



การควบคุมการตอกเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพโดยคำนึงถึง
การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566



**CONTROL OF PILE DRIVING IN THE BANGKOK SOIL STRATA
WITH CONSIDERATION OF PILE SET-UP**

**BY
ASAMAPORN TONGLEE**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN CIVIL ENGINEERING
COLLEGE OF ENGINEERING**

GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2023

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การควบคุมการตอกเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพโดยคำนึงถึง
การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา

โดย
อสมภรณ์ ทองลี

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีการศึกษา 2566

รศ. ดร.สายันต์ ศิริมนตรี
ประธานกรรมการสอบ

ผศ. ร.ต. หญิง ดร. วรรณิ สุขสาตร
กรรมการ

ดร.พิสิทธิ ชันดิวัฒนกุล
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ. ร.ต. หญิง ดร. วรรณิ สุขสาตร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
10 สิงหาคม 2566

Thesis entitled

**CONTROL OF PILE DRIVING IN THE BANGKOK SOIL STRATA
WITH CONSIDERATION OF PILE SET-UP**

by

ASAMAPORN TONGLEE

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Rangsit University
Academic Year 2023

Assoc. Prof. Sayan Sirimontree, Ph.D
Examination Committee Chairperson

Asst.Prof.Plt.Off. Vannee Sooksatra,
D.Eng.
Member

Pisit Kuntiwattanakul, D.Eng.
Member and Advisor

Approved by Graduate School

(Asst.Prof.Plt.Off. Vannee Sooksatra, D.Eng.)

Dean of Graduate School

August 10, 2023

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.พิสิทธิ์ ชันติวัฒนะกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความสนใจใ้ช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท พุกยา เรียลเอสเตท จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาให้ทุนสำหรับการทดสอบเสาเข็มสำหรับงานวิจัยนี้

อสมภรณ์ ทองลี

ผู้วิจัย



6303576 : อสมภรณ์ ทองลี
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การควบคุมการตอกเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพโดยคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของ
กำลังของเสาเข็มตามกาลเวลา
หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.พิสิทธิ์ ขันติวัฒน์กุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางการประมาณกำลังของเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มหลังการตอกแล้วใหม่ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการควบคุมการตอกเสาเข็มให้ได้กำลังระยะยาวที่ต้องการโดยไม่ต้องรอทิ้งระยะเวลา 7-14 วันก่อนทดสอบเสาเข็ม การศึกษายังรวมถึงการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา ใน การศึกษานี้ใช้การทดสอบกำลังแบบพลศาสตร์ของเสาเข็ม (Dynamic pile load test) ของเสาเข็ม คอนกรีตอัดแรงที่เวลาต่างๆ รวมถึง ที่เวลาสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (End of driving, EOD), 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง, 1 วัน และ 14 วันหลังการทดสอบ เป็นเครื่องมือโดยเสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มรูป ตัวไอ ขนาด 0.22 เมตร มีจำนวนทั้งสิ้น 49 ต้น มีความยาวในช่วง 11-25 เมตร เสาเข็มทุกต้นตอก ทะลุชั้นดินเหนียวอ่อน และนั่งบนชั้นดินเหนียวแข็ง 33 ต้น โดยมีเสาเข็ม 16 ต้น ตอกทะลุชั้นดิน เหนียวแข็งและนั่งอยู่บนชั้นทราย พื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยแบ่ง พื้นที่ศึกษาเป็นสามโซนประกอบด้วยโซนเหนือ โซนตะวันออกเฉียงใต้ และโซนตะวันตกเฉียงใต้

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน กำลังของเสาเข็มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากำลังที่ 1 นาทีในช่วง 1.5 -5.4 เท่าตัว โดยขนาดของการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลาจะน้อยลงเมื่อกำลังต่อ ความยาวเสาเข็มที่ 1 นาทีมีค่าสูงขึ้น กราฟระหว่างกำลังของเสาเข็มกับลอการิทึมของเวลา มี ลักษณะเป็นโค้งหงาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมการสำหรับคำนวณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ และสมการสำหรับประมาณเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบเสาเข็มที่ 10 นาที, 120 นาที และ 1 วัน หลังจากตอกเสาเข็ม ได้ถูกนำเสนอโดยสมการข้างต้นสามารถใช้ได้กับดินทั้งสามโซนพื้นที่ของ กรุงเทพฯ และสามารถใช้กับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวและชั้นทราย

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 147 หน้า)

คำสำคัญ : กำลังของเสาเข็ม, เสาเข็มตอก, ชั้นดินกรุงเทพ, เสาเข็มคอนกรีต ,การเพิ่มขึ้นของกำลัง ของเสาเข็มตามเวลา

6303576 : Asamaporn Tonglee
 Thesis Title : Control of Pile Driving in the Bangkok Soil Strata with Consideration of Pile Set-up
 Program : Master of Engineering in Civil Engineering
 Thesis Advisor : Pisit Kuntiwattanakul, D.Eng.

Abstract

This thesis is a study of the method for estimating the capacity of piles at 14 days from the pile load test results shortly after driving. The aim is to provide a useful tool for controlling pile driving operations, enabling the achievement of the required long-term capacity without the need to wait for 7–14 days before conducting the pile test. Dynamic load tests were used in the study to measure pile capacities at the end of initial driving (EOD) as well as 1 minute, 10 minutes, 120 minutes, 1 day, and 14 days after driving. In this study, forty-nine I-shaped pre-stressed concrete piles with a width of 0.22 m and lengths varying from 11 to 25 m were employed. All of the piles were driven through the soft clay layer and embedded in the stiff clay layer, with some piles passing through the stiff clay layer and sitting on the medium dense sand layer. The study area covers Bangkok and its surroundings. The study area was divided into three zones, consisting of the north zone, southeast zone, and southwest zone.

The results of this study showed that after 14 days, the pile capacity was 1.5–5.4 times higher than that at 1 minute. The magnitude of the increase in pile capacity over time decreased with the increasing pile capacity per linear meter at 1 min. The graphs between the pile strength and the logarithmic time were concave upward. In this thesis, equations were developed for calculating pile capacity at various times. The equations to estimate pile capacity at 14 days from the pile capacity tested at 10 min, 120 min, and 1 day after pile driving were also proposed. The above equations can be applied to all three zones of Bangkok and can be employed for piles whose tips are in the clay layer as well as the sand layer.

(Total 147 pages)

Keywords: pile set-up, driven pile, Bangkok soil layer, concrete pile, Set-up of Driven Piles in Bangkok Subsoils

Student's Signature Thesis Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนการศึกษาที่ผ่านมา	3
2.1 กลไกการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตอก	3
2.2 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา	7
2.4 การทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)	12
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	17
3.1 พื้นที่ศึกษา	17
3.2 การทดสอบเสาเข็ม	18
3.3 การศึกษาลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มกับเวลา	23
3.4 การทำนายกำลังของเสาเข็มในระยะยาวจากผลการทดสอบในระยะสั้น	25
3.5 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษา	27
4.1 ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็ม	27
4.2 ภาพรวมของการเพิ่มขึ้นของกำลังเสาเข็มกับเวลา	32
4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา	34
4.4 อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ 14 วัน ต่อ กำลังที่ เวลาต่างๆ	67
บทที่ 5 อภิปรายผล	70
5.1 การเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา	70
5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ m	74
5.3 การประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบเสาเข็มที่ เวลาต่างๆ ก่อนหน้า	79
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	85
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ A สำหรับกำลังรวมของเสาเข็ม	93
ภาคผนวก ข พารามิเตอร์ m สำหรับกำลังรวมของเสาเข็ม	119
ภาคผนวก ค การหาค่าเส้นแนวโน้มต่ำสุด	145
ประวัติผู้วิจัย	148

สารบัญตาราง

หน้า	
ตารางที่	
3.1	จำนวนเสาเข็มทดสอบในแต่ละโซน 19
4.1	ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของโซนตะวันออกเฉียงใต้ (SE) 28
4.2	ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของโซนตะวันตกเฉียงใต้ (SW) 29
4.3	ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของโซนเหนือ (N) 30
4.4	ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังที่ 1 นาทีกับกำลังที่ EOD 31
4.5	ตารางสรุปสถิติของค่าพารามิเตอร์ A A_s และ A_b 35
4.6	ตารางสรุปสถิติของค่าพารามิเตอร์ m m_s และ m_b 51
4.7	ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่เวลาต่างๆ 68
4.8	ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วัน ต่อแรงเสียดทานด้านข้างที่เวลาต่างๆ 68
4.9	ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างด้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วัน ต่อด้านทานที่ปลายเสาเข็มที่เวลาต่างๆ 69
5.1	เปรียบเทียบค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงด้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 1 นาที 70
5.2	ตารางสรุปสถิติของ R-squared ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ A A_s และ A_b 71
5.3	ตารางสรุปสถิติของ R-squared ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ m m_s และ m_b 72
5.4	ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่เวลาต่างๆ 81

