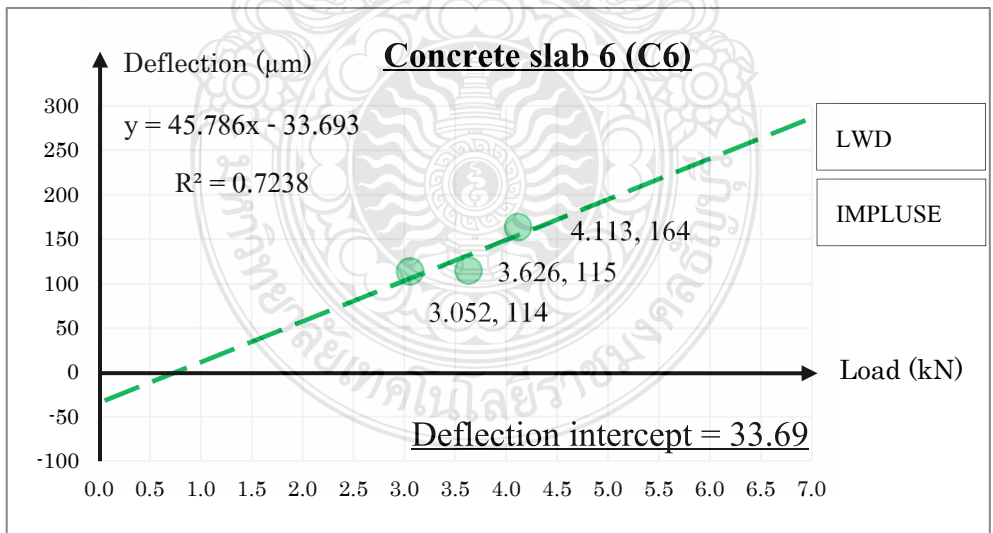
รูปที่ ค.3 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C3 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



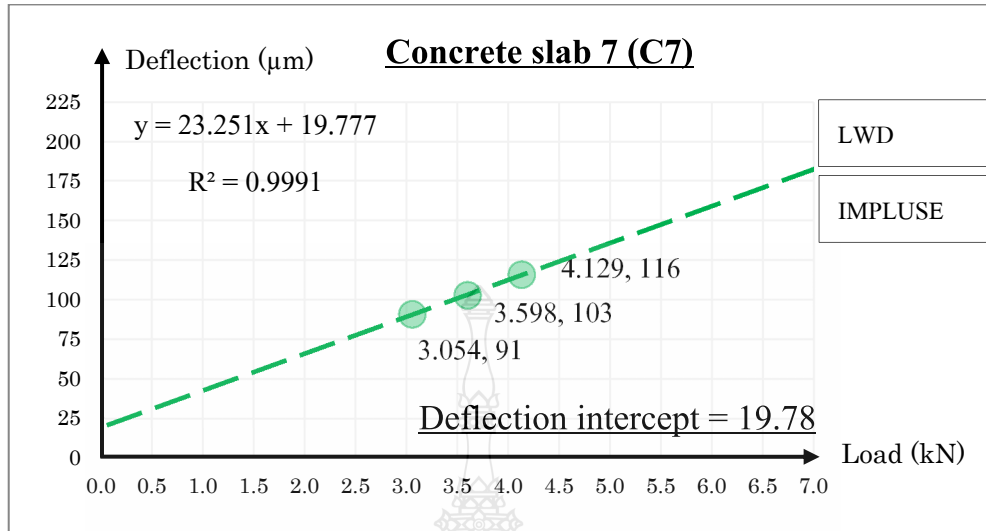
รูปที่ ค.4 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C4 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



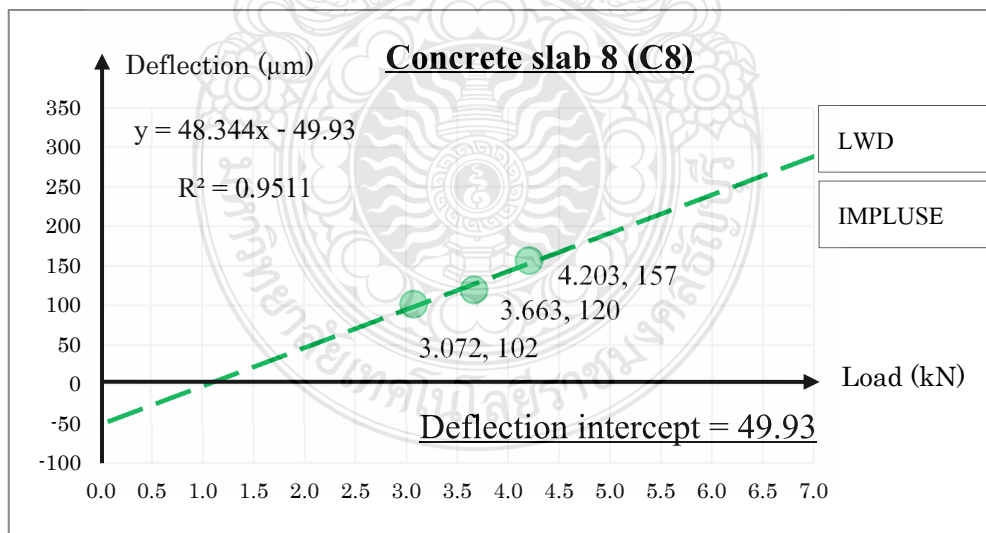
รูปที่ ค.5 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C5 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



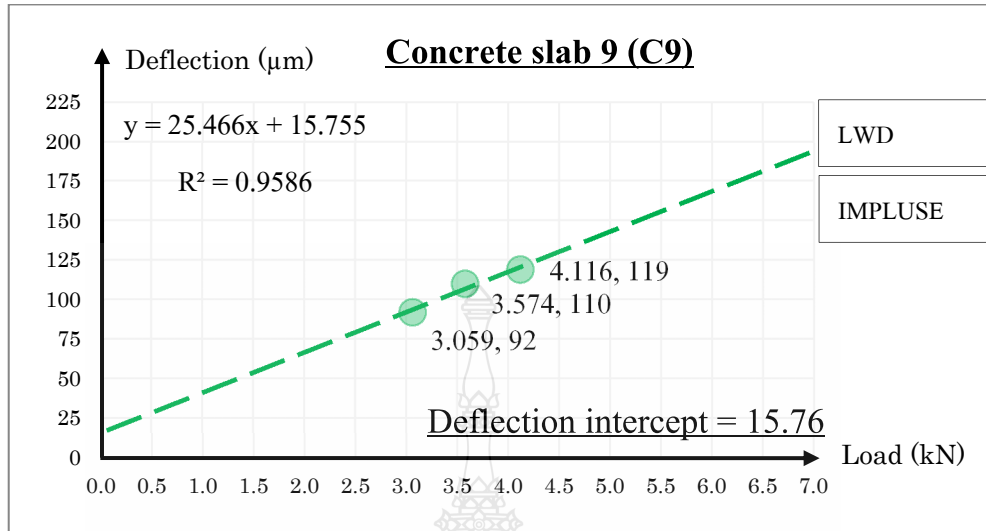
รูปที่ ค.6 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C6 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



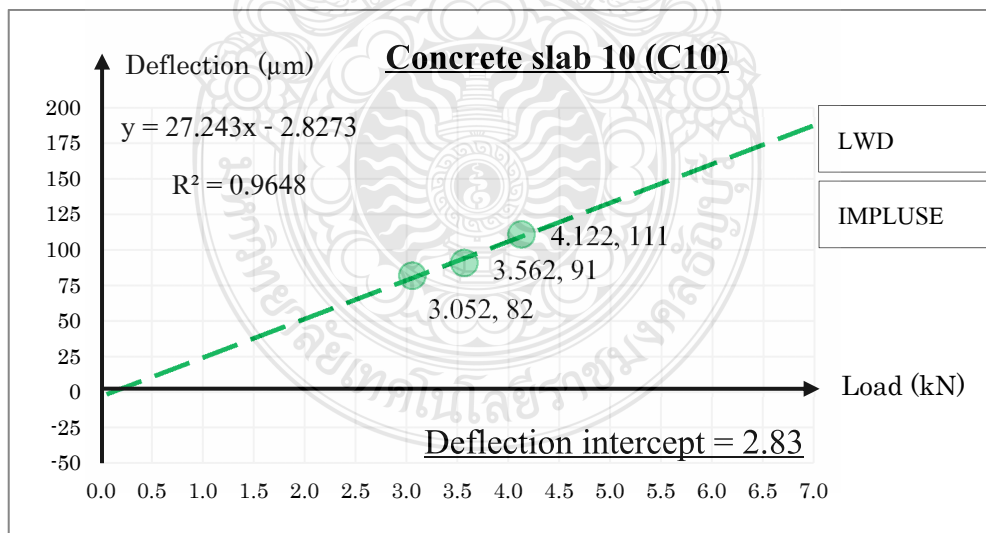
รูปที่ ค.7 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C7 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



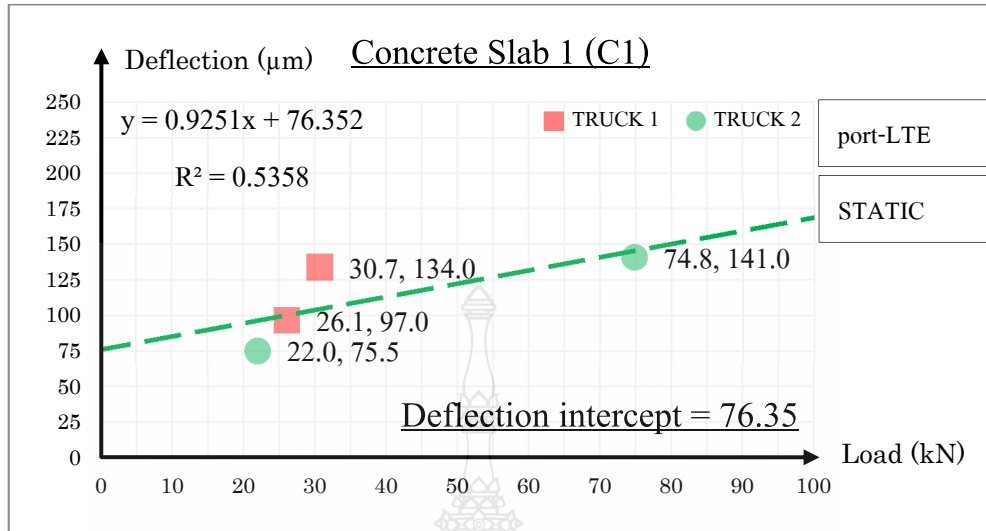
รูปที่ ค.8 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C8 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



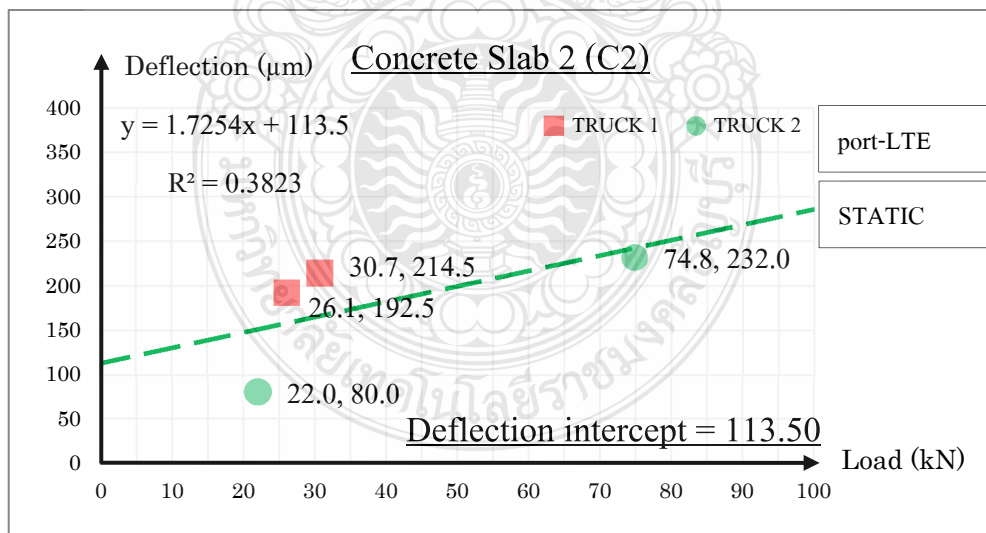
รูปที่ ค.9 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C9 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD



รูปที่ ค.10 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C10 ด้วย VLCDA method จากผลการทดสอบของเครื่อง LWD

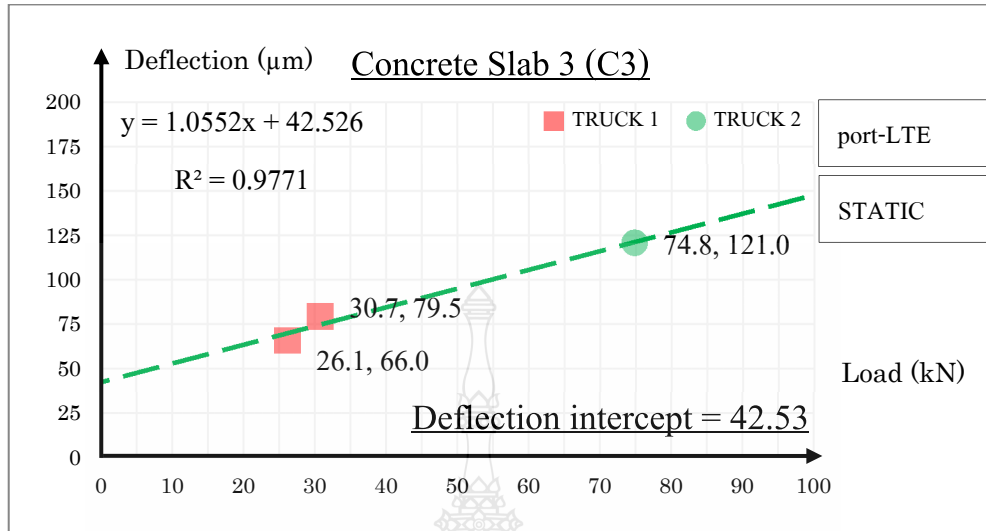


รูปที่ ค.11 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C1 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต

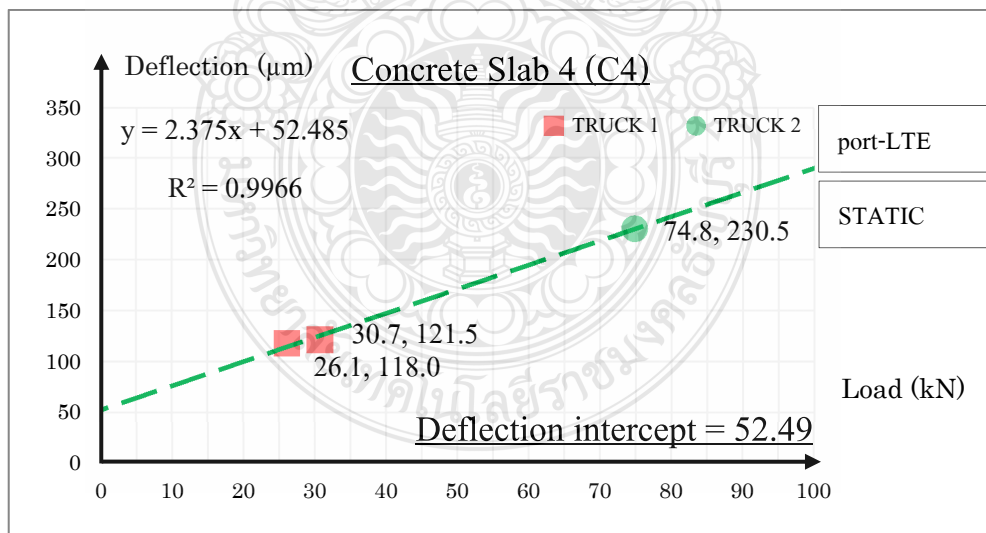


รูปที่ ค.12 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C2 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต

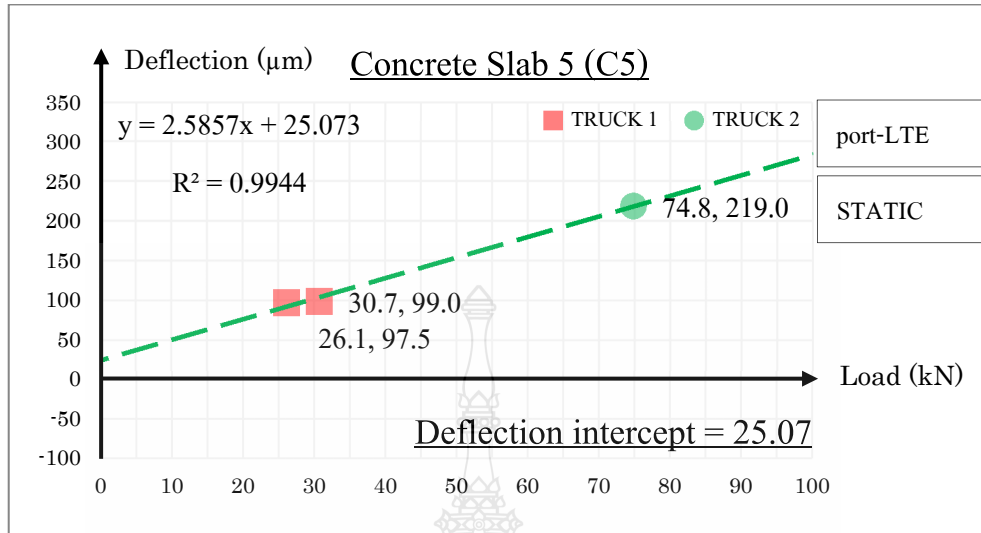




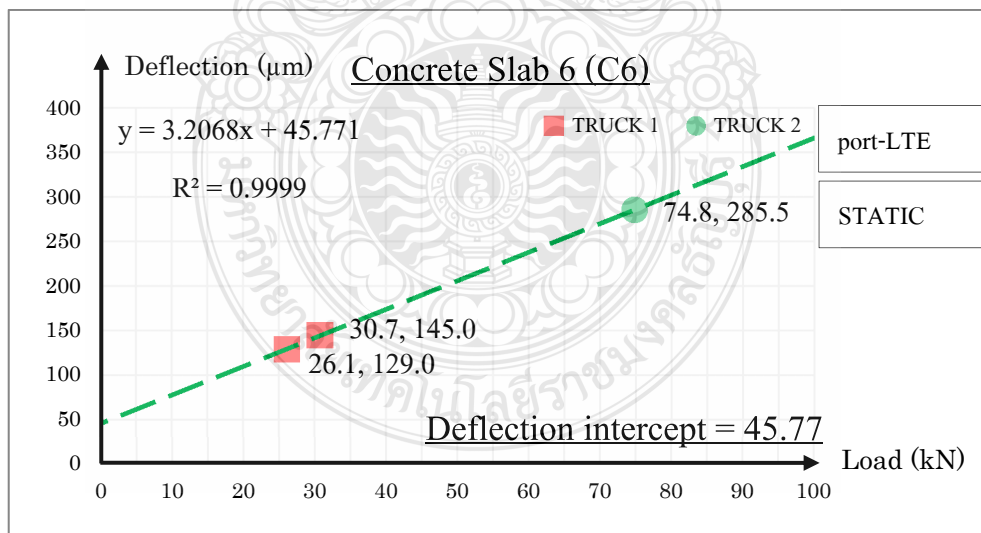
รูปที่ ค.13 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C3 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



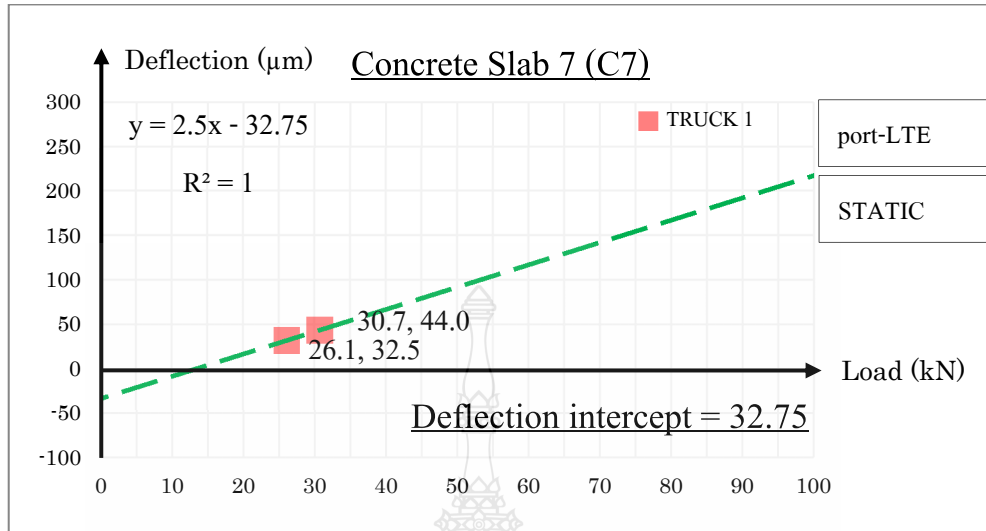
รูปที่ ค.14 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C4 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



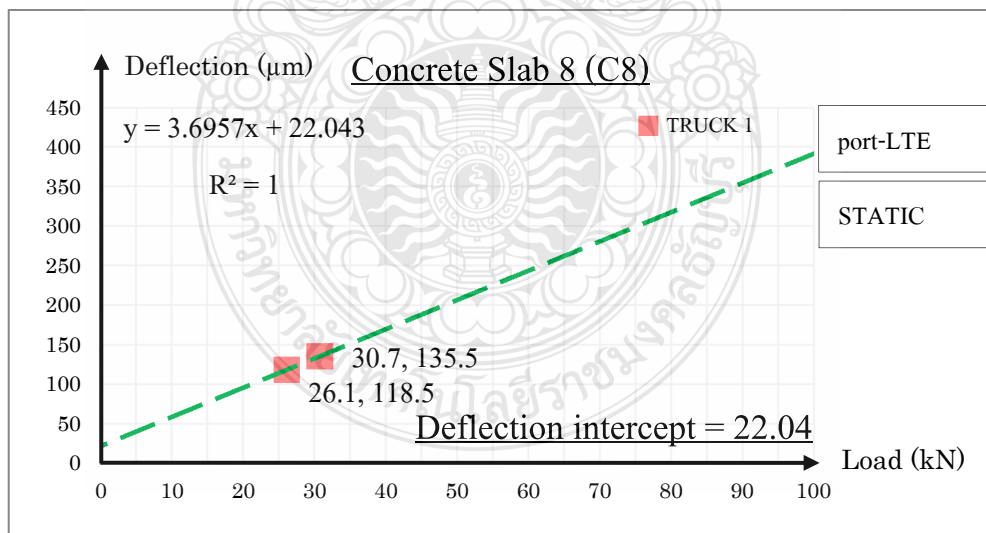
รูปที่ ค.15 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C5 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



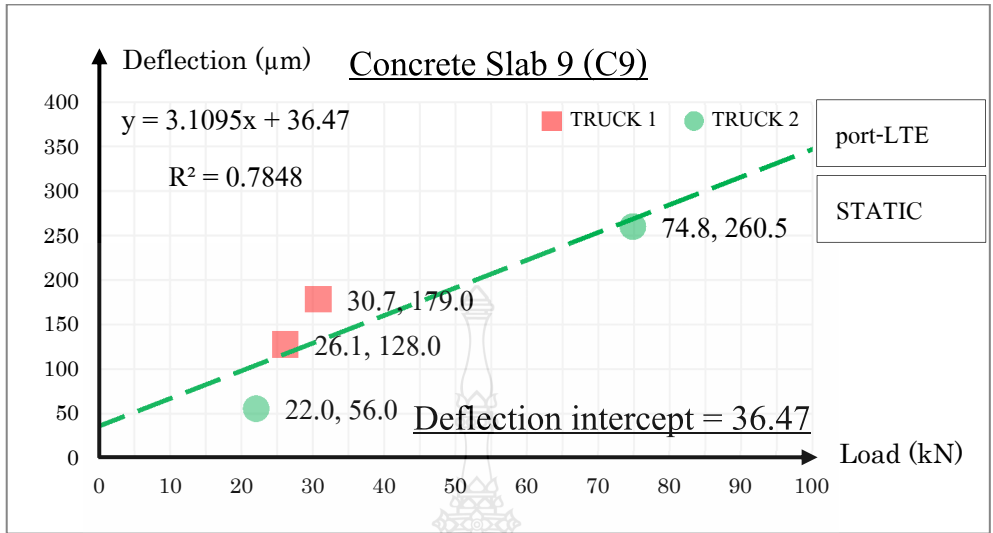
รูปที่ ค.16 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C6 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



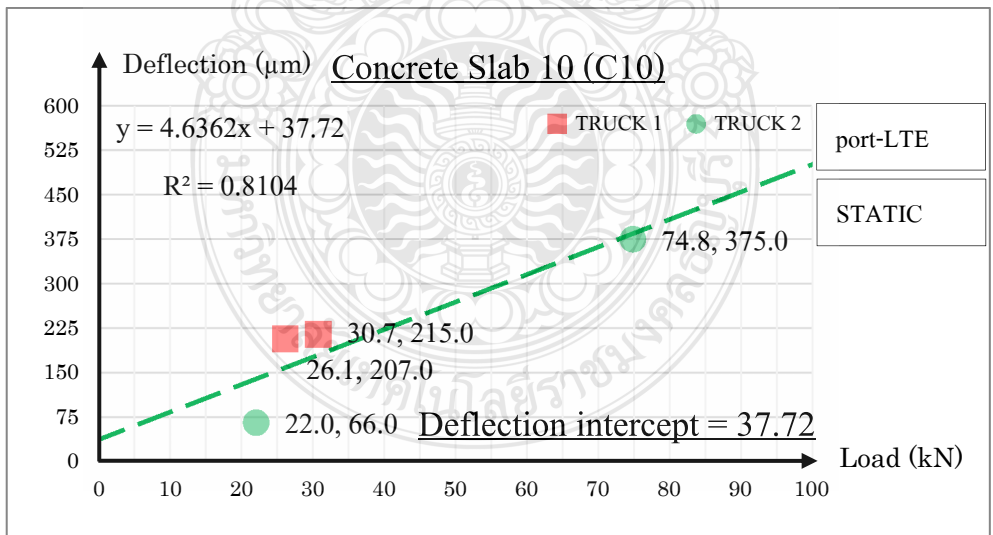
รูปที่ ค.17 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C7 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



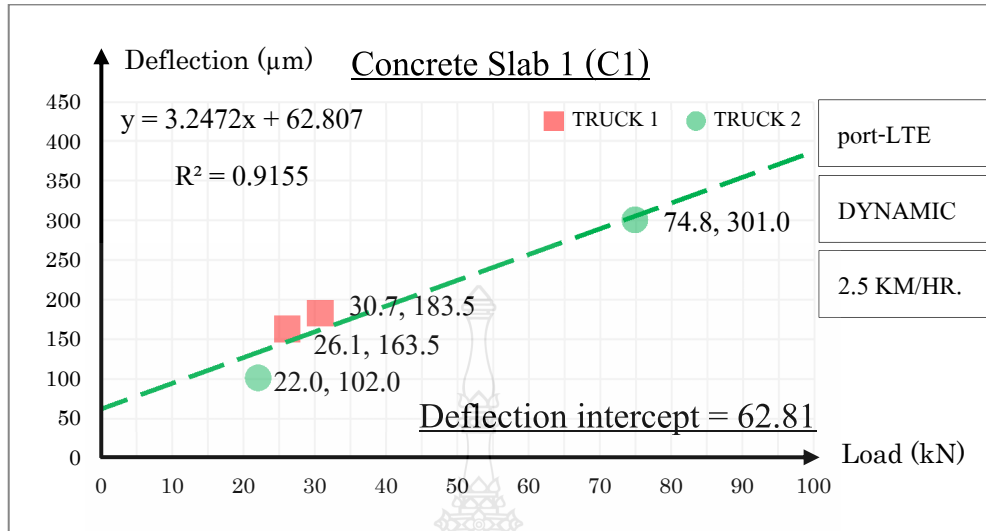
รูปที่ ค.18 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C8 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



รูปที่ ค.19 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C9 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต

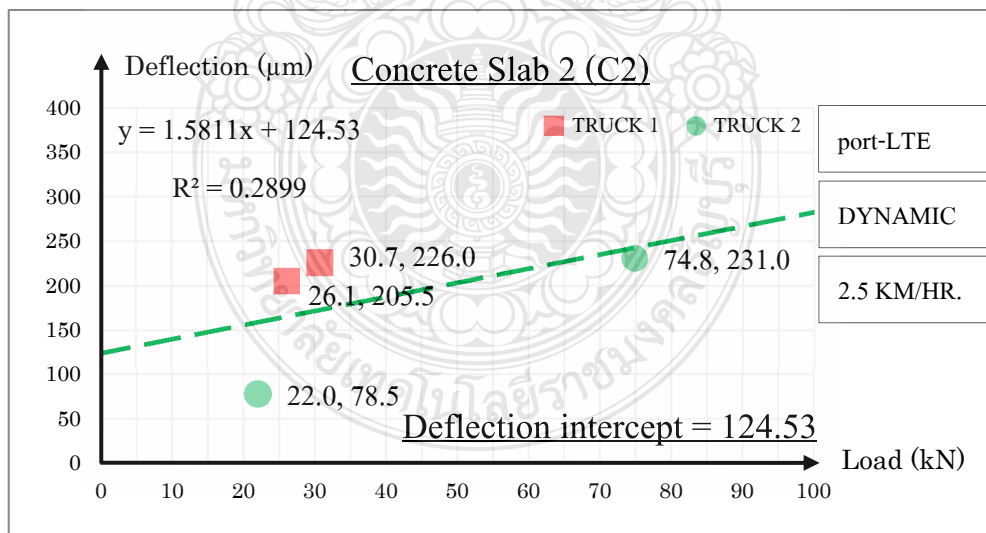


รูปที่ ค.20 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C10 ด้วย VLCDA method  
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักสถิต



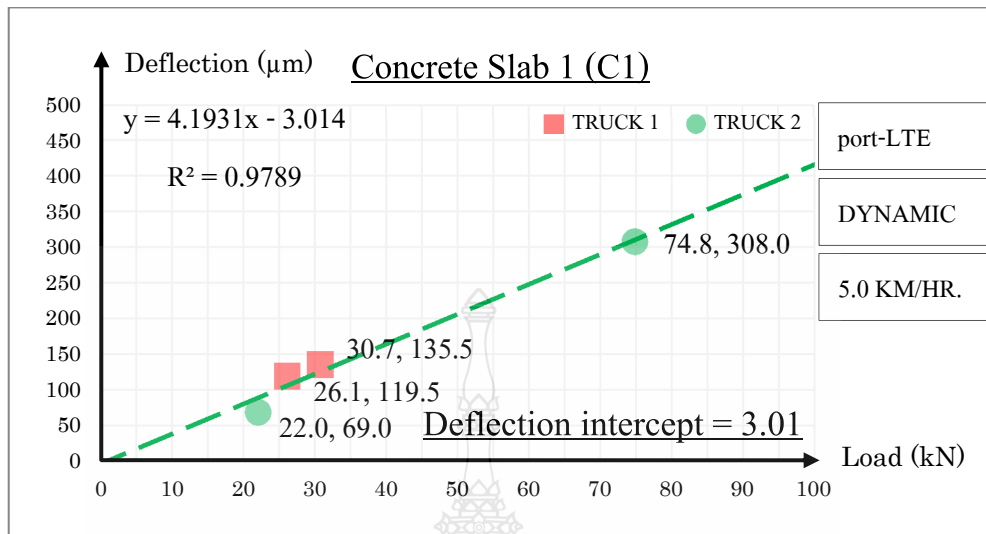
รูปที่ ค.21 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C1 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



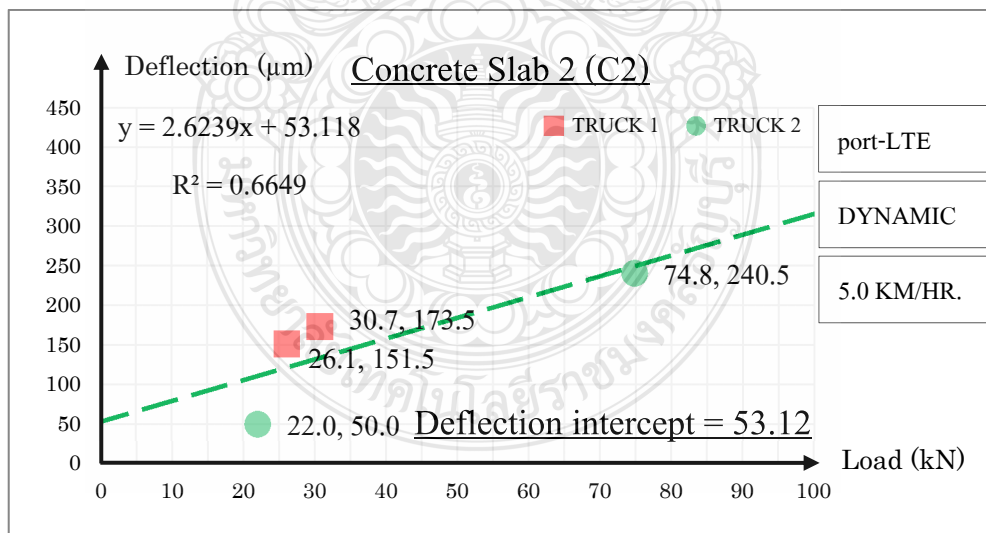
รูปที่ ค.22 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C2 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



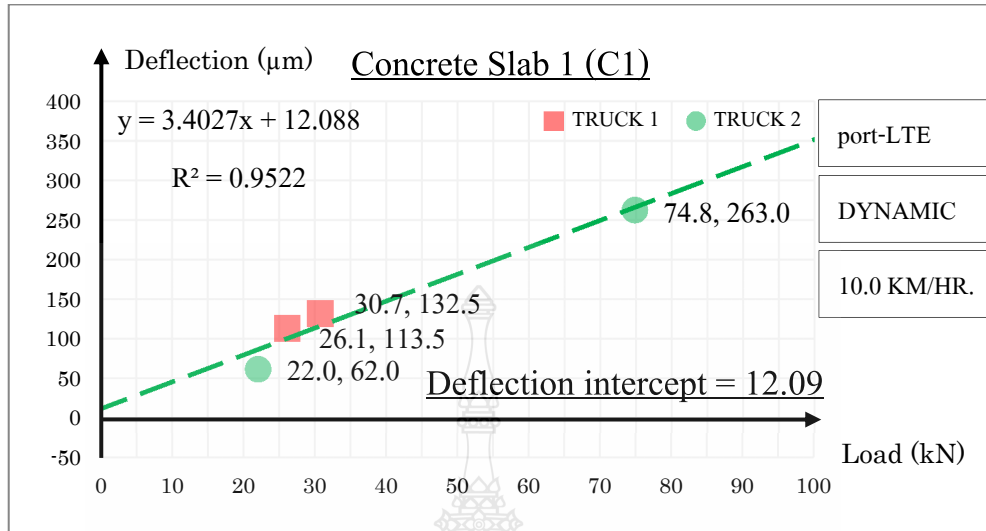
รูปที่ ค.23 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C1 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