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ช่วงระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็ม	5
2.2	ผลการทดสอบของ Skov และ Denver (1988) นำมาพล็อตใหม่โดย Ng (2011)	8
2.3	ผลการรวบรวมการทดสอบการทดสอบเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของ Chow et al. (1998)	10
2.4	ผลการรวบรวมการทดสอบเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของ Axelsson (2000)	10
2.5	การทดสอบ Dynamic Pile Load	13
2.6	การติดตั้ง Strain Transducer และ Accelerometer	13
2.7	แบบจำลองที่ใช้ในวิธีของเอส	15
2.8	แผนภาพแสดงกรรมวิธีของวิธีจับคู่สัญญาณ	16
3.1	แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา	17
3.2	ลักษณะชั้นดินของพื้นที่ศึกษา	18
3.3	รูปตัดของเสาเข็มทดสอบ	18
3.4	ความยาวของเสาเข็มและชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม	20
3.5	การติดตั้ง Strain Transducer และ Accelerometer บนหัวเสาเข็ม	21
3.6	การเชื่อมต่อเสาเข็ม	22
3.7	การเชื่อมต่อ Transducer กับเครื่อง Pile Driving Analyzer	22
3.8	การทดสอบกำลังของเสาเข็มแบบพลศาสตร์	23
4.1	การแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์แรงเสียดทานด้านข้างต่อกำลังรวมของเสาเข็มที่เวลาตอกเสาเข็มเสร็จ (EOD) และที่เวลา 14 วันหลังตอก	27
4.2	กราฟแจกแจงความถี่ของค่าอัตราส่วนของกำลังที่ 1 นาที่ ต่อกำลังที่ EOD	31
4.3	การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรวม Q กับเวลาของการทดสอบ	32
4.4	การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานด้านข้าง Q_s กับเวลาของการทดสอบ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม Q_b กับเวลา ของการทดสอบ	33
4.6	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของ กำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	36
4.7	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของ กำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	37
4.8	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของ กำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้	38
4.9	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของ กำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	39
4.10	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของ กำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2	40
4.11	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มโชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	41
4.12	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มโชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	42
4.13	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มโชนตะวันตกเฉียงใต้	43
4.14	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มโชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	44
4.15	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มโชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	46
4.17	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	47
4.18	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้	48
4.19	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	49
4.20	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2	50
4.21	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	52
4.22	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	53
4.23	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้	54
4.24	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	55
4.25	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่	56
4.26	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	57
4.27	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	58
4.28	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	60
4.30	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2	61
4.31	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1	62
4.32	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2	63
4.33	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้	64
4.34	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1	65
4.35	ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2	66
5.1	กราฟการแจกแจงความถี่ของของค่า R-squared ของค่า A A_s และ A_b	72
5.2	กราฟการแจกแจงความถี่ของของค่า R-squared ของค่า m m_s และ m_b	72
5.3	เปรียบเทียบกราฟการแจกแจงความถี่ของของค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ A และ m	73
5.4	กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับความยาวของเสาเข็ม	74
5.5	กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่ 1 นาที	75
5.6	กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วัน	75
5.7	กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่ 1 นาที ($Q_1 \text{ min.}$)	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่ 14 วัน (Q_{14} days)	76
5.9 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาที (Q_1 min./ L)	77
5.10 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 14 วัน (Q_{14} days./ L)	78
5.11 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 วัน (Q_1 min./ L) จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม	79
5.12 กราฟระหว่างค่า Lowe bound ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาที (Q_1 min./ L)	80
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ EOD กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ EOD	82
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 1 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 1 นาที	83
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 10 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 10 นาที	83
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 120 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 120 นาที	84
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 1 วัน กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 1 วัน	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เสาเข็มตอกในโดยทั่วไปจะมีกำลังเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยเฉพาะอย่างยิ่งเสาเข็มในชั้นดินเหนียวซึ่งการตอกเสาเข็มทำให้ดินรอบๆ เสาเข็มถูกรบกวนอย่างมากจนอยู่ในสภาวะ Remoulded และมีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นรอบๆ เสาเข็ม ปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้กำลังของเสาเข็มขณะตอกมีขนาดต่ำมาก แต่เมื่อปล่อยเวลาให้เสาเข็มคืนตัวและแรงดันน้ำส่วนเกินสลายตัว กำลังของเสาเข็มจะค่อยๆ พัฒนาสูงขึ้นจนมีขนาดสูงกว่ากำลังขณะตอกเสาเข็มได้หลายเท่าตัว Wangmo and Kuntiwattanakul (2020) และ มรินทร์ กลั่นสอน, (2564) แสดงให้เห็นว่ากำลังของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ 14 วัน สูงกว่ากำลังที่ 1 นาที ได้มากถึง 5 เท่าตัว ด้วยเหตุนี้การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกโดยทั่วไปจะต้องรอเวลาให้เสาเข็มคืนตัวก่อนซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไปจะใช้เวลา 7 - 14 วัน การที่ต้องรอเวลาเช่นนี้อาจส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของโครงการอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากหลังจากรอแล้วผลการทดสอบปรากฏว่ากำลังของเสาเข็มไม่ได้เกณฑ์ที่กำหนด จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนความยาวของเสาเข็ม และต้องเริ่มกระบวนการตอกและทดสอบเสาเข็มใหม่ อีกครั้งหนึ่ง

ในกรณีที่จำเป็นต้องตอกเสาเข็มเป็นจำนวนมากในเวลาที่กำหนด หากสามารถประมาณกำลังที่ระยะยาวของเสาเข็มจากผลการทดสอบกำลังหลังจากการตอกเสาเข็มไม่นานอย่างแม่นยำ จะทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่าเสาเข็มที่ตอกมีกำลังได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการแล้วหรือไม่ และจะสามารถแก้ไขได้ทันทีหากเสาเข็มได้กำลังต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เช่นอาจจะส่งเสาเข็มลึกลงไปให้กำลังได้เกณฑ์

เหตุผลดังกล่าวข้างต้นเป็นที่มาของการวิจัยนี้ ซึ่งได้ทำการศึกษาแนวทางที่จะประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบกำลังระยะสั้นหลังการตอกเสาเข็ม โดยได้ศึกษาถึงเวลาที่เหมาะสมในทางปฏิบัติที่จะใช้ทดสอบกำลังเพื่อให้ได้ผลการประมาณกำลังที่ 14 วัน ที่แม่นยำ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังครอบคลุมการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา ซึ่งจะประโยชน์ในการประมาณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ

การศึกษานี้ใช้การทดสอบกำลังแบบพลศาสตร์ของเสาเข็ม (Dynamic Pile Load Test) ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ที่เวลาต่างๆ รวมถึง ที่เวลาสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (End of Driving, EOD) 1 นาที 10 นาที 2 ชั่วโมง 1 วัน และ 14 วันหลังการทดสอบ โดยพื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางในการประมาณกำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน จากการทดสอบกำลังระยะสั้นหลังจากตอกเสาเข็ม
- 1.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบกำลังแบบพลศาสตร์ของเสาเข็ม (Dynamic Pile Load Test)
- 1.3.2 เสาเข็มที่ใช้ทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 0.22 เมตร มีความยาวในช่วง 11 - 25 เมตร
- 1.3.3 พื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงแนวทางในการประมาณกำลังของเสาเข็ม ที่ 14 วันจากผลการทดสอบที่ระยะสั้นหลังการตอกเสาเข็ม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจว่าเสาเข็มที่กำลังตอกได้กำลังตามเกณฑ์ที่ต้องการแล้วหรือไม่ โดยไม่ต้องรอเวลา 14 วัน
- 1.4.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา ซึ่งจะสามารถใช้ในการคำนวณเวลาของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของการเพิ่มขึ้นของกำลังกับเวลา

บทที่ 2

ทบทวนการศึกษาที่ผ่านมา

2.1 กลไกการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตอก

เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปในดินจะส่งผลกระทบต่อดินสองประการคือ 1) เสาเข็มจะแทนที่ดิน และ 2) เสาเข็มจะรบกวนดินรอบๆ เสาเข็มเกิดขึ้นอยู่ในสถานะ Remoulded ผลกระทบทั้งสองต่อกำลังของเสาเข็มมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ผลกระทบจากการแทนที่ดินต่อกำลังของเสาเข็ม

ดินถูกแทนที่โดยเสาเข็มตลอดแนวแกนส่วนใหญ่จะถูกดันออกไปในแนวในแนวรัศมีจากแนวแกน แต่ที่บริเวณปลายเสาเข็มดินอาจมีการเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่งและแนวรัศมี Randolph, Carter, and Wroth (1979) กล่าวว่า การตอกเสาเข็มในดินเหนียวสามารถเปลี่ยนแปลงความเค้นในดินอย่างมีนัยสำคัญเป็นระยะทางประมาณ 20 รัศมีของเสาเข็ม ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นกับเสาเข็มตอกที่มีการแทนที่ดินมาก เช่น เสาเข็มตันหรือเสาเข็มกลวงที่มีการอุดตันที่ปลายเสาเข็มตอก แต่ในกรณีเสาเข็มที่มีการแทนที่ดินน้อย เช่น เสาเข็มเหล็กรูปตัว H หรือเสาเข็มท่อปลายเปิดที่ไม่มีการอุดตันที่ปลายเสาเข็มขณะตอกผลกระทบของการตอกเสาเข็มจะน้อยกว่า

เมื่อดินรอบๆ และได้เสาเข็มเคลื่อนตัวและถูกรบกวน แรงดันน้ำโพรงส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) จะเกิดขึ้น ทำให้ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ของดินลดลง การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำโพรงส่วนเกินจะคงที่ตามความลึก Soderberg (1961) และภายในหนึ่งเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มจากผิวเสาเข็มแรงดันน้ำส่วนเกินอาจมีค่าสูงกว่าความเค้นจากน้ำหนักกดทับของดินข้างบน (Overburden Pressure) Pestana, Hunt, and Bray (2002) ขนาดของแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีขนาดสูงสุดที่ผิวของเสาเข็มและมีขนาดค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะห่างจากเสาเข็มเพิ่มขึ้น โดยลดลงแปรผกผันกับระยะทางจากเสาเข็มยกกำลังสองจากเสาเข็ม Pestana et al. (2002) หลังจากการตอกเสาเข็มสิ้นสุด แรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ สลายไปตามเวลา เวลาในการสลายแรงดันน้ำส่วนเกินจะแปรผันตามกำลังสองของขนาดเสาเข็มแนวนอน Holloway and Beddard (1995);

Soderberg (1961) และแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation) ในแนวนอนของดิน Soderberg (1961) ดังนั้น เสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า จะใช้เวลาสลายแรงดันน้ำส่วนเกินนานกว่าเสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า Long, Kerrigan and Wysocky (1999); Wang and Reese (1989) แรงดันน้ำส่วนเกินสำหรับกลุ่มเสาเข็มจะสลายช้ากว่าของเสาเข็มเดี่ยว (Camp III, Wright and Hussein, 1993); (Camp III and Parmar, 1999).

เมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินค่อยๆ สลายไป ความเค้นประสิทธิผลของดินรอบเสาเข็มจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลรอบๆ เสาเข็มมีผลต่อกำลังของเสาเข็มสองประการคือ 1) ส่งผลให้กำลังของดินค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น และ 2) ส่งผลให้หน่วยแรงอัดด้านข้างของดินต่อผิวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ผลกระทบทั้งสองประการเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา จะเห็นได้ว่าการรบกวนของดินและการเกิดและการสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินส่วนใหญ่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของเสาเข็ม ด้วยเหตุผลนี้การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มจึงเป็นผลมาจากการเพิ่มความต้านทานด้านข้างของเสาเข็ม (Shaft Friction) เป็นหลัก (Axelsson, 2002); (Bullock, 1999); (Chow, Jardine, Brucy, and Nauroy, 1998).

2.1.2 ผลกระทบจากการรบกวนดินต่อกำลังของเสาเข็ม

การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลาส่วนหนึ่งอาจมาจากระบวนการที่เรียกว่า Thixotropy ซึ่งเป็นพฤติกรรมชนิดหนึ่งของดินเหนียวที่กำลังของดินเมื่อถูกรบกวนจะลดลงอย่างมากแต่เมื่อการรบกวนยุติกำลังของดินจะค่อยๆ กลับสู่สภาพเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป คำว่า Thixotropy เดิมเสนอโดย เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ของสารละลายคอลลอยด์จากสภาพของเหลวเป็นเจลคล้ายของแข็งที่ยืดหยุ่น แต่ต่อถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในธรณีวิทยาและกลศาสตร์ของดิน (Burgers and Blair, 1949); (Skempton and Northey, 1952); (Mitchell, 1960)

ขณะตอกเสาเข็มการแทรกตัวของเสาเข็มผ่านลงไปดินจะทำให้ดินรอบๆ เสาเข็มถูกรบกวน Yang (1970) ระบุว่าในดินเหนียว ดินในระยะห่างจากเสาเข็มประมาณ $\frac{1}{2}$ เส้นผ่านศูนย์กลาง เสาเข็มจะถูกรบกวนอย่างมากจนดินอยู่ในสถานะ Remoulded ทั้งหมด การ Remoulded ส่งผลให้กำลังของดินเหนียวลดลงอย่างมากทำให้กำลังของเสาเข็มขณะตอกมีขนาดค่อนข้างต่ำมาก เมื่อการ

ตอกเสาเข็มสิ้นสุดลง การ Remoulded ของดินจะยุติ หลังจากนั้นกระบวนการ Thixotropy ในดินจะทำให้กำลังของเสาเข็มค่อยๆ กลับคืนสู่สภาพเดิม

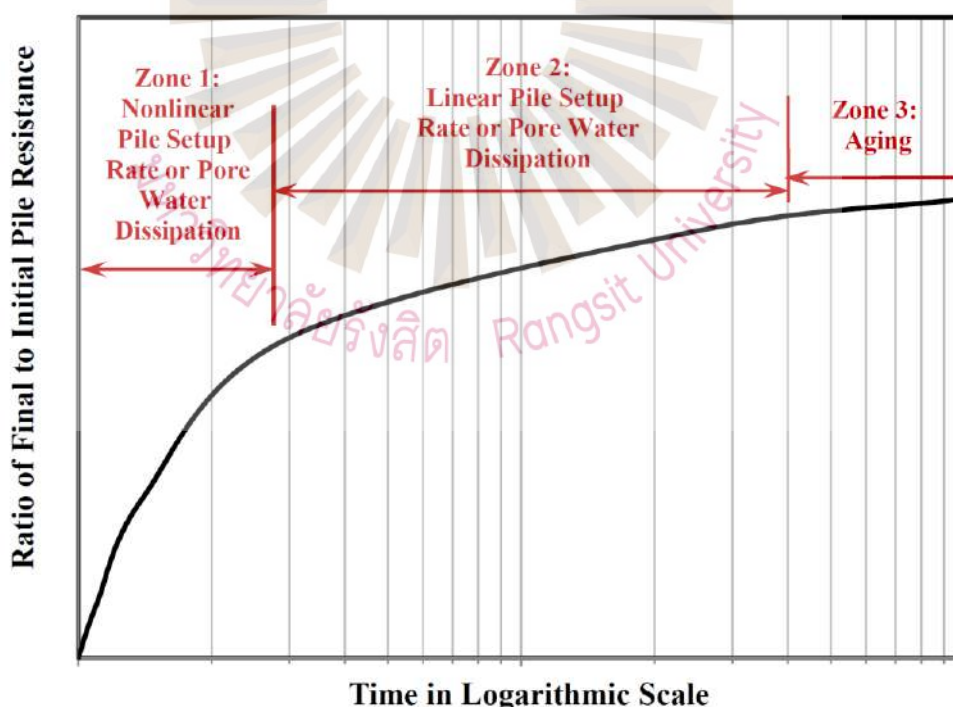
2.2 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา

Komurka, Wagner, and Edil (2003) อธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือการเพิ่มขึ้นของกำลังที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลในดินจากการตอกเสาเข็ม และการเพิ่มของกำลังที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล การเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถ แบ่งออกเป็น 3 ช่วงระยะเวลาดังนี้

ระยะที่ 1 อัตราลอการิทึมแบบไม่เชิงเส้นของการสลายของแรงดันน้ำส่วนเกิน

ระยะที่ 2 อัตราลอการิทึมแบบเชิงเส้นเชิงของการสลายของแรงดันน้ำส่วนเกิน และ

ระยะที่ 3 การเพิ่มขึ้นที่เป็นอิสระจากหน่วยแรงประสิทธิผล



รูปที่ 2.1 ช่วงระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็ม

ที่มา: Komurka et al., 2003

2.2.1 ระยะที่ 1 อัตราการซึมแบบไม่เชิงเส้นของการสลายของแรงดันน้ำส่วนเกิน

ระยะนี้เป็นช่วงเริ่มต้นของการสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกิน เนื่องจากสภาพดินถูกรบกวนอย่างมากจากการตอกเสาเข็ม อัตราการสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินในลอกการซึมของเวลาจึงยังไม่คงที่ (ไม่เป็นเชิงเส้น) การเพิ่มขึ้นของกำลังจะสอดคล้องกับอัตราสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งจะไม่เป็นเชิงเส้นในลอกการซึมของเวลา การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในระยะนี้ ยังไม่มีทฤษฎีที่ใช้ทำนายและยากต่อการสร้างแบบจำลองและหรือคาดการณ์ อย่างไรก็ตาม Bullock (1999) ได้พิสูจน์ว่ากำลังของเสาเข็มสามารถเพิ่มได้ในเวลาไม่กี่นาทีหลังการตอก

ช่วงระยะเวลาของระยะที่ 1 จะยาวนานเท่าใด ขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน และค่าความไว (Sensitivity) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของเสาเข็มยิ่งดินและเสาเข็มมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้อย และปริมาณดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็มมากเท่าใด ช่วงระยะเวลาระยะที่ 1 จะยิ่งนานขึ้นเท่านั้น ในทรายที่สะอาด ช่วงระยะเวลาระยะที่ 1 จะสั้นมาก แต่ในดินที่เหนียวอาจใช้เวลาเป็นเวลาหลายวัน

2.2.2 อัตราการซึมแบบแบบเชิงเส้นเชิงของการสลายของแรงดันน้ำส่วนเกิน

ในระยะที่ 2 นี้ อัตราการสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินส่วนเกินจะเป็นเชิงเส้นในลอกการซึมของเวลาตามทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของดิน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มจะเป็นเชิงเส้นในลอกการซึมของเวลา ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบจำนวนหนึ่งซึ่งแสดงว่ากำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้น เป็นเชิงเส้นในลอกการซึมของเวลา

เช่นเดียวกับระยะที่ 1 ช่วงเวลาที่ระยะที่ 2 จะสิ้นสุดขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน และค่าความไว (Sensitivity) ของดิน และขึ้นอยู่กับขนาดและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของเสาเข็มยิ่งดินและเสาเข็มมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้อย และปริมาณดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็มมากเท่าใด ช่วงระยะเวลาระยะที่ 2 จะยิ่งนานขึ้นเท่านั้น ในทรายที่สะอาดระยะที่ 2 อาจสิ้นสุดในระยะเวลาเป็นหลักชั่วโมงในดินทรายแป้ง ทรายละเอียดปนทรายแป้ง ทรายผสมดินเหนียว ระยะที่ 2 อาจดำเนินต่อไปเป็นเวลาหลายชั่วโมง หลายวัน หรือหลายสัปดาห์ในดินที่เหนียวแน่น ระยะที่ 2 อาจดำเนินต่อไปเป็นเวลาหลายสัปดาห์ หลายเดือน หรือแม้แต่หลายปี (Skov and Denver, 1988)

2.2.3 ระยะที่ 3 การเพิ่มขึ้นที่เป็นอิสระจากหน่วยแรงประสิทธิผล

ถึงแม้ว่าทฤษฎีการการอัดตัวคายน้ำของดินแสดงว่าการสลายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินต้องใช้เวลาไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติจะกำหนดว่ามีเวลาหนึ่งที่แรงดันน้ำส่วนเกินที่เหลืออยู่มีขนาดน้อยมากและอัตราการสลายตัวช้ามากจนไม่ส่งผลกระทบต่อดินอีกต่อไป ซึ่งเป็นเวลาที่ยอมรับว่าการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดสมบูรณ์แล้ว อย่างไรก็ตามหลังจากนั้นการอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary Consolidation) ยังคงดำเนินต่อไป และไม่ขึ้นกับหน่วยแรงมีประสิทธิผลในดิน