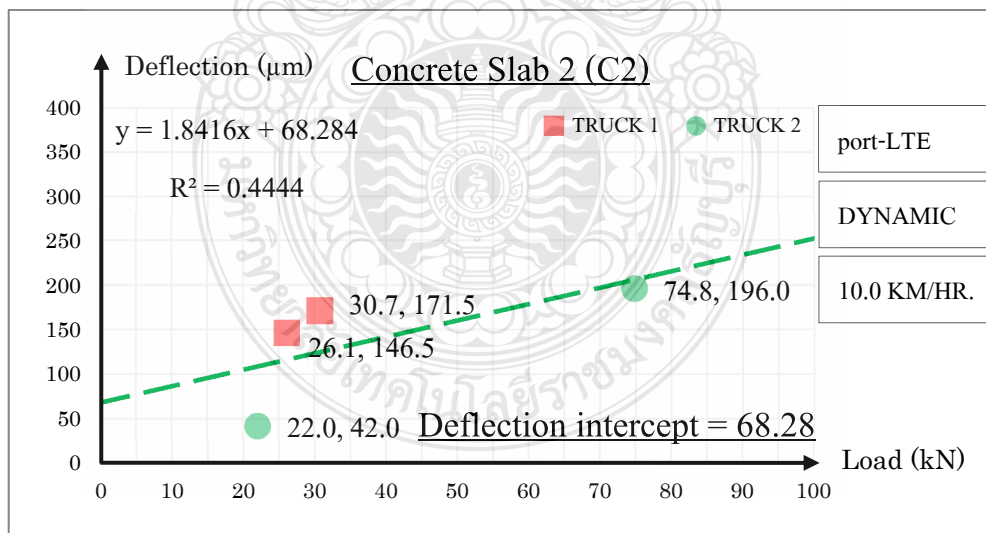
รูปที่ ค.24 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C2 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



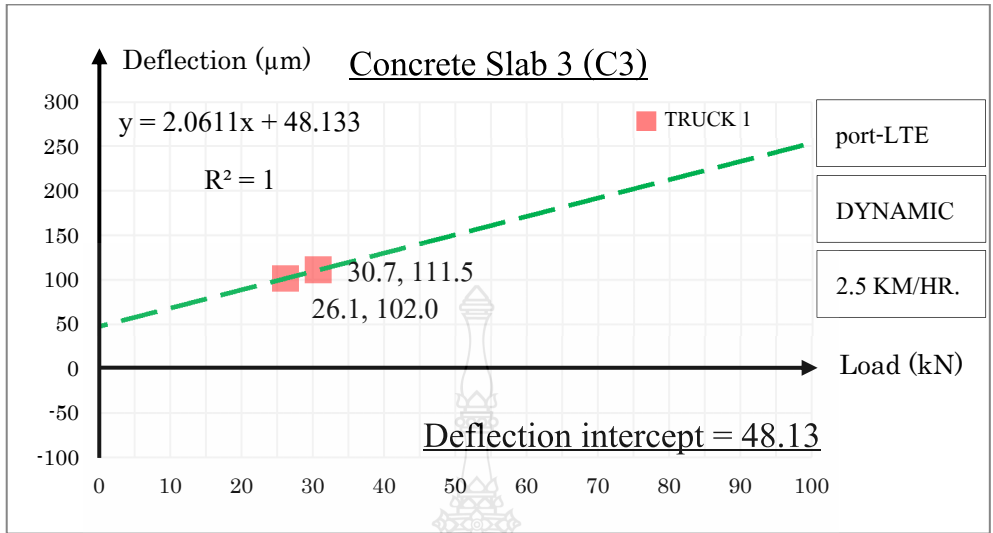
รูปที่ ค.25 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C1 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



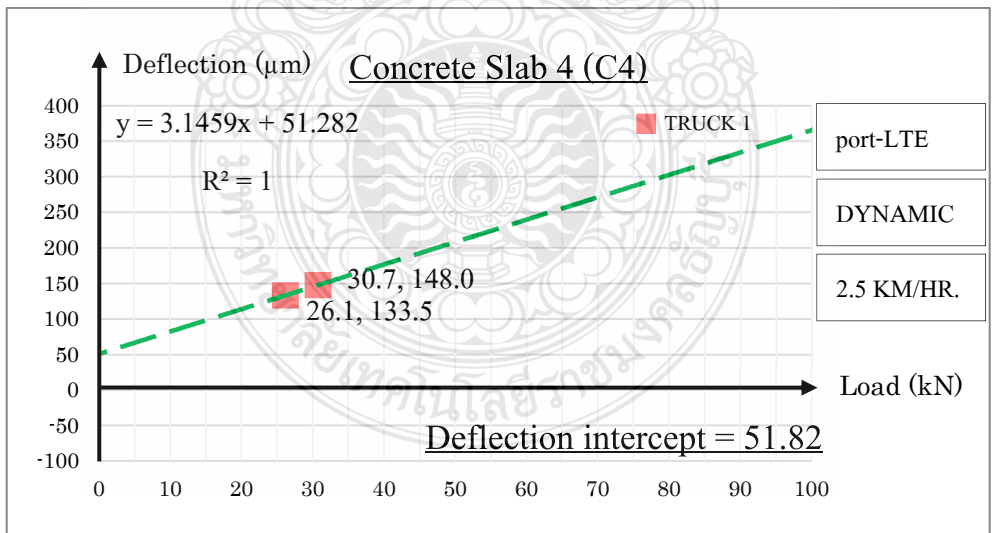
รูปที่ ค.26 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C2 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



รูปที่ ค.27 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C3 ด้วย VLCDA method

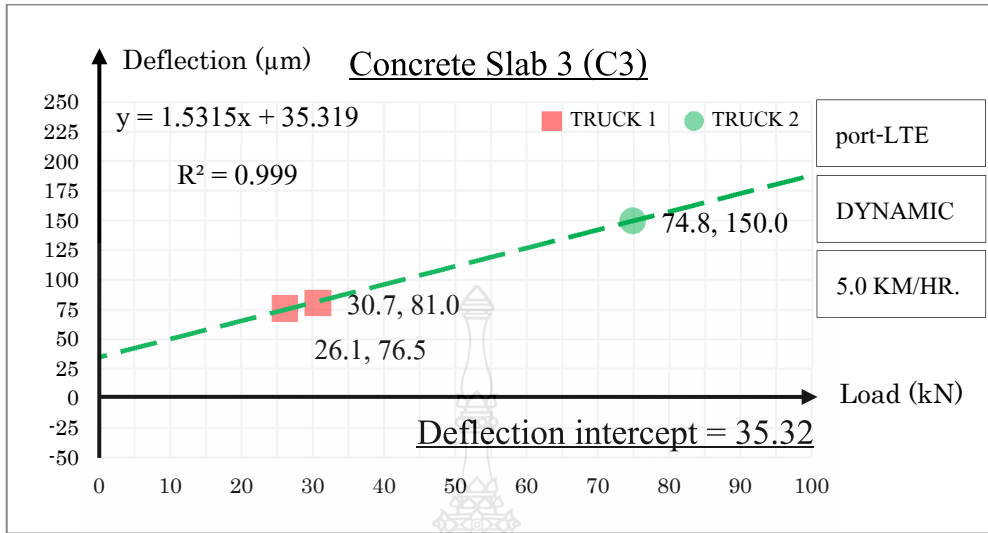
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



รูปที่ ค.28 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C4 ด้วย VLCDA method

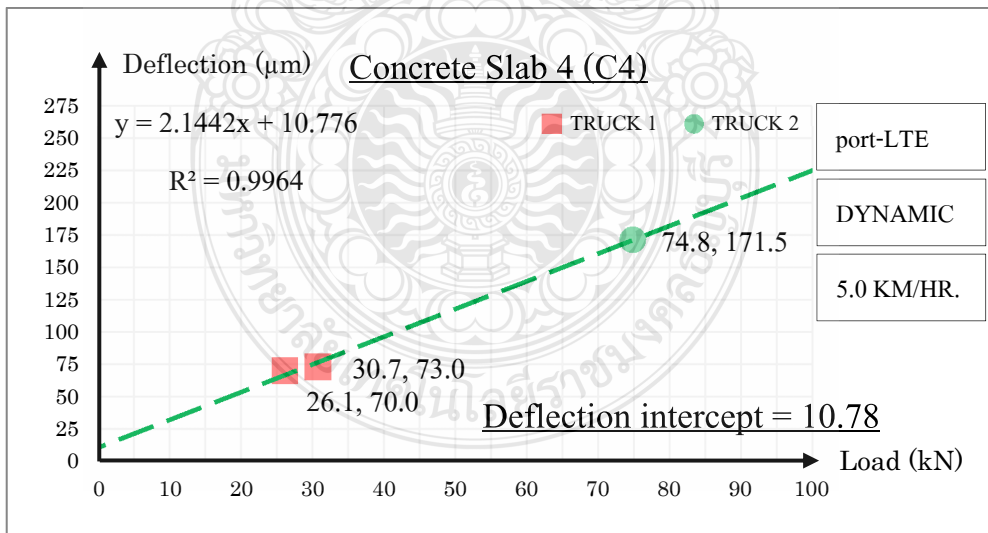
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.





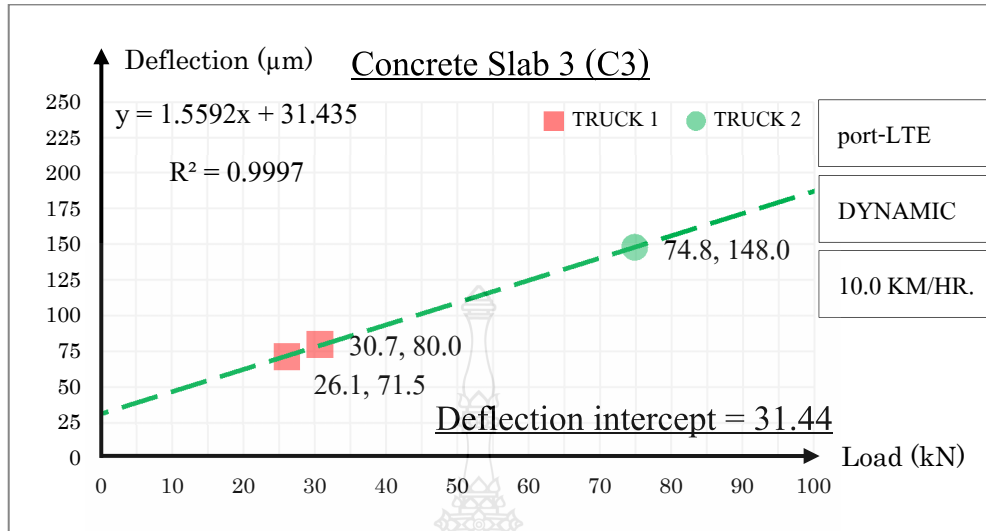
รูปที่ ค.29 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C3 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



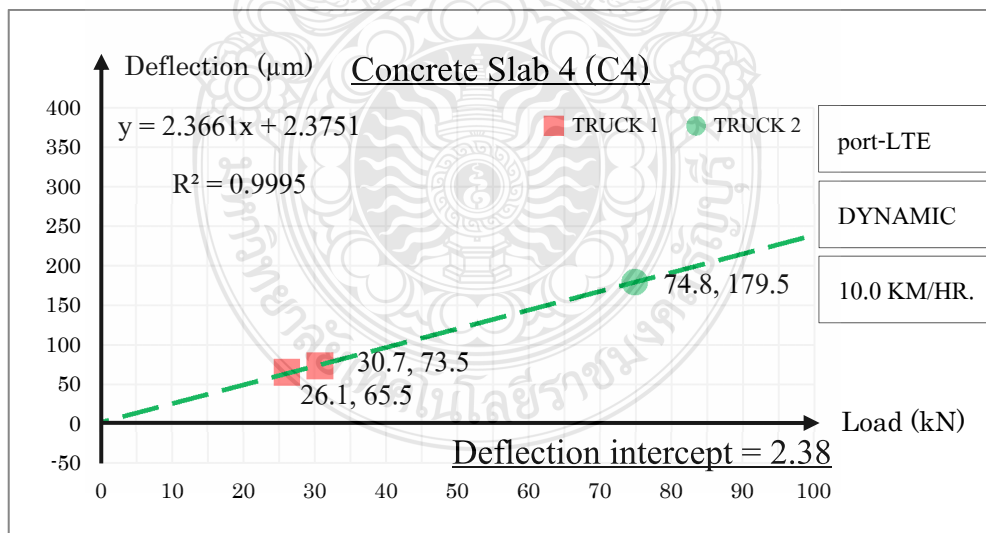
รูปที่ ค.30 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C4 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



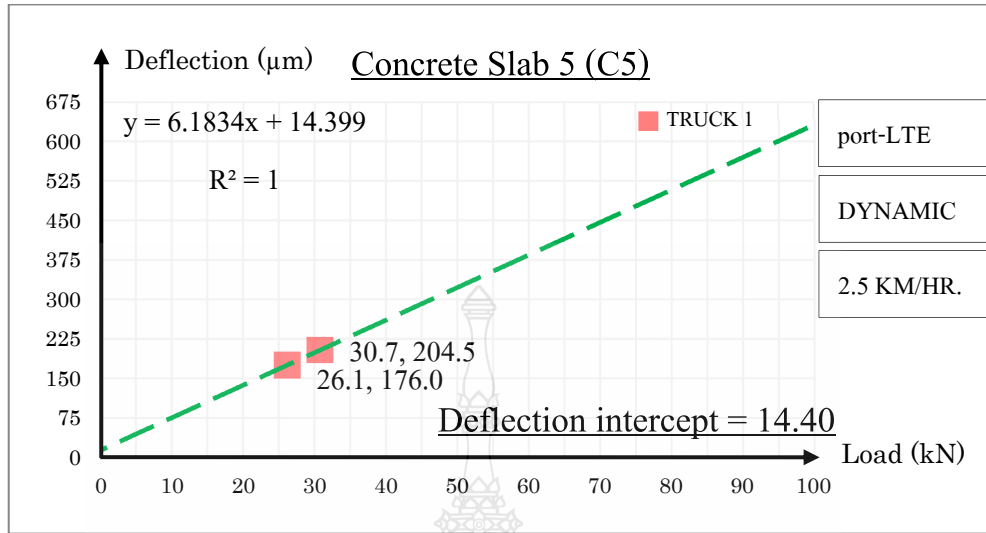
รูปที่ ค.31 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C3 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



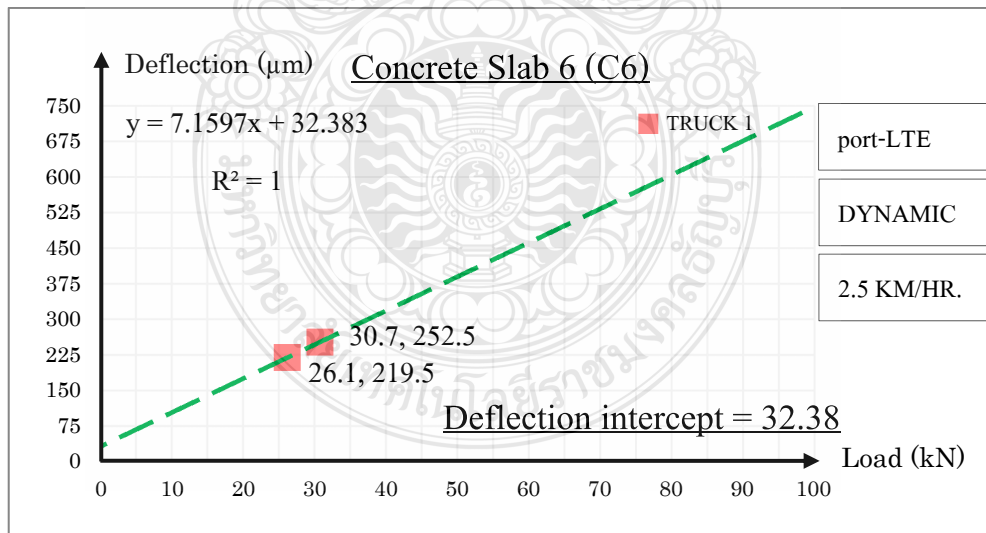
รูปที่ ค.32 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C4 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



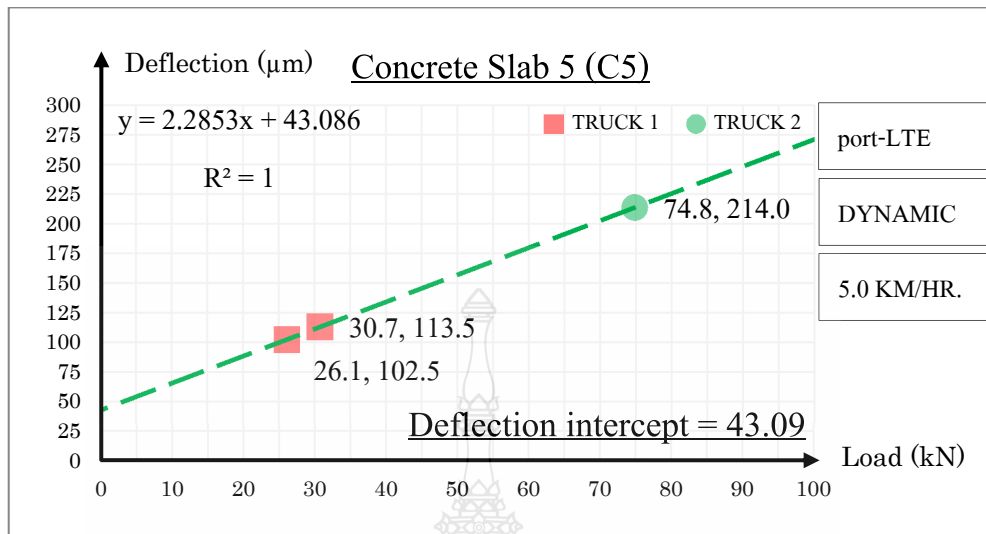
รูปที่ ค.33 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C5 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