เช่นเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในระยะที่ 2 จะสิ้นสุดที่เวลาหนึ่งที่แรงดันน้ำส่วนเกินที่เหลืออยู่มีขนาดน้อยมากและอัตราการสลายตัวช้ามากจนไม่ส่งผลกระทบต่อดินอีกต่อไป หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มจะเป็นระยะที่ 3 ซึ่งจะเพิ่มขึ้นกับหน่วยแรงมีประสิทธิผลในดินอีกต่อไป ในระยะนี้การเพิ่มขึ้นของกำลังเกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Aging

Aging หมายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินตามเวลาที่หน่วยแรงประสิทธิผลคงที่เกิดขึ้นทั้งกับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ Aging อาจเกิดจาก Thixotropy การอัดคายน้ำทุติยภูมิ การแทรกสอดของอนุภาค และการแพร่กระจายของดินเหนียว (Camp III et al., 1993; Long et al., 1999; Schmertmann, 1991)

กลไกการเพิ่มขึ้นของกำลังทั้ง 3 ระยะ อาจมีการเหลื่อมกันระหว่างระยะที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้น อาจมีมากกว่า หนึ่งระยะในช่วงเวลาหนึ่ง (เช่น Aging อาจเริ่มขึ้นก่อนที่แรงดันน้ำส่วนเกินจะสลายไปโดยสมบูรณ์) นอกจากนี้ เว้นแต่สภาพของดินจะสม่ำเสมอตลอดความยาวทั้งหมดและได้ปลายเสาเข็ม ดินที่แตกต่างกันที่ระดับความสูงต่างกันจะอยู่ในระยะการเพิ่มขึ้นของกำลังที่แตกต่างกัน

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลาสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักๆ คือ 1) กลุ่มที่กำหนดให้กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอการิทึมของเวลา 2) กลุ่มที่กำหนดให้กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นไม่เป็นเส้นตรงกับลอการิทึมของเวลา

2.3.1 ความสัมพันธ์ที่ก้ำกึ่งของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอการิทึมของเวลา

ผลการทดสอบก้ำกึ่งของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของกลุ่มแรกแสดงให้เห็นว่าก้ำกึ่งของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามลอการิทึมของเวลา Skov and Denver (1988) เป็นผู้ริเริ่มในการใช้ฟังก์ชันเวลาแบบกึ่งลอการิทึมเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างก้ำกึ่งรับน้ำหนักของเสาเข็มกับเวลา ของผลการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic) และการทดสอบแบบสถิต (Static) ของเสาเข็มตอกที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของเสาเข็มตอกสามต้น ในชั้นดินเหนียว ซอล์ก และทราย โดยสมการที่เสนอแนะโดย Skov and Denver (1988) มีรูปแบบดังนี้

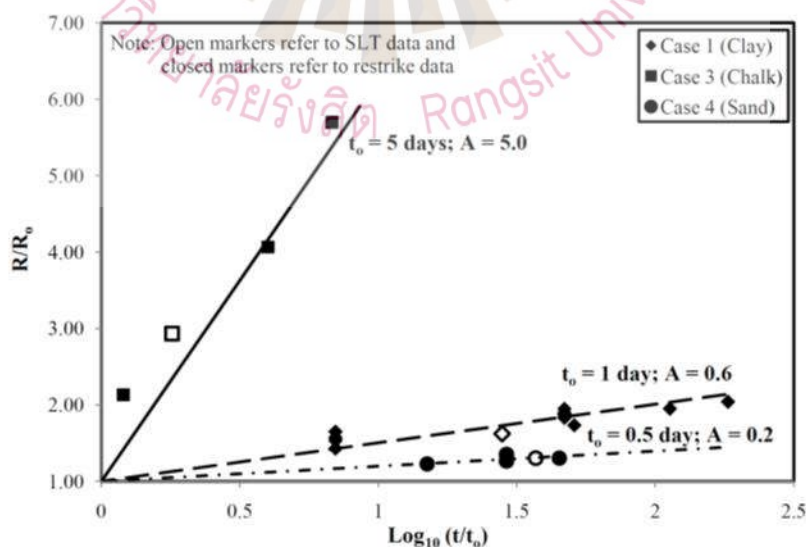
$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + A \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (2-1)$$

เมื่อ Q คือก้ำกึ่งรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เวลา t ใดๆ

Q_0 หมายถึงก้ำกึ่งของเสาเข็มที่วัดได้ ณ เวลามาตรฐาน t_0

A หมายถึงค่าก้ำกึ่งที่เพิ่มขึ้นต่อรอบลอการิทึมของเวลา

Skov and Denver (1988) ระบุว่าค่าของ A ในสมการ (2-1) สำหรับเสาเข็มใน ทราย ดินเหนียว และ ซอล์ก มีค่าเท่ากับ 0.2, 0.6 และ 5.0 ตามลำดับ โดยใช้เวลาอ้างอิง t_0 เป็น 0.5, 1.0 และ 5.0 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ผลการทดสอบของ Skov และ Denver (1988) นำมาฟลอตใหม่โดย Ng (2011)

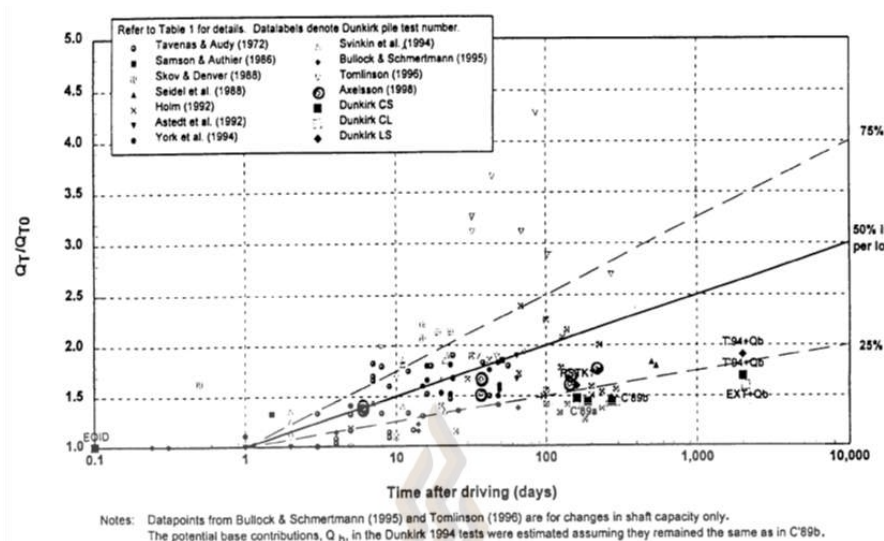
ที่มา: Ng, 2011

ถึงแม้ว่าสมการของ Skov and Denver (1988) ได้พัฒนาจากการผลการเสาะเข็มเพียง 3 ต้น แต่ภายหลังมีผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของสมการจากนักวิจัยหลายท่านรวมถึง (Axelsson, 1998); (Chow et al., 1998); (Bullock, 1999); (Camp III and Parmar, 1999); (Long et al., 1999) และ (Augustesen et al., 2005)

เมื่อตรวจสอบในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าแนะนำของ t_0 มีความหลากหลาย เช่น Camp III and Parmar (1999) แนะนำว่าค่า t_0 สำหรับเสาะเข็มคอนกรีตอัดแรงและเสาะเข็มรูปตัว H ควรอยู่ในช่วง 1 – 2 วัน Axelsson (1998) กำหนดค่า t_0 สำหรับเสาะเข็มคอนกรีตอัดแรงในดินที่ไม่เหนียวแน่นให้เท่ากับ 1 วัน (Long et al., 1999) แนะนำให้ใช้เท่ากับ 0.01 วัน Svinkin, Morgano and Morvant (1994) ใช้เท่ากับ 1 ถึง 2 วัน Bullock (1999) และ McVay, Schmertmann, Townsend, and Bullock (1999) แนะนำให้กำหนดมาตรฐานเท่ากับ 1 วัน

ในทางทฤษฎี ค่า t_0 ควรขึ้นอยู่กับชนิดของดินและขนาดของเสาะเข็ม อย่างไรก็ตาม Bullock (2008) แสดงให้เห็นว่ากำลังของเสาะเข็มในส่วนของการเสียดทานด้านข้าง (Shaft Friction) เพิ่มขึ้นเชิงเส้นกับลอการิทึมของเวลาทันทีหลังการตอก และพารามิเตอร์ A ที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาะเข็มแบบไดนามิกส์ ที่ดำเนินการทันทีหลังจากสิ้นสุดการตอกเสาะเข็ม (EOD), ที่เวลาผ่านไป 15 นาที และ 1 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาะเข็มแบบสถิตที่ระยะเวลา 1 วันถึง 4.7 ปี

พารามิเตอร์ A ที่รวบรวมจากการศึกษาที่ผ่านมา มีค่าค่อนข้างหลากหลาย (Chow et al., 1998) รายงานว่าข้อมูลจากนักวิจัย 14 คน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งระบุค่าของ A อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 การศึกษาโดย Axelsson (2000) ให้ค่า A ตั้งแต่ 0.15 ถึง 0.65 (รูปที่ 2.4) จะเห็นว่าช่วงของค่าพารามิเตอร์ A มีค่าค่อนข้างกว้างขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่นชนิดของดิน ชนิดของเสาะเข็ม เป็นต้น นอกจากนี้ Augustesen, Andersen, and Sorensen (2005) ยังแสดงให้เห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ A ยังขึ้นกับการกำหนดค่าเวลามาตรฐาน t_0 ที่ใช้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 ผลการรวบรวมการทดสอบการทดสอบเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของ Chow et al. (1998)

ที่มา: Chow et al., 1998

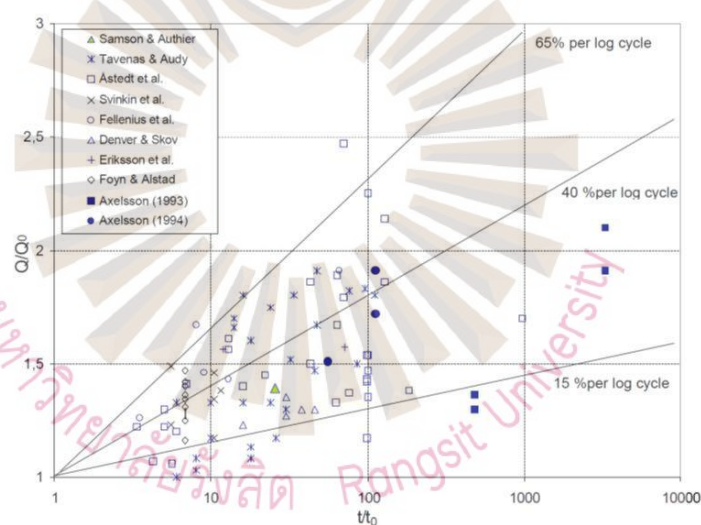


Figure 2.2 Case histories of long-term pile set-up where t_0 is between 0.5-4 days after EOD.