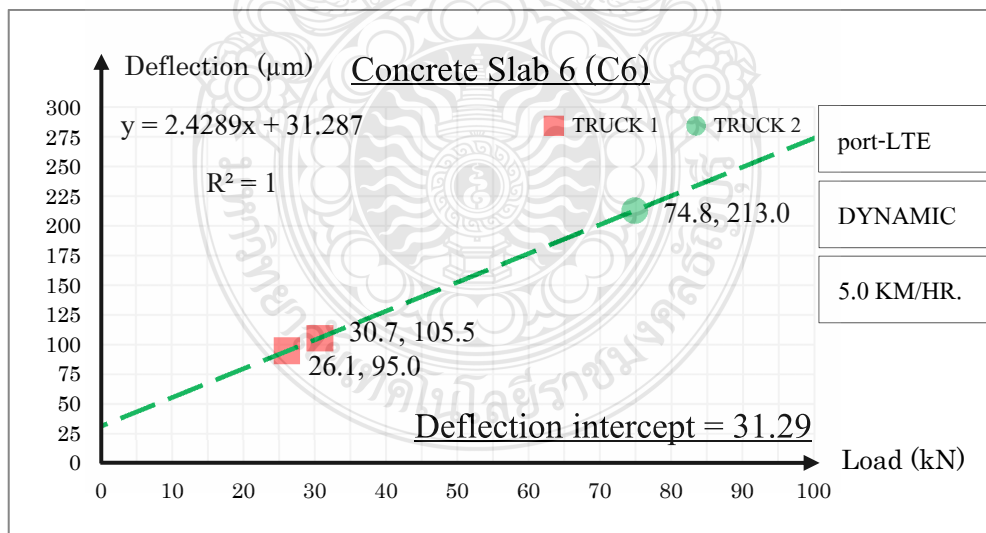
รูปที่ ค.34 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C6 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



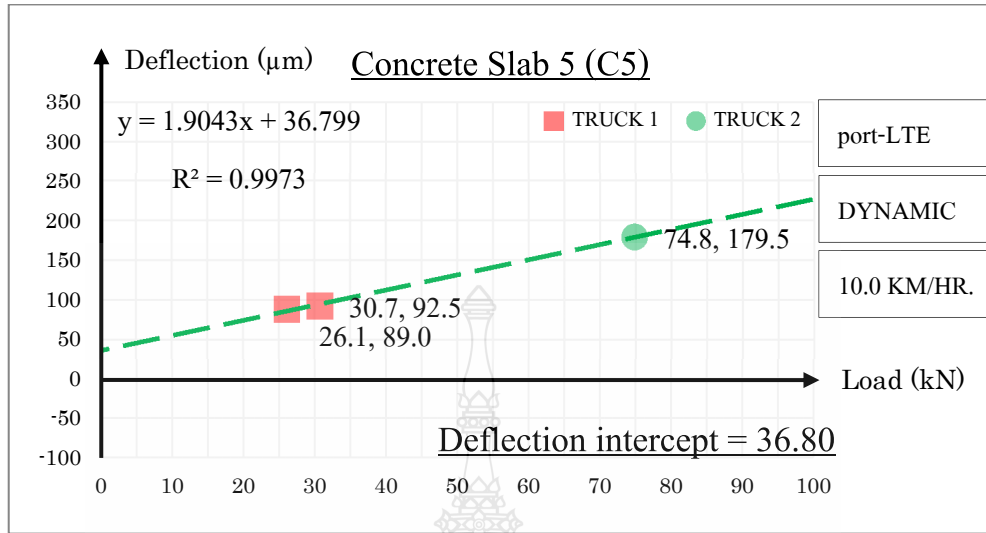
รูปที่ ค.35 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C5 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



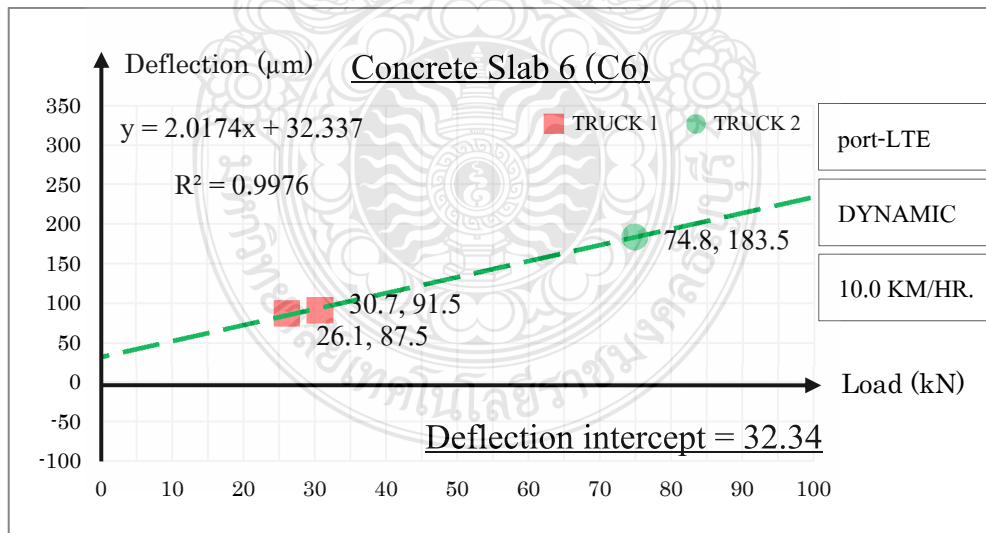
รูปที่ ค.36 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C6 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



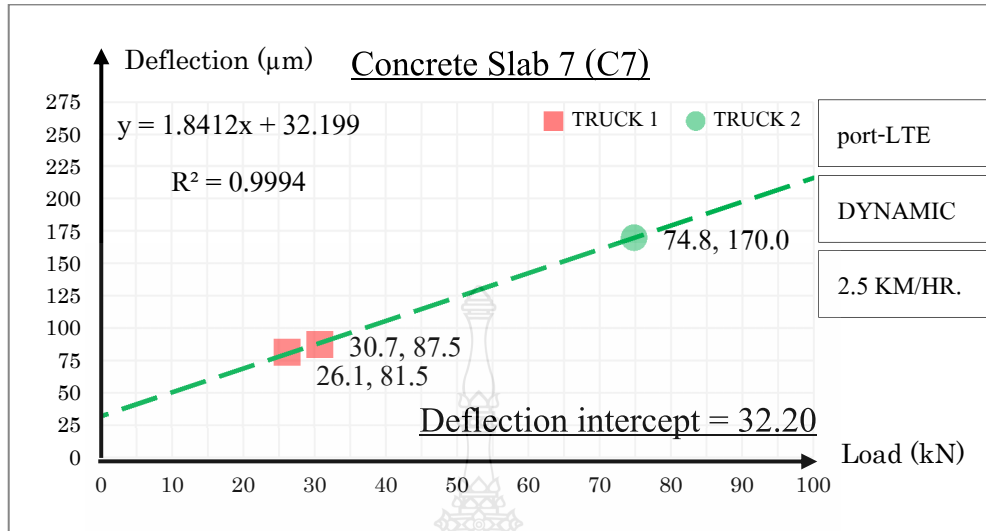
รูปที่ ค.37 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C5 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



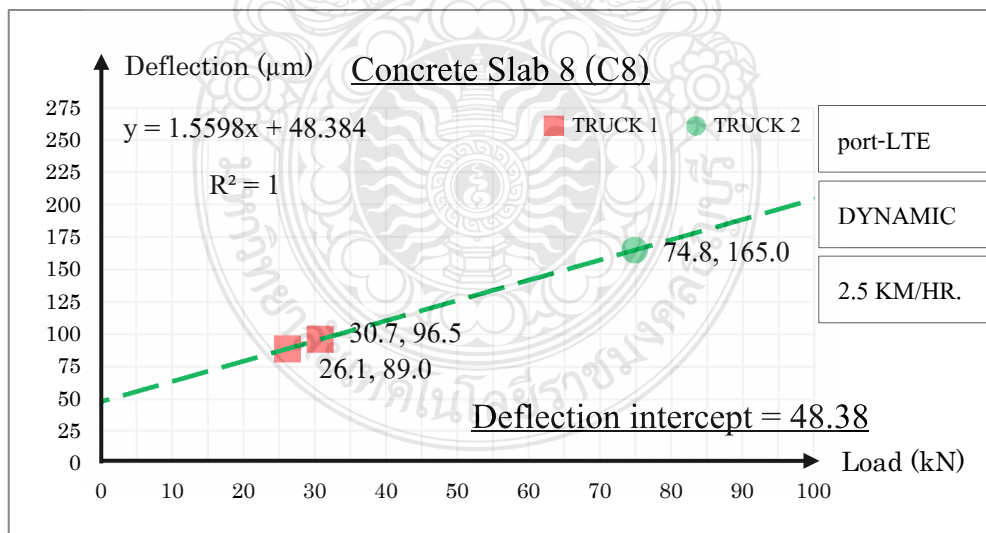
รูปที่ ค.38 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C6 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



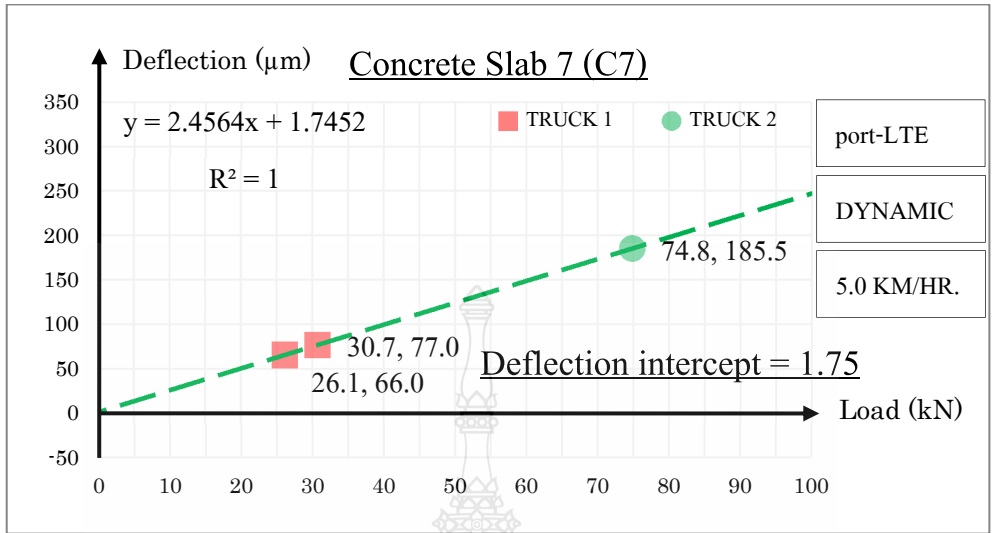
รูปที่ ค.39 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C7 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



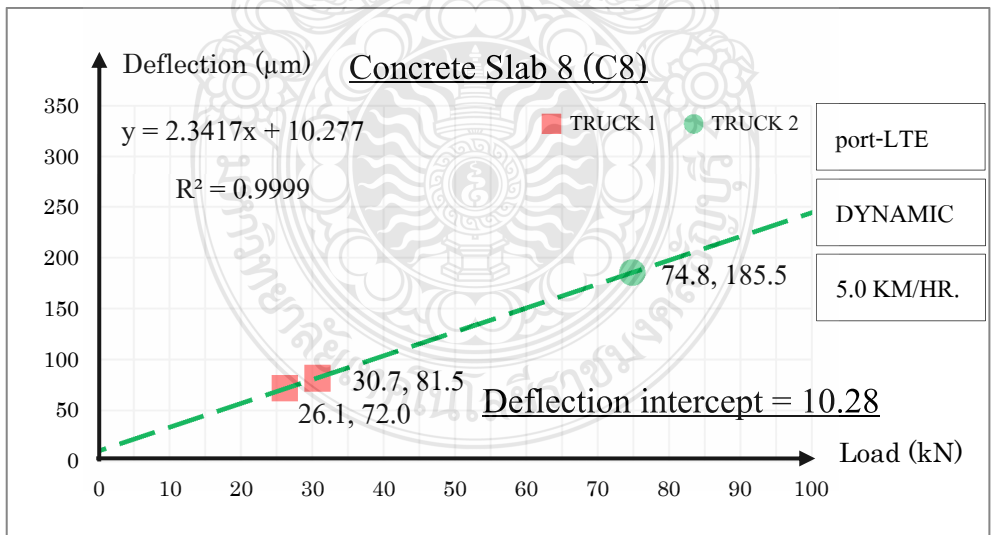
รูปที่ ค.40 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C8 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



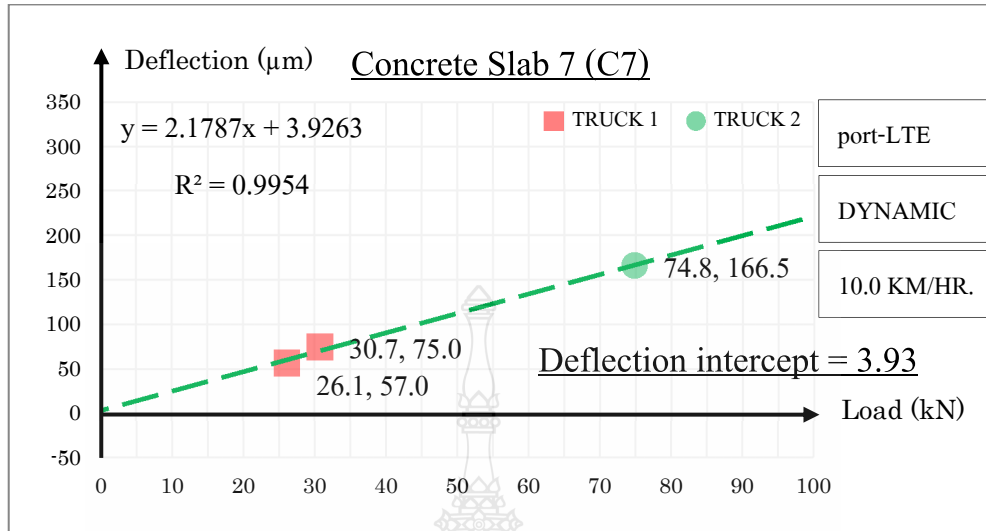
รูปที่ ค.41 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C7 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



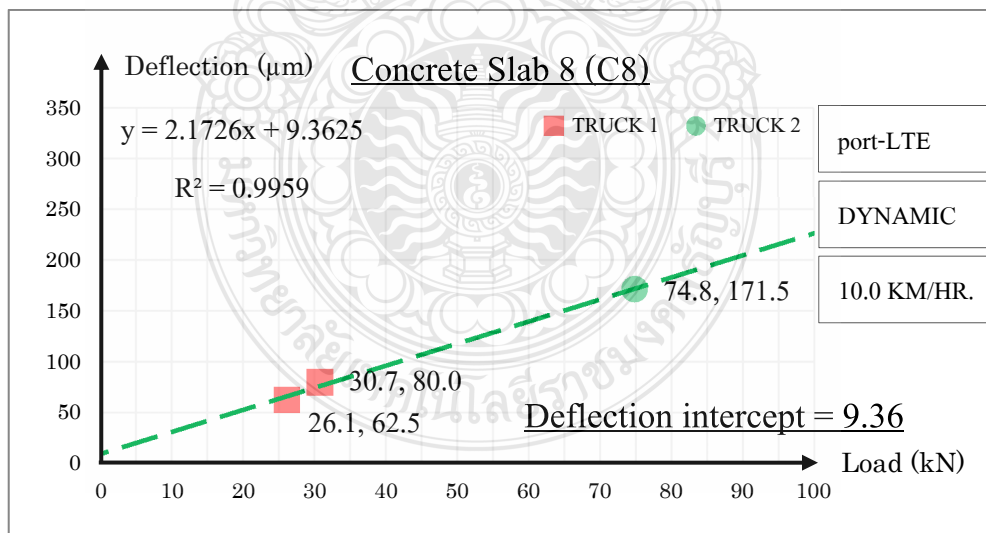
รูปที่ ค.42 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C8 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



รูปที่ ค.43 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C7 ด้วย VLCDA method