รูปที่ 2.4 ผลการรวบรวมการทดสอบเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ของ Axelsson (2000)

ที่มา: Axelsson, 2000

Karlsrud, Clausen and Aas (2005) พยายามเชื่อมโยงคุณสมบัติของดินกับการเพิ่มขึ้นของกำลังเสาเข็มโดยผสมผสานดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) และค่า Overconsolidation Ratio (OCR) ของดินโดยใช้ฐานข้อมูลของ Norwegian Geotechnical Institute (NGI) ที่ประกอบด้วยทดสอบเสาเข็มต่อเหล็กจำนวน 36 ต้น ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 200 มม. โดยสมการที่แนะนำคือ

$$\frac{Q}{Q_{100}} = A \log\left(\frac{t}{t_{100}}\right) + 1 \quad (2-2)$$

$$A = 0.1 + 0.4 \left(1 - \frac{PI}{50}\right) OCR^{0.8} \quad (2-3)$$

เมื่อ Q_{100} คือกำลังที่ 100 วัน
 t_{100} คือเวลา 100 วัน
 PI คือค่าดัชนีความเป็นพลาสติกเป็นเปอร์เซ็นต์
 OCR คือ Overconsolidation Ratio

Svinkin and Skov (2000) ได้ปรับปรุงสมการที่ 2-1 เพื่อให้สามารถคำนวณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างจากผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มขณะตอกเสร็จใหม่ๆ โดยการสมมุติเวลาที่ใช้ตอกเสาเข็มเป็น 0.1 วัน โดยกำลังของเสาเข็ม (Q) ที่เวลา t ใดๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{Q}{Q_{EOD}} = 1 + B[\log_{10}(t) + 1] \quad (2-4)$$

เมื่อ Q_{EOD} คือกำลังของเสาเข็มขณะตอกเสาเข็มเสร็จ
 B คือค่าคงที่คล้ายกับ A ในสมการที่ 2-1
 t คือเวลาเป็นวัน

2.3.2 ความสัมพันธ์ที่กำลังของเสาเข็มเป็นเพิ่มขึ้นไม่เป็นเส้นตรงกับลอการิทึมของเวลา

ผู้วิจัยในกลุ่มที่สองเสนอผลการทดลองที่แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับลอการิทึมของเวลา เพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งหงาย Svinkin (1996) ได้เสนอสมการขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้คำนวณกำลังของเสาเข็ม Q ที่เวลา t ใดๆ ของเสาเข็มตอกในชั้นทรายแน่นดังนี้

$$\frac{Q_t}{Q_{EOD}} = 1.4t^{0.1} \quad (Upperbound) \quad (2-5)$$

$$\frac{Q_t}{Q_{EOD}} = 1.025t^{0.1} \quad (Lowerbound) \quad (2-6)$$

เมื่อ Q_{EOD} คือกำลังของเสาเข็มขณะตอกเสาเข็มเสร็จ
 t คือเวลาเป็นวัน

Long et al., 1999 ได้นำเสนอสมการที่ใช้คำนวณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ดังนี้

$$\frac{Q_t}{Q_{EOD}} = 1.1t^\alpha \quad (2-7)$$

โดย α มีค่าอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.18

Khan and Decapite (2011) เสนอสมการที่คล้ายกันสำหรับเสาเข็มในชั้นดินเหนียวผสมทรายแป้งดังนี้

$$\frac{Q_t}{Q_{EOD}} = 0.9957t^{0.087} \quad (2-8)$$

จะเห็นว่าสมการข้างต้นแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มจะเป็นเส้นโค้งหงายเมื่อพล็อตกับลอการิทึมของเวลา นอกจากนี้ยังมีผลการทดลองของ Axelsson (2000) และ Lee, Kim, Salgado and Zaheer (2010) แสดงให้เห็นว่ากราฟระหว่างกำลังกับลอการิทึมของเวลามีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับสมการของ (Skov and Denver, 1988)

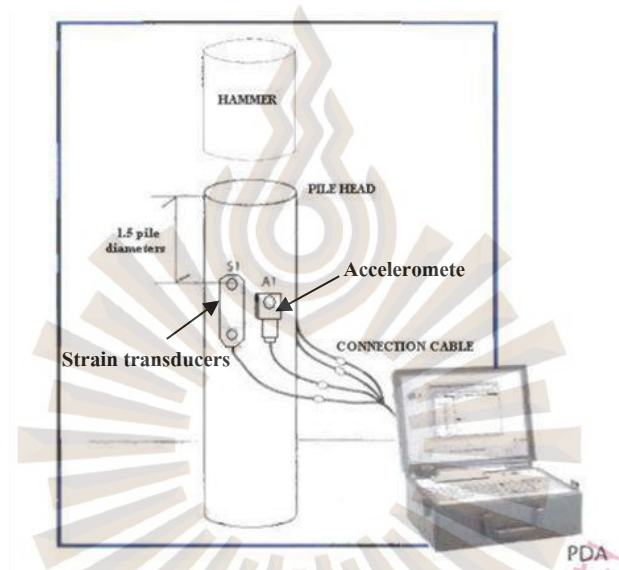
2.4 การทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มแบบพลศาสตร์เป็นการทดสอบโดยการปล่อยค้อนน้ำหนักให้ตกลงบนหัวเสาเข็มแล้วทำการวัดผลตอบสนองของแรงในหน้าตัดเสาเข็มกับความเร็วอนุภาคของเสาเข็มด้วย Transducer (รูปที่ 2.5) ข้อมูลการตอบสนองดังกล่าวสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงพลวัตเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักเชิงสถิตของเสาเข็มและความสม่ำเสมอของเสาเข็มทั้งในด้านขนาดความแข็งแรงและความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ (มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test (มยผ. 1252-51, 2551))

เครื่องมือที่ใช้วัดผลตอบสนองของแรงกระแทกจากลูกค้อนประกอบด้วย Strain Transducer และ Accelerometer ติดตั้งโดยการใส่ Expansion bolt ยึดกับรูที่เจาะบนหัวเสาเข็มดังแสดงในรูปที่

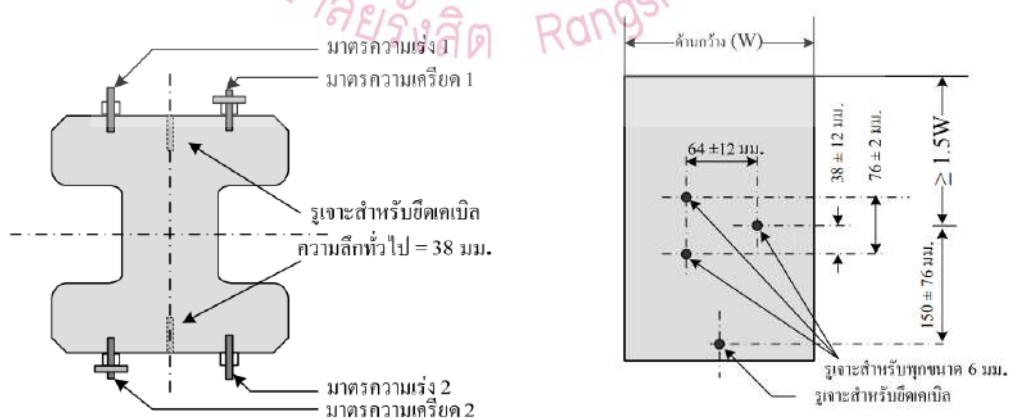
2.6 โดยแรงในเสาเข็มสามารถคำนวณจากค่า Strain ที่วัดจาก Strain Transducer ส่วนความเร็วอนุภาคของเสาเข็มสามารถคำนวณจากค่าความเร่งที่ได้จาก Accelerometer

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากผลตอบสนองของแรงในหน้าตัดและความเร็วอนุภาคของเสาเข็มที่นิยมใช้กันในประเทศไทยมีอยู่สองวิธีคือ วิธีของเคส (CASE Method) และวิธีจับคู่สัญญาณ (Signal Matching Method) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.5 การทดสอบ Dynamic Pile Load

ที่มา: Civil Engineer, 2020



รูปที่ 2.6 การติดตั้ง Strain Transducer และ Accelerometer

ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2551

2.4.1 วิธีของเคส

ในปีค.ศ. 1958 สถาบันเทคโนโลยีเคส ประเทศสหรัฐอเมริกาในได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้จากการวัดแรงในหน้าตัดเสาเข็มกับความเร่งที่หัวเสาเข็มขณะตอกเสาเข็ม ซึ่งต่อมาเป็นที่รู้จักกันว่า “วิธีของเคส” (CASE Method) วิธีของเคสเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน สามารถหาผลลัพธ์ได้รวดเร็ว ในการปฏิบัติงานปราคตินิยมใช้วิธีของเคสเพื่อการประเมินขั้นต้นในสนามและนำผลการตรวจวัดที่ได้ไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยวิธีเชิงตัวเลขในภายหลังแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามวิธีของเคสสมมุติให้แรงต้านทานและความหน่วงทั้งหมดเกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 2.7

เนื่องจากลักษณะของการทดสอบที่เป็นแบบพลวัตแรงในเสาเข็มที่วัดได้ (F) จึงประกอบด้วยแรงต้านทานแบบพลวัต (R) และแรงเฉื่อย (Inertia Force = ma) โดยแรงต้านทานแบบพลวัต (R) สามารถคำนวณได้โดยสมการ 2.9 (Gravare, Goble, Rausche and Linkins , 1980)

$$R = F - ma = \frac{1}{2} \left[\left(F(t_1) + F \left(t_1 + 2\frac{L}{c} \right) \right) + \frac{mc}{L} \left(v(t_1) - v \left(t_1 + 2\frac{L}{c} \right) \right) \right] \quad (2-9)$$

เมื่อ $F(t_1)$ และ $F(t_1+2L/c)$	คือแรงที่วัดได้ที่เวลา t_1 และ t_1+2L/C
$v(t_1)$ และ $v(t_1+2L/c)$	คือความเร็วที่วัดได้ที่เวลา t_1 และ t_1+2L/C
L	คือความยาวของเสาเข็ม
c	คือความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนผ่านเสาเข็ม
m	คือมวลของเสาเข็ม

แรงต้านทานแบบพลวัต (R) ประกอบด้วย แรงต้านทานสภาพสถิต (S) และแรงหน่วง (Damping Force, D) ดังนั้นแรงต้านทานเชิงสถิต (S) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

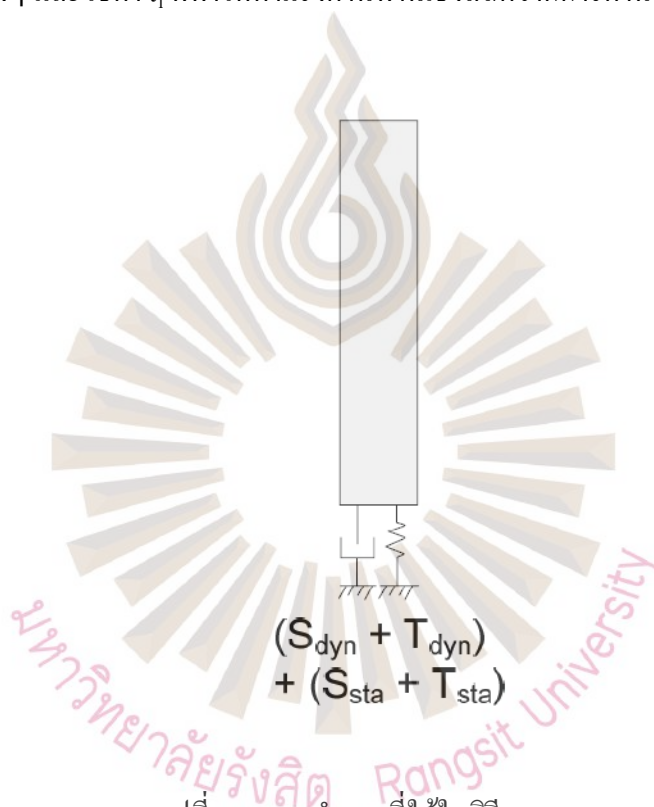
$$S = R - D \quad (2-10)$$

โดย แรงหน่วง D สามารถคำนวณได้จาก

$$D = J \left(2v(t_1) - \frac{L}{mc} R \right) \quad (2-11)$$

เมื่อ J คือสัมประสิทธิ์ความหน่วง

ในช่วงเริ่มต้น เวลา t_1 ในสมการที่ 2-9 เป็นเวลาที่แรงหน้าตัดหรือความเร็วของอนุภาคเสาเข็มมีค่ามากที่สุด แต่ภายหลังสำหรับชั้นดินบางประเภทมีผู้เสนอให้ใช้วิธีทดลองแทนค่า t_1 ด้วยเวลาตำแหน่งต่างๆ และใช้ค่า t_1 ที่ทำให้ค่าแรงต้านทานเชิงสถิตจากการคำนวณตามสมการ 2-10 มีค่ามากที่สุด



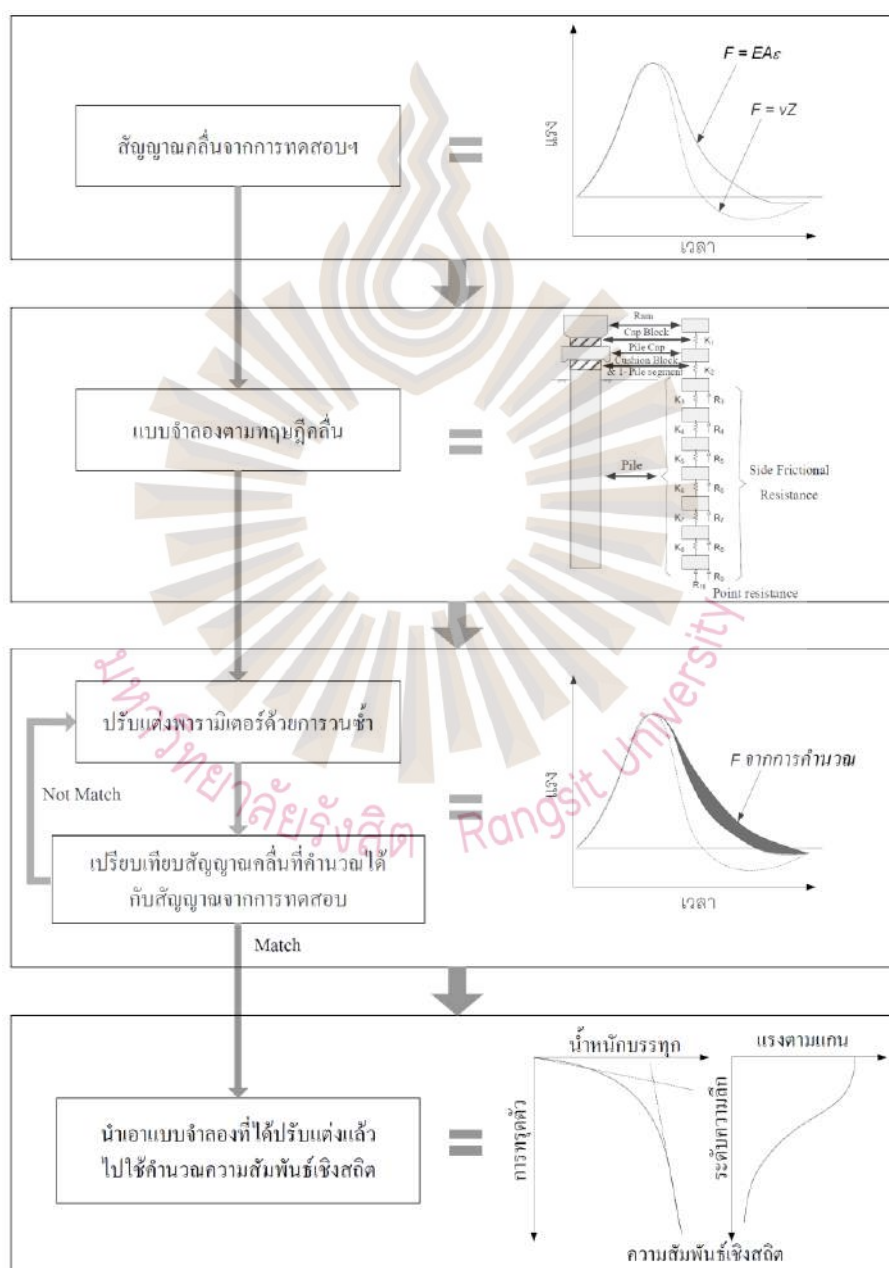
รูปที่ 2.7 แบบจำลองที่ใช้ในวิธีของเคส

ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2551

2.4.2 วิธีจับคู่สัญญาณ (Signal Matching Method)

วิธีจับคู่สัญญาณมีกลวิธีแสดงโดยแผนภาพในรูปที่ 2.8 โดยวิธีนี้ใช้คอมพิวเตอร์คำนวณสัญญาณคลื่นจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่แบ่งเสาเข็มออกเป็นส่วยย่อยหลายส่วน แต่ละส่วนมีแรงต้านทานจากดินและเชื่อมต่อกันด้วยสปริง สัญญาณคลื่นจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดได้จาก Transducer หากสัญญาณคำนวณมีความแตกต่างจากที่วัดได้ จะใช้วิธีทำซ้ำ (Iterative method) โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์แรงต้านทานเชิงสถิตและเชิงพลวัตจากดินจนกระทั่งสัญญาณทั้งสองมีค่า

ใกล้เคียงกันหลังจากกระบวนการจับคู่สัญญาณแล้วเสร็จกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเชิงสถิตของเสาเข็มจะคำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์แรงต้านทานเชิงสถิตของแบบจำลอง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เป็นที่นิยมใช้ในการคำนวณด้วยวิธีจับคู่สัญญาณประกอบด้วย โปรแกรม CAPWAP ของบริษัท Pile dynamics, Inc. ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ โปรแกรม SIMBAT ของบริษัท Test consult Ltd. ของประเทศอังกฤษ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกรรมวิธีของวิธีจับคู่สัญญาณ

ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2551

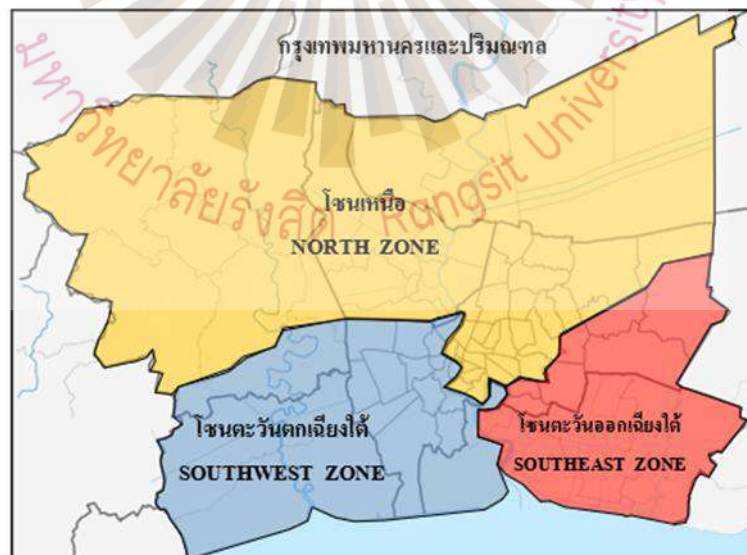
บทที่ 3

วิธีการศึกษา

การศึกษาการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มของการการศึกษานี้ใช้การทดสอบ Dynamic Pile Load ที่เวลาต่างๆ เสาเข็มที่ทดสอบทั้งหมดเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 0.22 เมตร พื้นที่ทดสอบครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล รายละเอียดของการศึกษามีดังต่อไปนี้