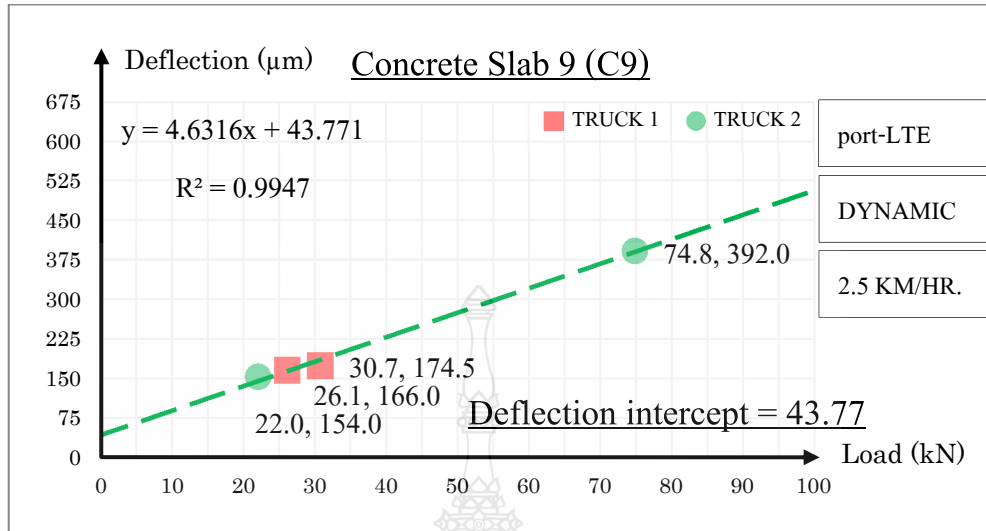
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



รูปที่ ค.44 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C8 ด้วย VLCDA method

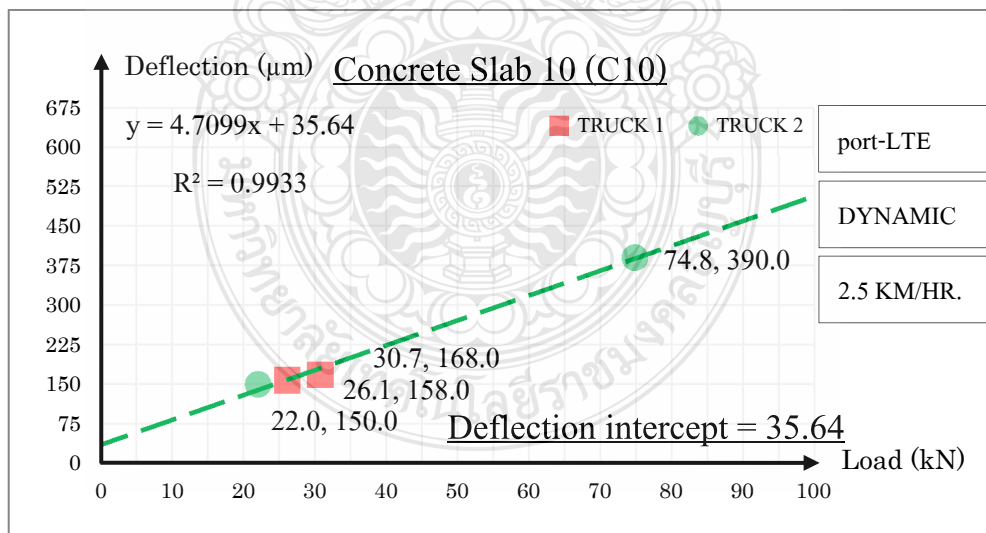
จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.





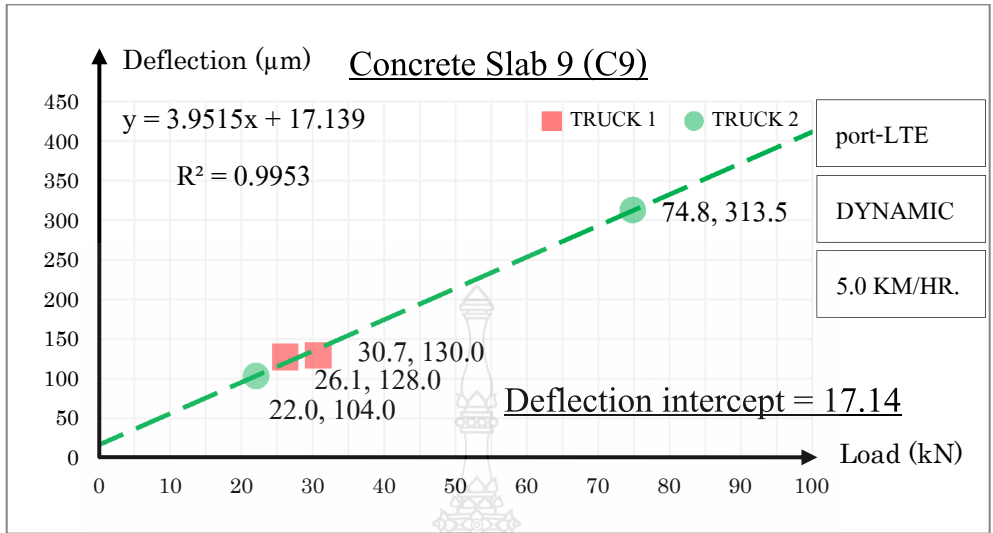
รูปที่ ค.45 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C9 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



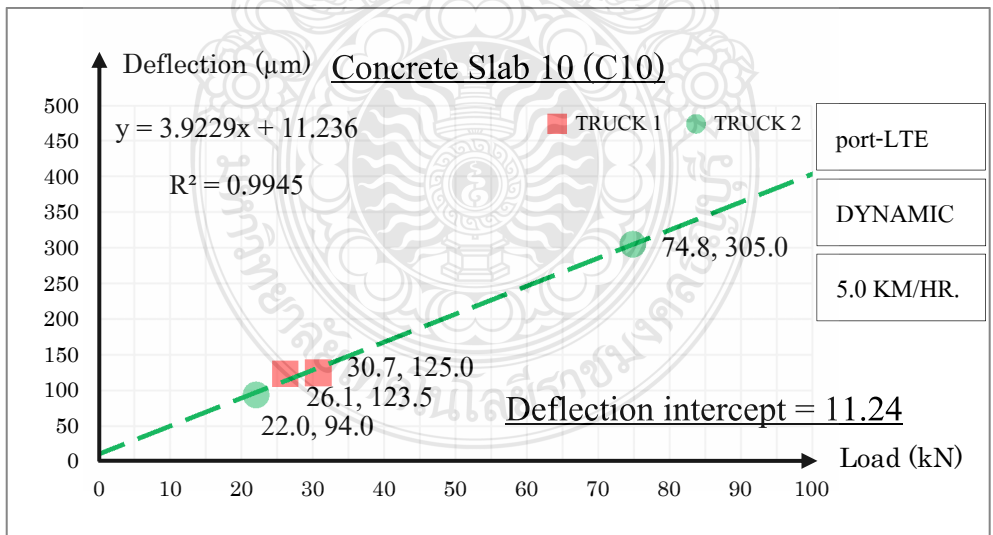
รูปที่ ค.46 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C10 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม.



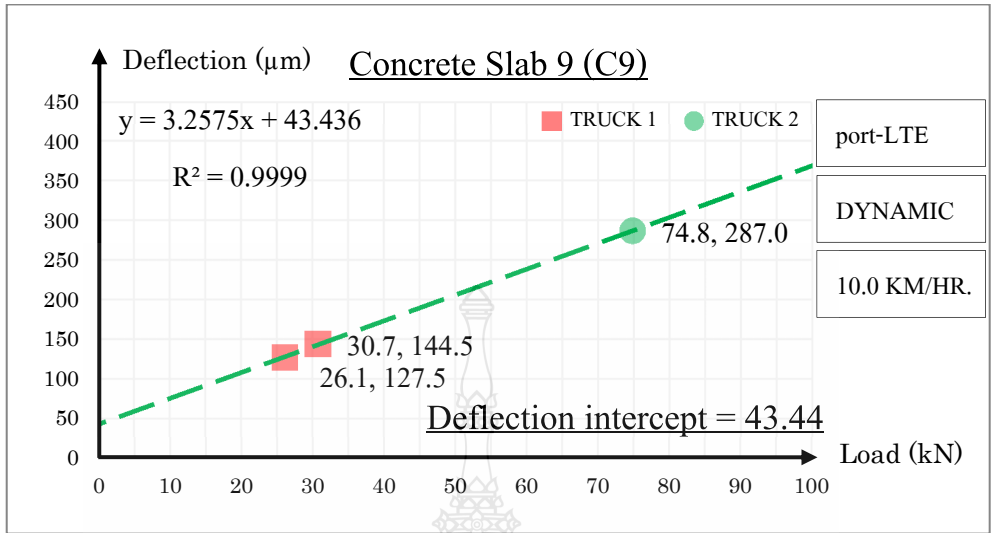
รูปที่ ค.47 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C9 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



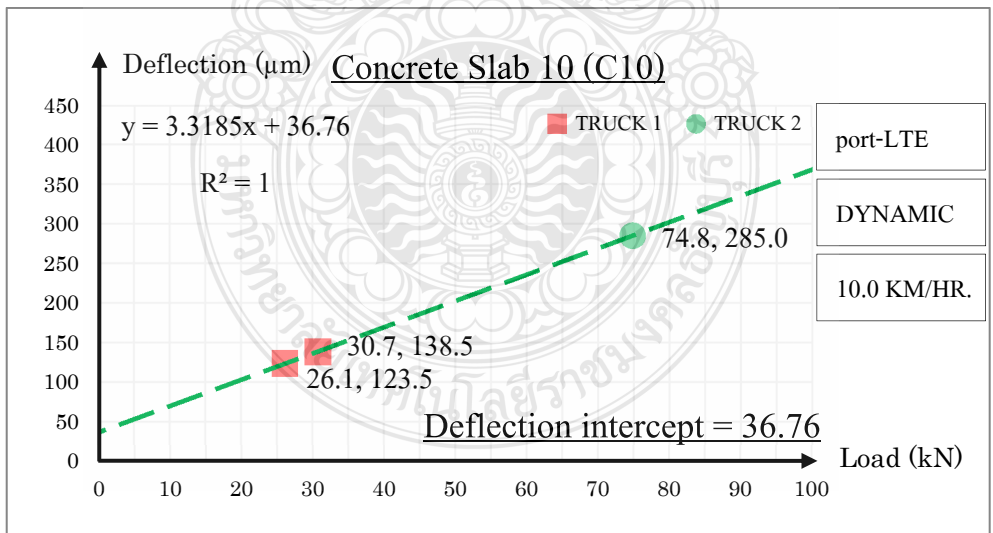
รูปที่ ค.48 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C10 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม.



รูปที่ ค.49 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C9 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



รูปที่ ค.50 ผลวิเคราะห์โพรงบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต C10 ด้วย VLCDA method

จากผลการทดสอบของเครื่อง port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กม./ชม.



ภาคผนวก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการ **21** ครั้งที่ **21** **วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ**

*The 21<sup>st</sup> National Convention on Civil Engineering*

“วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต”

“Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers”

[www.ncce21.org](http://www.ncce21.org)



28-30 มิถุนายน 2559

โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา

28 - 30 June 2016

BP Samila Beach Hotel, Songkhla

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

1.	ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2.	ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาตรี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3.	ศ.ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์มีไชย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4.	ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5.	รศ.ดร.เกษม ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6.	รศ.ดร.จรรยา รุ่งอมรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7.	รศ.ดร.จิตติชัย รุจนกนกนาฏ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8.	รศ.ดร.ฐิวัตร บุญญะฐี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9.	รศ.ดร.บรรเจิด พละการ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10.	รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11.	รศ.ดร.สรวิศ นฤปิติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12.	รศ.ดร.อัศวินธร เล่นวารี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13.	ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จันทนาภักดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14.	ผศ.ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15.	ผศ.ดร.นพดล จอกแก้ว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16.	อ.ดร.พิชชา จอองวิวัฒน์กุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17.	อ.ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18.	รศ.ดร.ก่อโชค จันทร์วางกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
19.	ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
20.	ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
21.	ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาคัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
22.	อ.ดร.สุรียน เปรมปราโมทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
23.	อ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
24.	ผศ.ดร.นันทวัฒน์ ชมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
25.	อ.ดร.ปณิตดา กลกิจวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
26.	ผศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
27.	อ.ทศพล จตุระบุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
28.	รศ.ดร.ชวเลข วัฒนเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
29.	รศ.ดร.วีชรินทร์ วิทย์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
30.	รศ.ดร.วินัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
31.	รศ.ดร.สุธาริน สอาดานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
32.	ผศ.ดร.กิงพัฒน์ ภู่วรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
33.	ผศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
34.	ผศ.ดร.อดิชัย พรพรหมินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
35.	ผศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพานิษฐ์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
36.	อ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"  
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา

37. อ.ดร.สุภาพร แก้วกอก เลี้ยวไฟโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
38. ผศ.ดร.วัจนวงศ์ กริพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สกลนคร
39. รศ.ดร.พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
40. รศ.ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
41. ผศ.ดร.กิตติเวช ชันติวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
42. ผศ.ดร.ดลฤดี หอมดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
43. ผศ.ดร.ธเนศ เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
44. ผศ.ดร.ลัดดา ตันวามณีกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
45. ผศ.ดร.วิชุดา เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
46. รศ.ดร.ธนพร สุปรีย์ศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
47. ผศ.ดร.อวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
48. อ.ดร.เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
49. อ.ดร.ปริดา พิทยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
50. อ.ดร.อรุณวิทย์ อุโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
51. ผศ.ดร.อุมา สีนุญเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
52. รศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
53. รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
54. รศ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
55. รศ.ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
56. ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
57. ผศ.ดร.ธิดารัตน์ บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
58. ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีวรรรณา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
59. ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
60. ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
61. อ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
62. อ.ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
63. อ.ดร.นงลักษณ์ บุญรัตนกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
64. ศ.ดร.ปิติ สุกนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
65. รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
66. รศ.ดร.กิตติชัย ธนทรัพย์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
67. รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
68. รศ.ดร.พานิช วุฒิปุณฺษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
69. รศ.ดร.สุพรชัย อุทัยนฤมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
70. ผศ.ดร.กวิณ ตันดีเสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
71. ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒน์สุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
72. ผศ.ดร.ชัยศาสตร์ สกุดศักดิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
73. ผศ.ดร.มาโนช สรรพกิจพิพากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
74. ผศ.ดร.ศักดิ์ดา กตเวทวารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
75. ผศ.ดร.สุชัยญา ไปยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
76. อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

77. รศ.ดร.สายสุนีย์ พุทธาคุณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
78. ผศ.ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
79. อ.ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
80. อ.ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
81. รศ.จรรณู เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.มนัส อนุศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
83. ผศ.จรรณู สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
84. ผศ.จุฑามาศ ลักษณ์ะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
85. ผศ.ดร.นันทชัย ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
86. ผศ.ดร.ภาณุ พรหมพุธางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
87. ผศ.พรนราณ์ บุญราศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
88. อ.ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
89. ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมณา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
90. อ.ดร.รัฐพล สมณา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
91. รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
92. ผศ.ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
93. ผศ.ดร.ปริยาพร โกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
94. ผศ.ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
95. ผศ.ดร.รัฐพล ภูบุผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
96. รศ.ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
97. รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
98. รศ.ดร.สาธิต ศิริมนตรี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
99. ผศ.ดร.สลิกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
100. อ.ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
101. อ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
102. อ.ดร.ศิริชัย ตันรัตนวงศ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
103. อ.กัศพงค์ ทอมเนียม	มหาวิทยาลัยนเรศวร
104. ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
105. ผศ.ดร.ธรรมบุญ รัชมีมาสเมือง	มหาวิทยาลัยบูรพา
106. ผศ.ดร.สมบูรณ์ เชียงฉิน	มหาวิทยาลัยพะเยา
107. ผศ.ดร.สยาม ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
108. อ.ดร.ฐิติมา วงศ์อินตา	มหาวิทยาลัยบูรพา
109. อ.ดร.ปิติ โรจน์วรรณสินธุ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
110. อ.ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
111. อ.ดร.เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีyaratน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
112. อ.ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม	มหาวิทยาลัยบูรพา
113. ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
114. อ.ดร.ชลลดา เลาะฟอ	มหาวิทยาลัยมหิดล
115. อ.ดร.วศพร เดชะพิรพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
116. ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวีระวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์





การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21  
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21<sup>st</sup> National Convention on Civil Engineering  
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

117. อ.ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
118. ผศ.ดร.รัฐภูมิ รุ้แทนคุณ	มหาวิทยาลัยสยาม
119. อ.ดร.ธุกกพัศ เจนจิวัฒน์กุล	มหาวิทยาลัยสยาม
120. รศ.ดร. สถาพร โภคา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
121. ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
122. ผศ.ดร.สิทธา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
123. ผศ.ดร.วรางคณา แสงสร้อย	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
124. รศ.ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
125. รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
126. ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
127. รศ.ดร.โชติชัย เจริญงาม	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

หมายเหตุ รายชื่อเรียงตามสถาบันการศึกษา (ก-ข)



วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"  
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา

-X-

กำหนดการนำเสนอผลงานวิจัย  
การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21  
ระหว่างวันที่ 28 – 30 มิถุนายน 2559  
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา

วัน	เวลา	ห้องสงขลา 1	ห้องสงขลา 2	ห้องราชดำเนิน	ห้องเทพา	ห้องเพชรมงคล	ห้องชัยมงคล	ห้องไทรบุรี
วันที่ 29 มิ.ย. 59	08.30-10.00 น.	(STR3) ID12, ID127, ID164, ID220, ID421, ID489, ID425, ID501	(MAT3) ID25, ID75, ID358, ID432, ID435, ID441, ID451, ID522	(CEM3) ID119, ID162, ID194, ID201, ID231, ID236, ID240, ID243	(GTE3) ID46, ID66, ID98, ID141, ID202, ID256, ID355, ID399	(TRL2) ID71, ID72, ID279, ID351, ID378, ID411, ID437, ID520	(WRE1) ID24, ID56, ID76, ID95, ID99, ID131, ID153	(SGI1) ID381, ID84, ID86 ID397, ID333
	10.15-12.00 น.	(STR4) ID50, ID142, ID143, ID147, ID165, ID227, ID282, ID503	(MAT4) ID118, ID204, ID326, ID391, ID393, ID401, ID474, ID499	(CEM4) ID249, ID307, ID314, ID317, ID320, ID321, ID322, ID327	(GTE4) ID156, ID173, ID174, ID387, ID396, ID424, ID426, ID427, ID430, ID431	(TRL3) ID57, ID126, ID209, ID375, ID420, ID450, ID504	(WRE2) ID167, ID177, ID190, ID196, ID207, ID245, ID148	(SGI2) ID7, ID42, ID113, ID221, ID480, ID496, ID481
พักรับประทานอาหารว่าง								
พักรับประทานอาหารกลางวัน								
วันที่ 29 มิ.ย. 59	13.00-15.00 น.	(STR5) ID13, ID27, ID40, ID41, ID47, ID83, ID111, ID116, ID123, ID502	(MAT5) ID122, ID124, ID129, ID151, ID168, ID172, ID208, ID259	(CEM5) ID331, ID350, ID369, ID394, ID416, ID433, ID469, ID491, ID494, ID526, ID527	(GTE5) ID16, ID36, ID38, ID52, ID53, ID54, ID58, ID101, ID130, ID171	(TRL4) ID45, ID49, ID88, ID229, ID278, ID287, ID392	(WRE3) ID250, ID260, ID294, ID303, ID304, ID305, ID315, ID339	(TRL6) ID89, ID145, ID158, ID180, ID192, ID262, ID288, ID341, ID353, ID408
	15.15-17.15 น.	(STR6) ID55, ID61, ID78, ID232, ID286, ID342, ID382, ID383, ID402, ID485, ID487, ID508	(MAT6) ID273, ID275, ID365, ID440, ID446, ID506, ID514, ID516	(INF/CEE1) ID9, ID8, ID17, ID107, ID336, ID442, ID512, ID519, ID484, ID64, ID511	(GTE6) ID203, ID212, ID242, ID251, ID263, ID293, ID335, ID363, ID403, ID409, ID449, ID478	(TRL5) ID34, ID191, ID223, ID225, ID325, ID328, ID372, ID373, ID413, ID415	(WRE4) ID356, ID361, ID367, ID404, ID407, ID436, ID464, ID517	(TRL7) ID412, ID423, ID434 ID443, ID471, ID472, ID498, ID505, ID521



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21  
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21<sup>st</sup> National Convention on Civil Engineering  
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

ห้องประชุมมงคล		วันพุธที่ 29 มิถุนายน 2559	
ประธานการนำเสนอบทความ			
เวลา 13.00 – 15.00 น.			
รหัสบทความ	บทความ		
45	การหาค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถบรรทุกประเภทต่างๆ สำหรับเข้าช่องทางวงเวียน : กรณีศึกษาวงเวียนดอนหอยหลอด วริช แสนสุขเจริญผล, วศิน เกียรติโกมล		
49	การศึกษาและการปรับปรุงสภาพจราจรที่ไม่สมดุลบริเวณทางแยกที่มีสัญญาณไฟ กรณีศึกษา ทางแยกที่มีการจัดจราจรเลนรับน้อยกว่าเลนส่ง (แยกสุขสวัสดิ์-ประชาอุทิศ) พิชญา พันวัน, วศิน เกียรติโกมล		
88	การศึกษาค่าเทียบเท่ารถยนต์ส่วนบุคคลสำหรับพาหนะประเภทต่างๆบนทางหลวง หลายช่องจราจร: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 2 ศิวพร เหมือนสีเลา, สุพรชัย อุทัยนฤมล		
229	การวิเคราะห์มาตรการที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหารถจากร โดยการประยุกต์ใช้มาตรวัดประสิทธิภาพและประสิทธิผล ปฏิพัทธ์ กัณหา, อนิรุช ศรีบุรี, อรรถวิทย์ อุบโยคิน, นกมล กรประเสริฐ		
278	การปรับเทียบตัวแปรในแบบจำลองการขับขี่ตามกันของโปรแกรม VISSIM กรณีศึกษา ทางพิเศษกาญจนาภิเษก นิพัทธ์ อินทะมาระ, เทอดศักดิ์ รุ่งวิริยะพานิช		
287	การศึกษาแผนจัดการจราจรในการก่อสร้างรถไฟฟ้า โดยแบบจำลองระดับจุลภาค บริเวณแยกรัชโยธิน บุตรลักษ์ ปลื้มจิตต์, สายพิน ปลื้มจิตต์		
392	การจัดการจราจรบริเวณทางแยกในเขตเมืองด้วยวงเวียน กรณีศึกษาทางแยกสวนหย่อมธรรมบุญวิถียี่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา จตุวิทย์ สุวรรณรงค์, สราวุธ ขวัญจันทร์, ธนโชติ รอดแสวก, ปรมเมศวร์ เหลือเทพ พักรับประทานอาหารว่าง		
ห้องประชุมมงคล		วันพุธที่ 29 มิถุนายน 2559	
ประธานการนำเสนอบทความ			
เวลา 15.15 – 17.15 น.			
รหัสบทความ	บทความ		
34	การประเมินคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแบบใช้ความร้อนต่ำ โดยใช้วัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมในมวลรวม คมสัน พร้อมสกุล, วชิรินทร์ วิทย์กุล, วีระเกษตร สวนผกา		
191	การวิเคราะห์ผลกระทบของการซ่อมแซมทางวิ่งต่อความสามารถในการรองรับอากาศยานบนทางวิ่ง ธนาวัฒน์ ลิขิตสินติกุล, บวรวิทย์ รัตนบรมย์, มาโนช โลหเตปานนท์		
223	การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง พรชัย จิตตะสุชีกุล, พุทธิพล ทองอินทร์ดำ		

สาขาวิศวกรรมขนส่ง จราจร และโลจิสติกส์ (TRL)		หน้า
TRL 209	การออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดการปฏิบัติการ บนทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 7 และ หมายเลข 9 สโรพ บุญศิริพันธ์, สิวาณ สุระนวล, จิราลักษณ์ สหสิทธิ์ธรรม	1733
TRL 223	การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง พรชัย จิตตะสุขกุล, ทูรพล ทองอินทร์คำ	1743
TRL 225	แนวทางการพัฒนาคุณภาพงานติดตั้งจราจรของกรมทางหลวง สิทธิโชค สุนทรโสภาส, นัชชา อภัยพงศ์	1751
TRL 229	การวิเคราะห์มาตรการที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาจราจร โดยการประยุกต์ใช้มาตรวัดประสิทธิภาพและประสิทธิผล ปฏิพัทธ์ กันทา, อนันุรุ ศรีบุรี, อรรถวิทย์ อุบโยคิน, นพดล กรประเสริฐ	1756
TRL 262	การศึกษาพฤติกรรมของผู้ขับขี่ก่อนและหลังใช้งานอุโมงค์ข้ามแยกหน้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นิภาวรรณ กุลสุวรรณ, ณัฐกร อัมยงค์, ทวีศักดิ์ สาดชื่น	1763
TRL 266	การประยุกต์ใช้วิธีการเลือกระยะเพื่อคัดเลือกจุดอันตรายบนทางหลวง พินทีย์ ศิริอำพร, เกษม ชูจารุกุล	1773
TRL 278	การเปรียบเทียบตัวแปรในแบบจำลองการขับขี่ตามกันของโปรแกรม VISSIM กรณีศึกษา ทางพิเศษกาญจนาภิเษก นิพัทธ์ อินทะมาระ, เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	1780
TRL 279	การวางแผนการจัดส่งสินค้าถึงบ้านโดยใช้โปรแกรม: กรณีศึกษา การขนส่งกระบือและวัสดุตกแต่งทัศนียา คงสุคนธ์, เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	1786
TRL 285	การศึกษาอุบัติเหตุที่เกี่ยวข้องกับความเร็ว บนทางพิเศษในประเทศไทย วรากร สหพันธ์, ลัดดา ดันวานิชกุล	1793
TRL 287	การศึกษาแผนจัดการจราจรในการก่อสร้างรถไฟฟ้า โดยแบบจำลองระดับจุลภาค บริเวณแยกรัชโยธิน บุตธรักษ์ ปลั่งจิตต์, สายพิน ปลั่งจิตต์	1800
TRL 288	Travel Behavior of Paratransit and City Bus Passengers in Phnom Penh Nguonsong Eung, Kasem Choocharukul	1805
TRL 295	การวิเคราะห์เปรียบเทียบเทคนิคการเก็บข้อมูลจราจรคนเดินบนถนนคนเดินในเขตชุมชน ชมพูนุท สุธีรากุล, นพดล กรประเสริฐ, ปรีดา พิษยาพันธ์	1812
TRL 310	การวัดประสิทธิภาพการจัดการจราจรในช่วงเหตุการณ์พิเศษด้วย ทางแบบจำลองทางข้ามและกัลบรด ณฤตล ศรีตระกูล, นพดล กรประเสริฐ, ปวีร์ คูวิบูลย์	1818
TRL 311	การพัฒนาแผนที่ความปลอดภัยบนท้องถนนจากฐานข้อมูลโรงพยาบาล สโรช บุญศิริพันธ์, สุชาวรรณ ชูณรงค์, วิทยา ขาดิบุญชาชัย, เตือนใจ ฟูฤตะ	1824
TRL 316	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับการออกแบบทางแยกขนาดใหญ่ในเขตชุมชน กรณีศึกษาวงเวียนหอ นามีกาจังหวัดลำปาง อัครพงษ์ เทพแก้ว, ทศพล ทรราชานนท์, นพดล กรประเสริฐ	1835
TRL 325	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมด้วยยางแผ่นรมควัน สุทธิชัย เจริญกิจ, สราวุธ จิตรงาม, โอภาส สมใจนึก	1843
TRL 328	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมด้วยน้ำมันยางพาราธรรมชาติ ปรเมษฐ์ หอมทวล, สราวุธ จิตรงาม, โอภาส สมใจนึก	1849
TRL 341	การวิเคราะห์สัดส่วนผู้ขี่ช่องเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติที่เหมาะสม สโรช บุญศิริพันธ์, นพคุณ บุญกระพือ, สราวุธ จันทร์สุวรรณ, ศักดิ์ดา พรรณไวย, เจริญวิไลษฐ์ สารสัสดีกุล, สุพัตรา อินทสงค์	1854
TRL 351	ดัชนีความเชื่อมโยงโครงข่ายด้านการขนส่งทางรางของเมืองหลักในประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน เอกชัย ศิริกิจพานิชย์กุล, ธราฤทธิ์ สังแสง	1862



การพัฒนาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต  
ด้วยน้ำหนักบรรทุกจราจรจริง  
DEVELOPMENT OF MEASUREMENT OF VOID DEPTH UNDER  
CONCRETE PAVEMENT USING REAL TRAFFIC LOAD

พรชัย จิตตะสุชีกุล\* และ พุทธพล ทองอินทร์คำ\*

\*นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี  
\*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

### บทคัดย่อ

โพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายและส่งผลต่ออายุการใช้งาน การประเมินหาโพรงสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการยุบตัวของผิวทาง แต่เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวมีราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบความลึกของโพรงโดยประยุกต์ใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพาที่พัฒนาขึ้นโดยที่นักวิจัยเองกับการใช้รถบรรทุกด้วยรูปแบบสถิตและแบบเคลื่อนที่ วัดค่าการยุบตัวและตรวจสอบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต เปรียบเทียบกับผลทดสอบจากเครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเบา ผลทดสอบพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องมือดังกล่าวเพื่อประเมินหาโพรง โดยกรณีน้ำหนักแบบสถิตพบว่าผลสอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวบริเวณมุมแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน ส่วนกรณีน้ำหนักแบบเคลื่อนที่พบว่าความเร็วของการเคลื่อนที่มีผลต่อการตอบสนองของแผ่นพื้น โดยที่ความเร็วที่มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินหาโพรงคือประมาณ 2.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**คำสำคัญ:** ผิวทางคอนกรีต, โพรง, เครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพา

### Abstract

Void under concrete pavement is a major cause of pavement distress and consequently affects its lifetime. The evaluation of void depth can be obtained from surface deflections of concrete slabs. However, the deflection measurement equipment are quite expensive. Therefore, this research aims to develop a method for evaluation of void depth using real traffic load. Truck loadings in static and dynamic mode are imparted to surface of concrete slab. The surface deflections and their behavior are measured by Portable Load Transfer Efficiency Detector (Port-LTE) which is invented by the researcher. Relations between void depth and truck movement are introduced and discussed

\* พรชัย จิตตะสุชีกุล (Pomchai Jittasukhegul)

E-mail address: pomchai\_j@mail.mmut.ac.th

comparing to the results obtained from Lightweight Deflectometer (LWD). The results show that Port-LTE has capability of measuring void depth under concrete slab. The void depth results from static case are in agreement with Variable Load Corner Deflection Analysis (VLCD) method. For dynamic case, it has been found that the most appropriate truck speed for void depth detection is about 2.5 kilometer per hour.

**Keywords:** Concrete pavement, Void, Portable Load Transfer Efficiency Detector (port-LTE)

### 1. บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันใช้การสัญจรทางบกมากกว่าร้อยละ 80 และยังคงมีอัตราการใช้งานเพิ่มมากขึ้นทุกปี [1] ทำให้ผิวทางเกิดการเสื่อมสภาพได้รวดเร็วขึ้น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องเข้ามาทำการบำรุงซ่อมแซม ในส่วนของผิวทางคอนกรีตนั้นภาครัฐต้องสูญเสียงบประมาณในแต่ละปีไม่ต่ำกว่า 20,000 ล้านบาท [2] เพื่อใช้ในการบำรุงซ่อมแซม หนึ่งในปัญหาสำคัญที่ทำให้ผิวทางคอนกรีตเสื่อมสภาพคือการเกิดโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต ในปัจจุบันจึงได้มีการนำเครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เครื่องเรดาร์ (Ground Penetrating Radar, GPR) และเครื่องวัดค่าการยุบตัวขนาดเบา (Lightweight Deflectometer, LWD) มาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจหาโพรง แต่เครื่องมือดังกล่าวมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เครื่องมือมีจำนวนไม่เพียงพอกับจำนวนหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านงานทางในประเทศไทย

ในปี ค.ศ. 2014 พุทธพล [3] จากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางและท่าอากาศยาน (RAPTR) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ทำการพัฒนาเครื่องวัดประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตแบบพกพาขึ้น (Portable Load Transfer Efficiency Detector, Port-LTE) เพื่อวัดค่าการทรุดตัวแบบทันทีของแผ่นคอนกรีต (real-time displacement) ขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อของแผ่นพื้นคอนกรีต ค่าที่วัดได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Raptr Vibration Analysis เพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักและแสดงผลทันทีในสนามทั้งด้านแผ่นเข้า (approach slab) และขาออก (leave slab)

งานวิจัยนี้มุ่งขยายขีดความสามารถของเครื่องมือดังกล่าว โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่อง Port-LTE มาทดสอบเพื่อประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตโดยใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกจริง

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

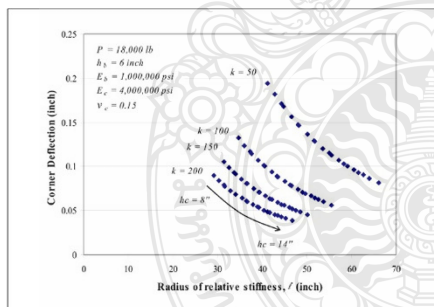
### 2.1 โพรงกับการแอ่นตัว

แผ่นพื้นคอนกรีตจะตอบสนองต่อแรงที่มากระทำด้วยการแอ่นตัวและถ่ายน้ำหนักลงไปสู่ชั้นทางด้านล่างจนถึงชั้นดินเดิม หากชั้นทางด้านล่างมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักจะทำให้เกิดการทรุดตัวหรือวัสดุชั้นทางเคลื่อนตัวออกไปซึ่งอาจส่งผลให้เกิดโพรงขึ้นโดยเฉพาะที่บริเวณมุมของแผ่นคอนกรีต โดยค่าการแอ่นตัวที่มุมสามารถคำนวณได้จากสมการของ Westergaard ดังสมการที่ 1 [4]

$$\delta = \frac{P}{kI^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{\alpha\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (1)$$

- $\delta$  คือ ค่าการแอ่นตัวที่มุมของแผ่นพื้นคอนกรีต, นิ้ว
- $P$  คือ น้ำหนักล้อ, ปอนด์
- $k$  คือ โมดูลัสปฏิกิริยาของฐานรองรับ, ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว
- $l$  คือ รัศมีความแกร่งสัมพัทธ์, นิ้ว
- $\alpha$  คือ รัศมีของพื้นที่วงกลมสัมผัสระหว่างล้อและผิวทาง, นิ้ว

Youn su Jung and Dan G. Zollinger [4] ได้ใช้สมการที่ 1 วิเคราะห์ผิวทางคอนกรีตภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และได้ผลลัพธ์ว่าความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต ( $h_c$ ) และค่าโมดูลัสปฏิกิริยาของฐานรองรับ ( $k$ ) มีผลต่อค่าการแอ่นตัวที่มุม โดยเมื่อค่า ( $h_c$ ) และ ( $k$ ) เพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวที่มุมก็จะลดลง ดังผลในรูปที่ 1 ทั้งนี้การใช้สมการที่ 1 มีสมมติฐานว่าแผ่นพื้นคอนกรีตจะต้องอยู่ในสภาวะที่มีชั้นรองรับอย่างสมบูรณ์ (full of support) หรือกล่าวอีกอย่างว่าไม่มีโพรงเกิดขึ้น ดังนั้นการตรวจสอบความลึกโพรงจึงเป็นประเด็นสำคัญเกี่ยวกับความถูกต้องของผลการคำนวณวิเคราะห์ตามทฤษฎี

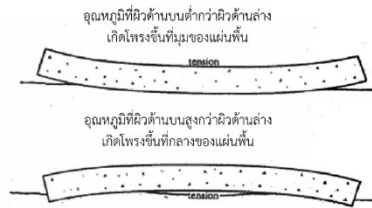


รูปที่ 1 ค่าการแอ่นตัวที่มุมแผ่นคอนกรีต ตามสมการของ Westergaard [4]

### 2.2 โพรงกับอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวด้านบนแผ่นพื้นคอนกรีตสูงกว่าผิวด้านล่าง ผิวด้านบนเกิดการขยายตัวในขณะที่ด้านล่างเกิดการหดตัว หากค่าความลาดชันอุณหภูมิมีมากพอที่จะส่งผลให้เกิดการโก่งตัวและเกิดโพรงขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่น ส่วนในสภาวะที่ผิวด้านบนมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวด้านล่าง จะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตโก่งตัวขึ้นและเกิดโพรงขึ้นที่ตำแหน่งมุมแผ่น ดังรูปที่ 2 จากความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาทำให้ผิวทางคอนกรีตเกิด

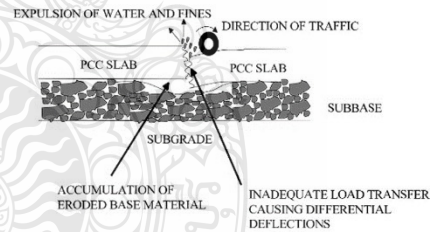
การแอ่นตัวที่แตกต่างกัน [5] ซึ่งอาจส่งผลให้ผลทดสอบโพรงใต้แผ่นคอนกรีตเดียวกันในช่วงเวลาต่างกันมีความแตกต่างกันได้ ทั้งนี้ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการวิเคราะห์โพรงไม่อยู่ในขอบเขตของการศึกษาคั้งนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบโพรงในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว



รูปที่ 2 ผลกระทบจากอุณหภูมิกับการเกิดโพรง [6]

### 2.3 โพรงกับความเสียหายของผิวทางคอนกรีต

การเกิดโพรงจะทำให้ผิวทางคอนกรีตอยู่ในสภาวะสูญเสียฐานรองรับ (loss of support) และนำไปสู่ความเสียหายของผิวทางคอนกรีต โดยพฤติกรรมสำคัญที่ทำให้เกิดโพรงมาจากการทรุดตัวและการสูญเสียมวลรวมละเอียดจากการอัดทะลักของชั้นทางด้านล่าง (pumping) ซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำที่ไหลซึมเข้าสู่โครงสร้างผ่านรอยแยกหรือรอยแตกเข้าไปทำปฏิกิริยากับวัสดุของโครงสร้างชั้นทางทำให้วัสดุบางส่วนถูกกัดกร่อน เมื่อมีน้ำหนักมากระทำจะทำให้วัสดุเหล่านี้ถูกบีบอัดออกมาตามรอยต่อ (joints) หรือรอยแตก (cracks) ของผิวทาง จนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นโพรงขึ้นในที่สุดดังรูปที่ 3 ซึ่งวัสดุที่ถูกกัดกร่อนจะมีความแข็งแรงลดลงหรือค่าโมดูลัสปฏิกิริยาของฐานรองรับน้อยลงด้วย [7]

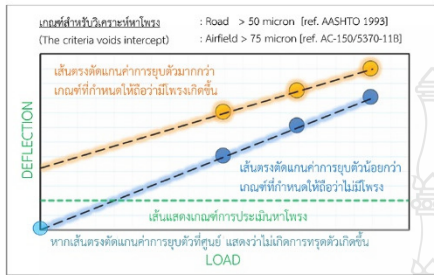


รูปที่ 3 การเกิดโพรงของผิวทางคอนกรีตจากการอัดทะลัก [8]

### 2.4 การประเมินหาโพรงจากการแอ่นตัว

โพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตสามารถประเมินได้จากการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวที่มุมของแผ่นพื้นคอนกรีตด้วยน้ำหนักกระทำที่แตกต่างกัน (Variable Load Corner Deflection Analysis, VLCD method) วิธีการนี้จะใช้น้ำหนักที่แตกต่างกันกระทำต่อผิวทางคอนกรีต แล้วจึงวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่กระทำกับค่าการแอ่นตัวสูงสุดด้วยวิธีถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression analysis) ดังรูปที่ 4 โดยหากเส้นตรงตัดแกนค่าการแอ่นตัวเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แสดงว่าที่มุมของแผ่นพื้นคอนกรีตนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีโพรงเกิดขึ้น โดยหน่วยงานหลักด้านงานทางของประเทศสหรัฐอเมริกา คือ American Association of State Highway

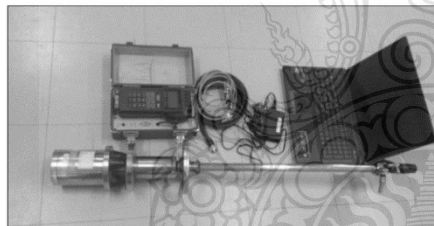
and Transportation Officials (AASHTO) ได้นำมาใช้เกณฑ์สำหรับการประเมินโพรงใต้ถนนคอนกรีต เท่ากับ 50 ไมโครเมตร [9] ในขณะที่หน่วยงาน Federal Aviation Administration (FAA) แนะนำให้ใช้ค่า 75 ไมโครเมตร [10] เป็นเกณฑ์สำหรับประเมินโพรงใต้ทางสนามบินคอนกรีต เป็นต้น



รูปที่ 4 การวิเคราะห์หาโพรงจาก VLCA method

2.5 เครื่อง LWD

เครื่อง LWD ใช้สำหรับวัดค่าการยุบตัวของผิวทาง มีขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย สำหรับการทำงานจะอาศัยลูกตุ้มน้ำหนักกระแทกไปที่แผ่นเหล็กเพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อผิวทาง เซ็นเซอร์จะทำการวัดขนาดของแรงและการยุบตัวที่เกิดขึ้น แล้วส่งกลับไปยังอุปกรณ์ TC-351F เพื่อทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นการยุบตัวในหน่วยไมโครเมตรและบันทึกค่าโดยอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์ของเครื่อง LWD แสดงดังรูปที่ 5



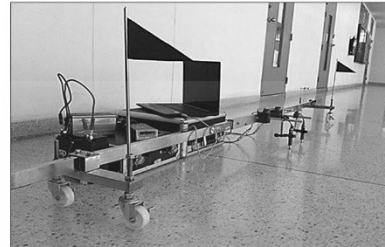
รูปที่ 5 อุปกรณ์ของเครื่อง LWD

2.6 เครื่อง Port-LTE

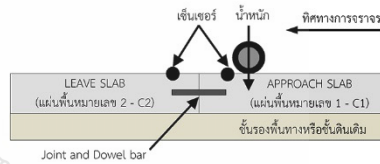
ปี ค.ศ. 2015 พุทธพลและทีมวิจัยได้คิดค้นและพัฒนาเครื่อง Port-LTE ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อใช้สำหรับวัดค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Efficiency, LTE) ของแผ่นพื้นคอนกรีต เครื่องมือดังกล่าวมีเซ็นเซอร์วัดค่าการยุบตัวแบบทันที เมื่อมียานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ติดตั้งเครื่อง เซ็นเซอร์จะทำการวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของยานพาหนะนั้นในรูปของแรงดันไฟฟ้า แล้วส่งกลับไปยังอุปกรณ์ DC-204R สุดท้ายอุปกรณ์จะแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นการยุบตัวในหน่วยไมโครเมตร โดยค่าการทรุดตัวสูงสุดของทั้ง 2 แผ่นจะถูกตรวจจับบันทึกด้วยโปรแกรม Raptre Vibration Analysis ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับเครื่อง Port-LTE โดยเฉพาะและค่า LTE สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการที่ 2 [11]

$$LTE = \left( \frac{\Delta_{unload}}{\Delta_{load}} \right) \times 100 \quad (2)$$

LTE คือ ค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก, เปอร์เซนต์  
 $\Delta_{unload}$  คือ ค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นที่ไม่บรรทุกกระทำ, ไมโครเมตร  
 $\Delta_{load}$  คือ ค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นที่มีน้ำหนักกระทำ, ไมโครเมตร



(A) อุปกรณ์และรูปร่างของเครื่อง Port-LTE



(B) การวัดค่าการยุบตัวของเครื่อง Port-LTE



(C) การแสดงผลการทำงานของเครื่อง Port-LTE  
 รูปที่ 6 การทำงานและอุปกรณ์ของเครื่อง Port-LTE

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1985 Croveti J.A. and Darter [12] ได้ศึกษาวิธีการประเมินหาโพรงบริเวณมุมของผิวทางคอนกรีตด้วย FWD รุ่น 8000 โดยทดสอบด้วยน้ำหนักกระทำขนาด 22, 40 และ 67 กิโลนิวตัน จากนั้นจึงวัดค่าแอนตัวที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักแต่ละขนาด จากการศึกษาได้ทำการเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับค่าการแอนตัวและวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ทำให้ทราบว่าหากกราฟตัดแกนการแอนตัวที่ไม่ใช่จุดศูนย์ศูนย์ แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะมีโพรงเกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีตต่อมาวิธีนี้ถูกเรียกว่า VLCA method

Julie Marie Vandenbosscche [13] ทำการประเมินหาโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตหนา 25 ซม. ด้วยเครื่องมือ FWD ในปี ค.ศ. 2003 โดยได้ทำการเปรียบเทียบโพรงที่ตรวจจากเครื่อง FWD กับโพรงที่เกิดจากอุณหภูมิตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันด้วยวิธีโพในดือเลนเมนต์ พบว่าโพรงที่วัดจากเครื่องมือ FWD มีค่ามากกว่าโพรงที่เกิดเนื่องจากอุณหภูมิต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่เกิดจากน้ำหนักกระทำส่งผลต่อผิวทางคอนกรีตมากกว่าเมื่อมีโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Stuart John Arnold [14] ได้นำวิธีการหาโพรงที่เสนอโดย Crovetti and Darter (1985), Wade et al. (1997) และ White Young Green (2002) คือ เกณฑ์พิจารณาว่ามีโพรงเมื่อเส้นตรงตัดแกนค่าแอนต์ตัวที่ 50, 75 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่าสามารถตรวจพบโพรงเกิดขึ้น 50, 60.5 และ 88 เปอร์เซ็นต์ จากผิวทางคอนกรีตที่ทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกเกณฑ์การประเมินโพรงมีความสำคัญอย่างมากต่อการประเมิน

สำหรับในประเทศไทย ชันวิน สวัสดิศานต์ และ เอกชัย อนุเวชศิริ เกียรติ [15] ได้ศึกษาการประเมินหาโพรงจากเครื่อง FWD ในปี ค.ศ. 2005 ซึ่งใช้วิธี VLCD method ในการวิเคราะห์ โดยได้ทำการทดสอบสองจุดคือ ที่มุมแผ่นด้านซ้ายและที่กึ่งกลางแผ่นพื้นคอนกรีต และแสดงให้เห็นว่าวิธี VLCD method ใช้ตรวจหาโพรงของโครงสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทยได้ และยังพบว่าโพรงที่เกิดได้มุมจะอยู่ใต้แผ่นขาออก (leave slab) มากกว่าด้านขาเข้า (approach slab)

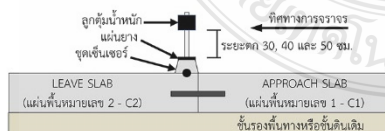
ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Zhong Yan-hua และคณะ [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของน้ำหนักขนาด 40, 60 และ 80 กิโลนิวตันกับการประเมินหาขนาดของโพรง โดยได้เปรียบเทียบกับผลของไพนดอลิเมนต์ พบว่าเมื่อขนาดของโพรงเปลี่ยนไปความสัมพันธ์เชิงเส้นก็จะเปลี่ยนไป สำหรับการวิเคราะห์โพรงด้วยวิธีไพนดอลิเมนต์จะมีการยึดติดกันของชั้นทางมากกว่า พฤติกรรมจริง และการยึดติดกันของชั้นทางมีผลต่อการตัดแกนค่าการแอนต์ตัวที่ใช้สำหรับการประเมินหาโพรงและขนาดของโพรง

และในปี ค.ศ. 2012 พุทธพล ทองอินทร์คำ และจตุพล สายอินทร์วัฒน์ [17] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ LTE กับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบโพรงที่สนามบินขนาดใหญ่และสนามบินภูเก็ด้วยเครื่องทดสอบการแอนต์ตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบหนัก (HWD) ที่กึ่งกลางแผ่นด้วยน้ำหนัก 220 กิโลนิวตัน และทดสอบที่มุมด้วยน้ำหนัก 3 ระดับคือ 160, 190 และ 220 กิโลนิวตัน จากผลการศึกษาพบว่า ในกรณีวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ LTE กับโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตนั้น ยังไม่พบความสัมพันธ์ของ LTE กับโพรงที่มีสำคัญต่อกันหากได้แผ่นพื้นคอนกรีตไม่มีโพรงเกิดขึ้น แต่หากได้แผ่นพื้นที่มีโพรงเกิดขึ้นความสัมพันธ์จึงเริ่มมีนัยสำคัญต่อกันมากขึ้น

### 3. การทดสอบหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต

#### 3.1 ทดสอบด้วยเครื่อง LWD

ทำการติดตั้งเครื่อง LWD ที่มีของแผ่นพื้นคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 7 จากนั้นยกลูกตุ้มน้ำหนักขึ้นที่ความสูง 30, 40 และ 50 ซม. และปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักลงมา โดยเครื่อง LWD จะทำการบันทึกขนาดของแรงและค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาโพรงด้วยวิธี VLCD method ต่อไป เนื่องจากเครื่อง LWD เป็นเครื่องมือทดสอบมาตรฐานที่มีใช้อยู่ในหลายประเทศ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ผลทดสอบโพรงที่ได้จากเครื่อง LWD เป็นอ้างอิงความถูกต้องของผลการทดสอบโพรงที่ได้จากวิธีการวัดที่พัฒนาขึ้นสำหรับเครื่อง Port-LTE



รูปที่ 7 การทดสอบด้วยเครื่อง LWD

#### 3.2 ทดสอบด้วยเครื่อง Port-LTE

ทำการติดตั้งเครื่อง Port-LTE ที่มีของแผ่นพื้นคอนกรีตที่กำหนดเป็นจุดทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ใช้รถบรรทุกทุกทกซ์จำนวน 2 คัน คันที่ 1 มีน้ำหนักเพลาหน้าและหลัง 26.1 กิโลนิวตัน (2665 กก.) และ 30.7 กิโลนิวตัน (3135 กก.) ส่วนคันที่ 2 มีน้ำหนักเพลาหน้าและหลัง 22.0 กิโลนิวตัน (2245 กก.) และ 74.8 กิโลนิวตัน (7625 กก.) ดังรูปที่ 8(A) สำหรับการทดสอบแบบสถิต (static) จะเคลื่อนที่รถบรรทุกให้ล้ออยู่บนตำแหน่งทดสอบที่ได้กำหนดไว้แล้วจึงหยุดรถเพื่อวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักเพลาของรถบรรทุก เมื่อวัดค่าเสร็จให้เคลื่อนที่ตามขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 8(B) และกรณีการทดสอบแบบเคลื่อนที่ (dynamic) จะใช้รถบรรทุกชุดเดิมเคลื่อนที่ผ่านจุดทดสอบด้วยความเร็ว 2.5, 5 และ 10 กม./ชม. ดังรูปที่ 8(C) และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาโพรงด้วยวิธี VLCD method ต่อไป



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกแบบน้ำหนักสถิตและแบบเคลื่อนที่

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับลานจอดรถยนต์คอนกรีตชนิดที่มีรอยต่อตามขวาง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำการทดสอบกับแผ่นพื้นคอนกรีตสองแผ่นที่อยู่ติดกัน โดยให้แผ่นขาเข้า



(approach) คือแผ่นพื้น C1 และแผ่นขาออก (leave) คือแผ่นพื้น C2 ตามทิศทางของการจราจรดังรูปที่ 9 โดยเลือกใช้จุดตัดค่าการยุบตัวที่ 50 ไมโครเมตร ตามข้อเสนอแนะของ AASHTO เป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินหาโพรง



รูปที่ 9 การทดสอบด้วยเครื่อง LWD และ Port-LTE

#### 4. ผลการทดสอบ

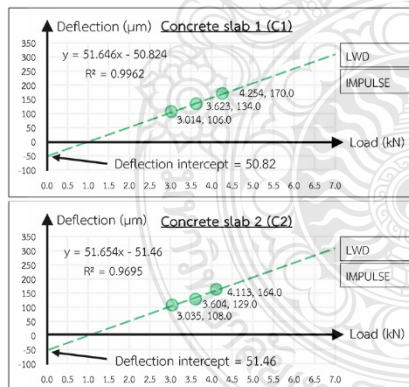
##### 4.1 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

ผลการตรวจวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD

แผ่น	ระยะตก (ซม.)	แรง (kN)	ค่าการยุบตัว (μm)
C1	30	3.014	106.0
	40	3.623	134.0
	50	4.254	170.0
C2	30	3.035	108.0
	40	3.604	129.0
	50	4.113	164.0