3.1 พื้นที่ศึกษา

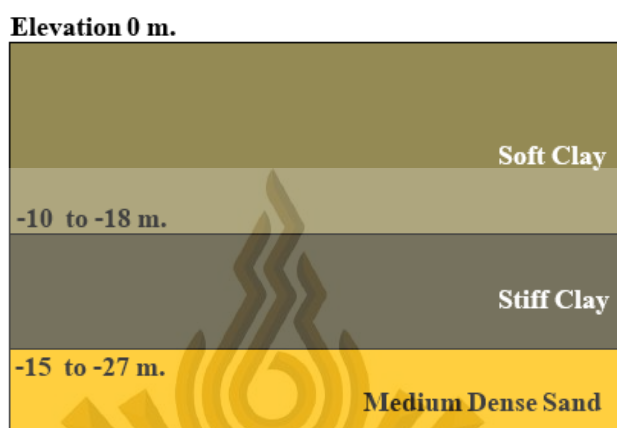
พื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งรวมถึง กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ นนทบุรี ปทุมธานี นครปฐม และสมุทรสาคร พื้นที่การศึกษาถูกแบ่งออกเป็นสามโซนย่อยแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยโซนเหนือ (North Zone) โซนตะวันตกเฉียงใต้ (Southwest Zone) และโซนตะวันออกเฉียงใต้ (Southeast Zone)



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา

ที่มา : ผู้วิจัย ,2565

ชั้นดินของพื้นที่ศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยดินชั้นบนสุดเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10-18 เมตร รองรับด้วยชั้นดินเหนียวแข็งหนาประมาณ 5 ถึง 10 เมตร ได้ชั้นดินเหนียวแข็งเป็นชั้นทรายแน่นปานกลางถึงแน่น

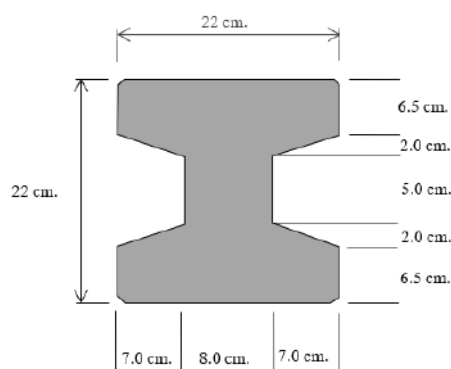


รูปที่ 3.2 ลักษณะชั้นดินของพื้นที่ศึกษา
ที่มา : ผู้วิจัย ,2565

3.2 การทดสอบเสาเข็ม

3.2.1 เสาเข็มที่ใช้ทดสอบ

เสาเข็มที่ใช้ทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมาตรฐาน มอก.396-2540 รูปตัวไอที่มีรูปตัดดังแสดงในรูปที่ 3.3



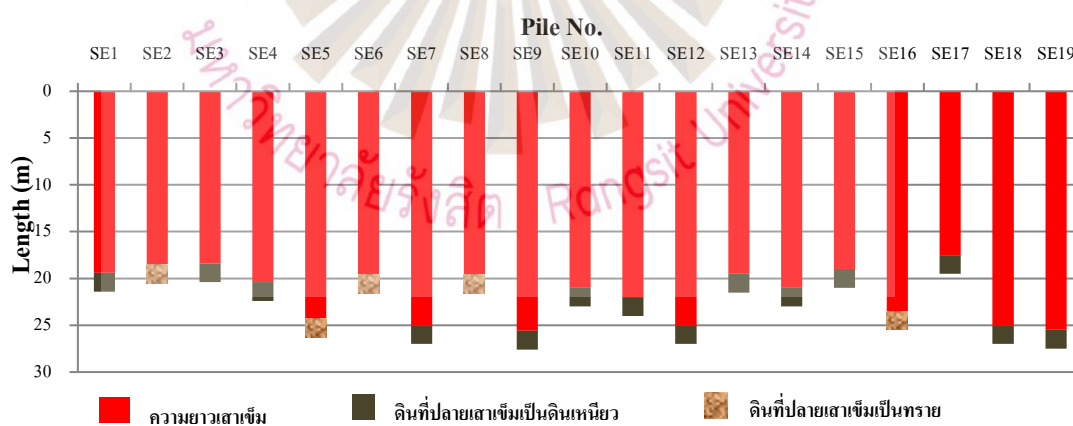
รูปที่ 3.3 รูปตัดของเสาเข็มทดสอบ
ที่มา : ผู้วิจัย ,2565

เสาเข็มทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 49 ต้น แบ่งออกตามโซนย่อยต่างๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1 เสาเข็มมีความยาวตั้งแต่ 11 ถึง 25 เมตร โดยเสาเข็มที่มีความยาวเกิน 13 เมตร เป็นเสาเข็มสองท่อนต่อด้วยการเชื่อม ทั้งนี้เสาเข็มทุกต้นตอกทะลุชั้นดินเหนียวอ่อน โดยมีเสาเข็ม 16 ต้นตอกทะลุชั้นดินเหนียวแข็งและนั่งอยู่บนชั้นทราย เสาเข็มที่เหลืออีก 33 ต้นมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง เสาเข็มแต่ละโซนมีหมายเลขกำกับ โดยโซนเหนือมีหมายเลขตั้งแต่ N1 ถึง N19 โซนตะวันออกเฉียงใต้มีหมายเลขตั้งแต่ SE1 ถึง SE19 และโซนตะวันตกเฉียงใต้มีหมายเลขตั้งแต่ SW1 ถึง SW12 รูปที่ 3.4 สรุปความยาวของเสาเข็มที่ทดสอบทุกต้นพร้อมทั้งชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มแต่ละต้น

ตารางที่ 3.1 จำนวนเสาเข็มทดสอบในแต่ละโซน

Zone	จำนวนเสาเข็ม	หมายเลขเสาเข็ม
North	19	N1 ถึง N19
Southeast	19	SE1 ถึง SE19
Southwest	11	SW1 ถึง SW12

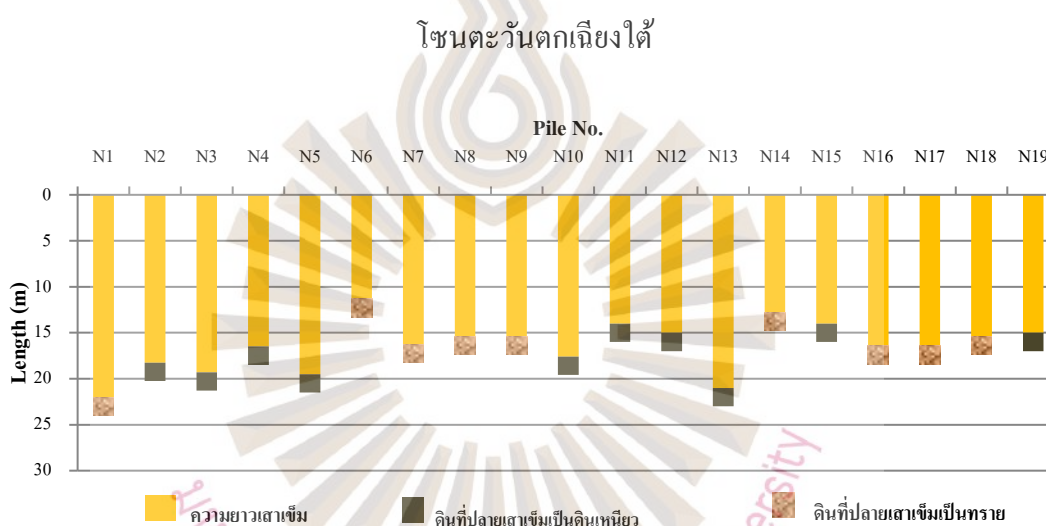
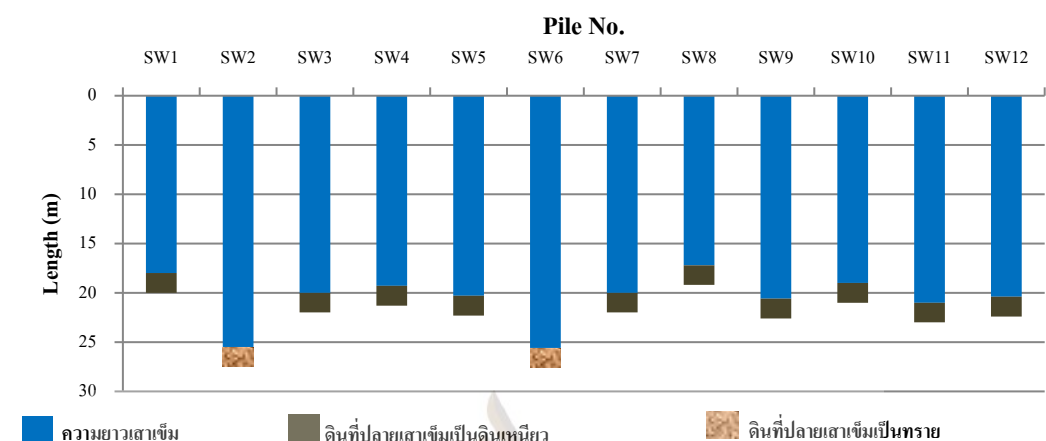
ผลการทดสอบเสาเข็มจะประกอบด้วยค่ากำลังรับน้ำหนักโดยรวม (Q) กำลังในส่วนของแรงเสียดทานด้านข้าง (Q_s) และกำลังในส่วนของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_p)