ประเมินหาโพรงจากการยุบตัวด้วย VLCD method เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกับการยุบตัวแสดงดังรูปที่ 10 และผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 10 กราฟวิเคราะห์ VLCD method ของเครื่อง LWD

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์โพรงจากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

แผ่น	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว (μm)	R <sup>2</sup>	โพรง
C1	50.82	0.996	มี
C2	51.46	0.970	มี

ผลการวิเคราะห์ด้วย VLCD method จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD แสดงให้เห็นว่ามีโพรงเกิดขึ้นใต้แผ่นพื้น C1 และแผ่นพื้น C2 ซึ่งค่าความลึกโพรงที่ได้ผ่านเกณฑ์มาเล็กน้อย และจากจุดตัดแกนค่าการยุบตัวยังแสดงให้เห็นว่าความลึกของโพรงใต้แผ่นพื้น C2 (แผ่น Leave) มีค่ามากกว่า C1 (แผ่น Approach) เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน

##### 4.2 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง Port-LTE

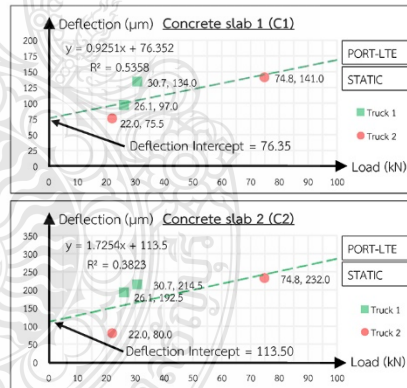
###### 4.2.1 แบบน้ำหนักสถิต

ค่าการยุบตัวที่ถูกรวัดด้วยเครื่อง Port-LTE ถูกเขียนเป็นกราฟโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Raptre Vibration Analysis เพื่อแสดงค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักเพลาน้ำหนักและเพลาลังของรถบรรทุก และผลการตรวจวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง Port-LTE กรณีทดสอบแบบน้ำหนักสถิตแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง Port-LTE แบบสถิต

รถบรรทุก	แผ่น	น้ำหนัก (kN)	ค่าการยุบตัว (μm)
คันที่ 1	C1	26.1	97.0
		30.7	134.0
	C2	26.1	192.5
		30.7	214.5
คันที่ 2	C1	22.0	75.5
		74.8	141.0
	C2	22.0	80.0
		74.8	232.0

การประเมินหาโพรงจากการยุบตัวด้วย VLCD method เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับการยุบตัวแสดงดังรูปที่ 11 และผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 11 กราฟวิเคราะห์ VLCD method ของเครื่อง Port-LTE แบบสถิต

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์โพรงจากการทดสอบด้วยเครื่อง Port-LTE แบบสถิต

แผ่น	จุดตัดแกนค่าการยุบตัว (μm)	R <sup>2</sup>	โพรง
C1	76.35	0.536	มี
C2	113.50	0.382	มี

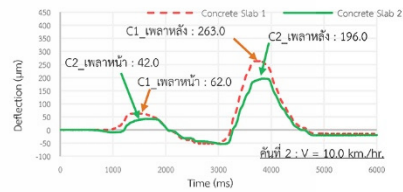
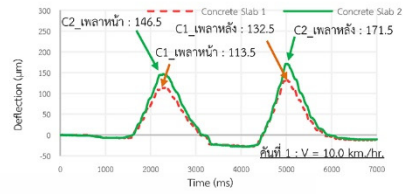
เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากเครื่อง LWD กับเครื่อง Port-LTE แบบน้ำหนักสถิต มีประเด็นสำคัญดังนี้

1) ทั้งสองเครื่องมือให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกันว่ามีโพรงใต้มุมของแผ่นพื้น C1 และ C2 แต่ความลึกของโพรงที่วิเคราะห์จากผลของเครื่อง Port-LTE มีค่าความลึกที่มากกว่า LWD อย่างชัดเจน

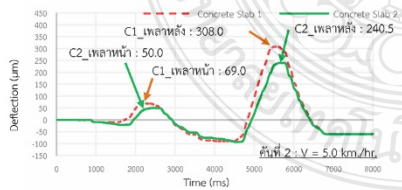
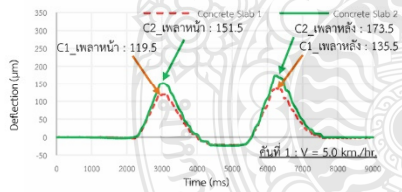
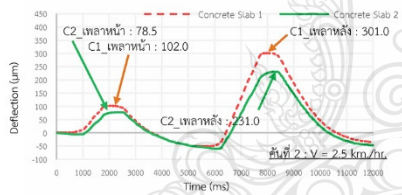
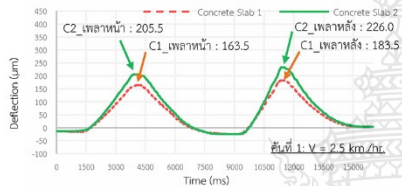
2) ผลทดสอบที่ได้จากเครื่อง Port-LTE มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R<sup>2</sup> น้อยกว่าผลที่ได้จาก LWD ค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำหนักเพลาน้ำหนักและเพลาลงของรถบรรทุกที่ใช้ทำการทดสอบ คือ ขณะที่ใช้น้ำหนักเพลาน้ำหนักทำการทดสอบที่มุมของแผ่นพื้นคอนกรีต น้ำหนักเพลาลงเองก็อยู่บนแผ่นพื้นคอนกรีตเดียวกัน อาจส่งผลให้ค่าการยุบตัวที่ตรวจวัดคลาดเคลื่อนได้

#### 4.2.2 แบบน้ำหนักเคลื่อนที่

ในการทดสอบแบบน้ำหนักเคลื่อนที่ ค่าการยุบตัวที่ได้จะถูกเขียนเป็นกราฟโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Raptre Vibration Analysis เช่นกัน โดยกราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 12 และผลการตรวจวัดค่าการยุบตัวสูงสุดด้วยเครื่อง Port-LTE แสดงดังตารางที่ 5



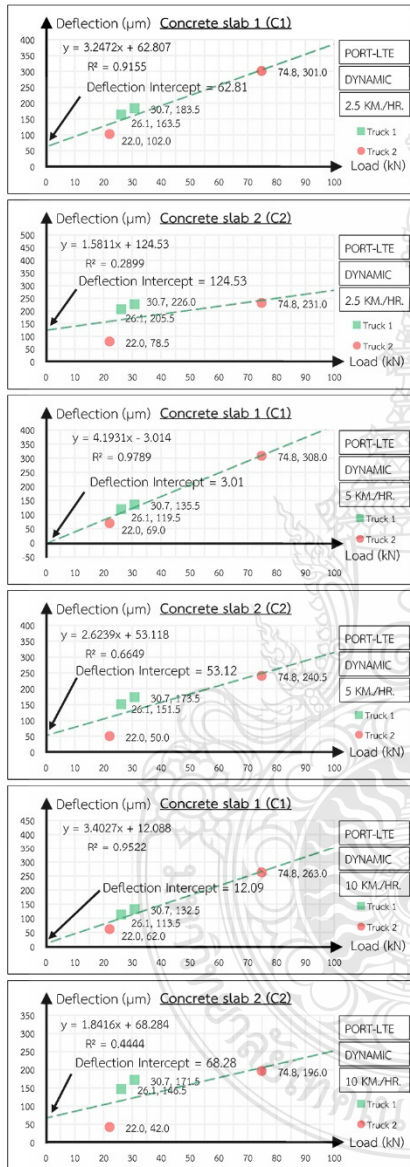
รูปที่ 12 ผลการทดสอบแบบน้ำหนักเคลื่อนที่



ตารางที่ 5 ผลการวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่อง Port-LTE แบบเคลื่อนที่

ความเร็ว (กม./ชม.)	รถบรรทุก	แผ่น	น้ำหนัก (kN)	ค่าการยุบตัว (µm)	
2.5	คันที่ 1	C1	26.1	163.5	
		C2	26.1	205.5	
	คันที่ 2	C1	22.0	102.0	
		C2	22.0	78.5	
	5.0	คันที่ 1	C1	26.1	119.5
			C2	26.1	151.5
คันที่ 2		C1	22.0	69.0	
		C2	22.0	50.0	
10.0		คันที่ 1	C1	26.1	113.5
			C2	26.1	146.5
	คันที่ 2	C1	22.0	62.0	
		C2	22.0	42.0	

รูปที่ 13 แสดงกราฟการวิเคราะห์ด้วย VLCD method เพื่อหาโพรงจากการรบกวนที่ไดจากเครื่องมือ Port-LTE กรณีน้ำหนักเคลื่อนที่และผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 13 กราฟวิเคราะห์ VLCD method ของ Port-LTE แบบเคลื่อนที่

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์โพรงจากการทดสอบด้วยเครื่อง Port-LTE แบบเคลื่อนที่

ความเร็ว (กม./ชม.)	แผ่น	จุดตัดแกนค่าการรบกวน (µm)	R <sup>2</sup>	โพรง
2.5	C1	62.81	0.916	มี
	C2	124.53	0.290	มี
5.0	C1	3.01	0.979	ไม่มี
	C2	53.12	0.665	มี
10.0	C1	12.09	0.952	ไม่มี
	C2	68.28	0.444	มี

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Port-LTE แบบน้ำหนักเคลื่อนที่ และเครื่อง LWD มีประเด็นสำคัญดังนี้

- 1) พบว่ามีเพียงผลลัพธ์จากความเร็วที่ 2.5 กม./ชม. เท่านั้นที่สอดคล้องกับผลของเครื่องมือ LWD คือ มีโพรงที่ได้แผ่นคอนกรีตทั้ง 2 แผ่น และความลึกโพรงได้แผ่นขาออกมีค่ามากกว่าขาเข้า
- 2) ผลวิเคราะห์จากกรณีความเร็ว 5 และ 10 กม./ชม. แสดงว่ามีโพรงได้แผ่นพื้น C2 เท่านั้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลจาก LWD แต่ผลวิเคราะห์จากทั้ง 2 ความเร็วยังแสดงให้เห็นว่าความลึกของโพรงได้แผ่นขาออกมีค่ามากกว่าแผ่นขาเข้า
- 3) จากทุกความเร็วที่ใช้ทดสอบพบว่าผลวิเคราะห์ที่ได้จากแผ่น C1 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R<sup>2</sup> สูงกว่าผลที่ได้จากแผ่น C2 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น ลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ใช้ทำการทดสอบทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้การวัดค่าการรบกวนของเครื่องมือ Port-LTE มีความแปรผันของข้อมูลเกิดขึ้น โดยเฉพาะอิทธิพลของน้ำหนักจากเพลาน้ำและหลังขณะทำการทดสอบ ในขณะที่เครื่องมือตรวจวัดค่าการรบกวนจากน้ำหนักเพลาน้ำอาจมีการรบกวนจากน้ำหนักของเพลาลงที่อยู่นั้นบนคอนกรีตเดียวกัน จึงทำให้ค่าการรบกวนเกิดความแปรผันขึ้น และการควบคุมตำแหน่งของล้อให้กดทับที่เดิมในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นยิ่งยากกว่าการทดสอบแบบสถิตมาก ในขณะที่การทดสอบของเครื่อง LWD ที่สามารถควบคุมตำแหน่งการทดสอบได้แม่นยำกว่า

## 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษานี้พบว่าทดสอบหาโพรงได้แผ่นคอนกรีตด้วยเครื่อง Port-LTE แบบน้ำหนักสถิตได้ผลทดสอบภาคสนามที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ไม่สูงมากนัก แต่ยังคงให้ค่าผลการวิเคราะห์โพรงที่มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่อง LWD คือชี้ว่ามีโพรงได้แผ่นคอนกรีตทั้ง 2 แผ่น และความลึกโพรงของแผ่นขาออกมากกว่าขาเข้า

ในขณะที่การทดสอบหาโพรงได้แผ่นคอนกรีตด้วยเครื่อง Port-LTE แบบเคลื่อนที่ได้ผลทดสอบภาคสนามที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่างกันน้อยชัดเจนของทั้ง 2 จุดทดสอบ โดยมีค่าสูงในแผ่นขาเข้าแต่มีค่าต่ำในแผ่นขาออก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก โดยผลทดสอบที่ได้จากกรณีความเร็ว 5 และ 10 กม./ชม. ไม่สอดคล้องกับผลจาก LWD แต่ที่การทดสอบด้วยความเร็ว 2.5 กม./ชม. เป็นกรณีเดียวที่ให้ผลของการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับ LWD ว่ามีโพรงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งแผ่นขาเข้าและแผ่นขาออก และความลึกของโพรงได้แผ่นขาออกมีค่ามากกว่าแผ่นขาเข้า

โดยในภาพรวมสามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดสอบที่นำเสนอในบทความนี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินหาโพรงได้แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยเครื่องมือ Port-LTE ได้ โดยจะต้องมีการศึกษาพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อลดความผิดพลาดเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากขึ้น

ทั้งนี้ทีมนักวิจัยเชื่อว่าการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถผลิตได้เองในประเทศ เช่น Port-LTE จะสามารถช่วยส่งเสริมความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและส่งเสริมเศรษฐกิจภายในประเทศได้และยังช่วยลดการนำเข้าเทคโนโลยีหรือการเป็นผู้สั่งซื้อเทคโนโลยีแต่เพียงฝ่ายเดียวของประเทศไทยได้อีกด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางและท่าอากาศยาน (RAPTRE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ทำการทดสอบสำหรับงานวิจัยฉบับนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการขนส่งทางบก, แผนยุทธศาสตร์กรมการขนส่งทางบก (พ.ศ.2554-2558), กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก, พ.ศ.2553
- [2] สำนักงบประมาณ สำนักนายกรัฐมนตรี, “เอกสารงบประมาณ ฉบับที่ 3 งบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 เล่มที่ 4”, งบประมาณรายจ่ายของกรมทางหลวง, สำนักงบประมาณ, พ.ศ. 2556, หน้า 79-102.
- [3] พุทธพล ทองอินทร์คำ “เครื่องมือต้นแบบทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นของถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต”, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, พ.ศ. 2557.
- [4] Youn su Jung and Dan G. Zollinger, “Design and Construction Transition Guidelines for Concrete Pavement.”, Research, Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System College Station, 2007.
- [5] Julie M. Vandenbossche. “Effects of Slab Temperature Profiles on Use of Falling Weight Deflectometer Data to Monitor Joint Performance and Detect Voids”, *Transportation Research Record No. 2005*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, 2007, pp. 75–85.
- [6] บัญชา พุทธะกุล, ม.ล.วิจิตต์อังรา สรรพกิจจานง, เสรี ศรีธรรมอำรุง, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติและพรชัย ศิลารัมย์, “การตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ GPR และ FWD” รายงานการวิจัย, กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, พ.ศ.2547
- [7] Paul Thomas Foxworthy., “Concepts for the Development of a Nondestructive Testing and Evaluation System for Rigid Airfield Pavements.” Ph.D. thesis, University of Illinois Urbana-Champaign, 1985
- [8] Khaled Galal, Ph.D. and Leanne Whiteley-Lagace, “FWD/HWD Void Detection Beneath Concrete Pavement or Overlaid Concrete Pavement,” Research, Stantec Consulting Charlotte and Hamilton, Stantec Co., Ltd., 2010.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington D.C., 1993, pp. III-41 – III-45.
- [10] U.S. Department of Transportation, “Advisory Circular 150/5370-11B”, *Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*, Washington, D.C., 2011, pp. 66.
- [11] S. Mathavan, M. M. Rahman and M. Stonecliffe-Jones “Unsupervised Artificial Neural Network for Efficient Mapping of Doweled Concrete Pavement Joints Condition”, *ISSN 1996-6814 Int. J. Pavement Res. Technol. 2014*, June. 2014, pp. 287-296.
- [12] Crovetti J.A. and Darter M.I., “Void Detection for Jointed Concrete Pavements”, *Transportation Research Record No. 1041*, National Research Council, 1985, pp. 59-68.
- [13] Julie Marie Vandenbossche., “Interpreting Falling Weight Deflectometer Results for Curled and Warped Portland Cement Concrete Pavements” Ph.D. thesis, University of Minnesota, 2003.
- [14] Stuart John Arnold., “Load Transfer across Cracks and Joints in Concrete Slabs on Grade.” Ph.D. thesis, University of Loughborough, 2004.
- [15] ชันวิน สวัสดิ์คานต์ และเสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ. “การตรวจหาโพรงใต้ถนนคอนกรีตด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD)”, รายงานการวิจัย, กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, พ.ศ. 2548
- [16] Zhong Yan-hui, Zhang Bei, Liu Qiang and Wang Fu-ming “Theoretical Research on Three Points Regression Method for Identifying the Voids of Concrete Pavement.”, *Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2009, pp. 341-345.
- [17] พุทธพล ทองอินทร์คำ และ จตุพล สายัณห์วัฒน์, “ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักกับโพรงใต้ผิวทางแผ่นพื้น” เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, พ.ศ. 2556, หน้า 297-302

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายพรชัย จิตตะสุจีกุล
วัน เดือน ปีเกิด	4 เมษายน 2534
ที่อยู่	32 ซ.รามอินทรา 50 แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	พนักงานบริษัทเอกชน ตำแหน่งวิศวกร โครงสร้าง บริษัท Wise Project Consulting Co., Ltd. พนักงานบริษัทเอกชน ตำแหน่งวิศวกร โครงสร้าง บริษัท TEAM Consulting Engineering and Management Co., Ltd. ตั้งแต่ พ.ศ. 2558 จนถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	086-305-6403
อีเมล	pornchai_j@mail.rmutt.ac.th