โซนตะวันออกเฉียงใต้

รูปที่ 3.4 ความยาวของเสาเข็มและชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม

ที่มา : ผู้วิจัย ,2565



รูปที่ 3.4 ความยาวของเสาเข็มและชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม (ต่อ)

ที่มา : ผู้วิจัย ,2565

3.2.2 โปรแกรมการทดสอบเสาเข็ม

การศึกษานี้ใช้การทดสอบกำลังของเสาเข็มใช้การทดสอบแบบ Dynamic Pile Load เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ทันทีหลังตอกเสาเข็มเสร็จ นอกจากนี้การทดสอบแบบ Dynamic Pile Load ยังมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในศึกษานี้ได้ทำการวัดผลตอบสนองของแรงในหน้าตัดเสาเข็มกับความเร็วอนุภาคของหัวเสาเข็มจากการตอกเสาเข็มโดยใช้ Strain Transducer และ Accelerometer ตามลำดับ การวัดกระทำโดยใช้เครื่อง Pile Driving Analyzer ของบริษัท Dynamic

Pile, Inc. โดยกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสามารถวิเคราะห์จากผลตอบสนองนี้ โดยใช้ทฤษฎีคลื่น หน่วยแรงการคำนวณกำลังของเสาเข็มได้จากการทำ Signal Matching ด้วยโปรแกรม Case Pile Wave Analysis (CAPWAP®) โดยผลที่ได้ประกอบด้วยค่ากำลังรับน้ำหนักโดยรวม (Q) กำลังในส่วนองแรงเสียดทานด้านข้าง (Q_s) และกำลังในส่วนองแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_b)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

- 1) ตอกเสาเข็มท่อนล่าง พร้อมทั้งติดตั้ง Strain Transducer และ Accelerometer บนหัวเสาเข็มท่อนบนด้วยการเจาะยึดกับเสาเข็มด้วย Expansion bolt ดังแสดงในรูปที่ 3.5
- 2) เมื่อตอกเสาเข็มท่อนล่างจมลงในดินเกือบสุด ทำการเชื่อมต่อเสาเข็มท่อนบนกับท่อนล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.6
- 3) ตอกเสาเข็มที่ต่อแล้วจนเหลือโผล่พื้นดินประมาณ 2-3 เมตร ทำการต่อเชื่อม Strain Transducer และ Accelerometer กับเครื่อง Pile Driving Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.7
- 4) ทำการทดสอบกำลังของเสาเข็มขณะตอก (Initial Driving)
- 5) เมื่อตอกเสาเข็มได้ระดับที่ต้องการทำการวัดกำลังที่จุดสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (End of Driving, EOD) ดังแสดงในรูปที่ 3.8
- 6) ทำการทดสอบกำลังแบบ Restrike ที่เวลา 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง, 1 วัน, และ 14 วัน หลังการตอกเสาเข็ม



รูปที่ 3.5 การติดตั้ง Strain Transducer และ Accelerometer บนหัวเสาเข็ม

ที่มา : ผู้วิจัย ,2565



รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อเสาเข็ม
ที่มา : ผู้วิจัย ,2565



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อ Transducer กับเครื่อง Pile Driving Analyzer
ที่มา : ผู้วิจัย ,2565



รูปที่ 3.8 การทดสอบกำลังของเสาเข็มแบบพลศาสตร์
ที่มา : ผู้วิจัย ,2565

3.3 การศึกษาลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มกับเวลา

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลาของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพมหานครมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอกการิทึมของเวลาตามที่เสนอโดย Skov and Denver (1988) หรือเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งหงายเมื่อพล็อตกับลอกการิทึมของเวลาตามที่เสนอตามที่เสนอโดย Svinkin (1996) ในการศึกษาการตรวจสอบความสัมพันธ์ของทั้งกำลังรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม กับเวลา โดยใช้ค่ากำลังที่ 1 นาติเป็นมาตรฐาน แทนที่จะใช้กำลังที่หลังจากสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (EOD) เพื่อหลีกเลี่ยงการสมมุติเวลาที่จุดสิ้นสุดการตอกเสาเข็มในการพล็อตลอกการิทึมของเวลา ซึ่งเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ไม่ได้ รายละเอียดของการศึกษาแต่ละส่วนมีดังนี้

3.3.1 กรณีที่กำหนดให้กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอกการิทึมของเวลา

การศึกษาส่วนนี้ใช้สมการที่เสนอแนะโดย Skov and Denver (1988) เป็นฐาน ซึ่งกำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอกการิทึมของเวลา ดังแสดงในสมการที่ 3-1 ดังที่กล่าวข้างต้นในการศึกษานี้ใช้ค่าเวลามาตรฐาน t_0 เท่ากับ 1 นาติ สมการที่ 2-1 สามารถปรับรูปให้เป็นดังนี้

$$\frac{Q}{Q_1} - 1 = A \log_{10}(t) \quad (3-1)$$

- เมื่อ Q คือกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เวลา t
 Q_1 คือกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เวลา 1 นาที่หลังจากการตอก
 A คือค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นต่อรอบลอกการตีหมักของเวลา
 t คือเวลาหน่วยเป็นนาที่

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่า $(Q/Q_1 - 1)$ เป็นตัวแปรตาม (Dependence Variable) และ $\log_{10}(t)$ เป็นตัวแปรอิสระ (Independence Variable) โดยกำหนดให้เส้นความสัมพันธ์ผ่านจุดพิกัด (0,0) ค่าพารามิเตอร์ A ได้จากค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์

วิธีที่กล่าวข้างต้นได้ใช้กับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักจากแรงเสียดทานด้านข้าง Q_s (Shaft Friction) และกำลังรับน้ำหนักจากแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม Q_b (End bearing) กับเวลาด้วยเช่นกัน

3.3.2 กรณีที่กำหนดให้กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งหงายกับลอกการตีหมักของเวลา

การศึกษานี้ใช้สมการที่มีรูปคล้ายกับสมการที่ 3-2 ที่เสนอแนะโดย Svinkin (1996) เป็นฐาน โดยกำลังของเสาเข็ม Q ที่เวลา t ใดๆ เทียบกับกำลังของเสาเข็มที่ 1 นาที่หลังจากตอก Q_1 สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{Q}{Q_1} = t^m \quad (3-2)$$

หรือ

$$\log_{10}\left(\frac{Q}{Q_1}\right) = m \log_{10}(t) \quad (3-3)$$

- เมื่อ m คือค่าพารามิเตอร์
 t คือเวลาหน่วยเป็นนาที่

การหาค่าพารามิเตอร์ m สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่า $\log_{10}(Q/Q_1)$ เป็นตัวแปรตาม (Dependence Variable) และ $\log_{10}(t)$ เป็นตัวแปรอิสระ (Independence Variable) โดยกำหนดให้เส้นความสัมพันธ์ผ่านจุดพิกัด (0,0) ค่าพารามิเตอร์ m ได้จากค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์

เช่นเดียวกัน วิธีที่กล่าวข้างต้นได้ใช้กับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักจากแรงเสียดทานด้านข้าง Q_s (Shaft Friction) และกำลังรับน้ำหนักจากแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม Q_b (End bearing) กับเวลาด้วยเช่นกัน

3.3.2 การคัดเลือกสมการที่ใช้คำนวณการเพิ่มของกำลังของเสาเข็มตามเวลา

เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการที่ 3-1 และ 3-2 ในการคำนวณการเพิ่มขึ้นของกำลังของ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination) หรือ R-squared ของทั้งสองสมการได้ถูกแจกแจงความถี่ และทำการวิเคราะห์ว่าสมการใดมีค่า R-squared โดยรวมสูงกว่า

3.4 การทำนายกำลังของเสาเข็มในระยะยาวจากผลการทดสอบในระยะสั้น

การทำนายกำลังที่ระยะยาวของเสาเข็มจากผลการทดสอบเสาเข็มที่ระยะสั้นนอกจากการใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับเวลาที่ได้จากการศึกษาข้างต้นแล้ว กำลังระยะยาวยังสามารถคำนวณจากค่าสถิติของอัตราส่วนของกำลังที่ระยะยาวต่อกำลังที่ระยะสั้นโดยตรง ตัวอย่างเช่น กำลังของเสาเข็มที่ 14 สามารถคำนวณจากการทดสอบกำลังที่เวลาใดเวลาหนึ่งก่อนหน้า 14 วัน หากมีข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนของกำลังที่ 14 วันต่อกำลังที่เวลานั้นๆ

การศึกษานี้ได้ทำการคำนวณอัตราส่วนของกำลังที่ 14 วัน ต่อกำลังที่หลังจากสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (EOD) 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง และ 1 วันหลังจากตอก และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าอัตราส่วนที่ค่าความเชื่อมั่นต่างๆ โดยใช้ T-distribution ในการวิเคราะห์ใช้ความน่าจะเป็น

3.5 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา

เพื่อศึกษาว่ามีตัวแปรใดบ้างที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา ใน การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังเสาเข็ม โดย ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย

3.5.1 กำลังของเสาเข็ม โดยศึกษาว่ากำลังของเสาเข็มมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ กำลังของเสาเข็มหรือไม่

3.5.2 ความยาวของเสาเข็ม โดยศึกษาว่าความยาวของเสาเข็มมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้น ของกำลังของเสาเข็มหรือไม่

3.5.3 ชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม โดยวิเคราะห์ว่าเสาเข็มที่นํ้าบนชั้นทรายมีการเพิ่มขึ้นของ กำลังแตกต่างจากเสาเข็มที่นํ้าบนชั้นดินเหนียวหรือไม่

3.5.4 โซนพื้นที่ โดยวิเคราะห์ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มแต่ละโซนมีลักษณะที่ แตกต่างกันหรือไม่



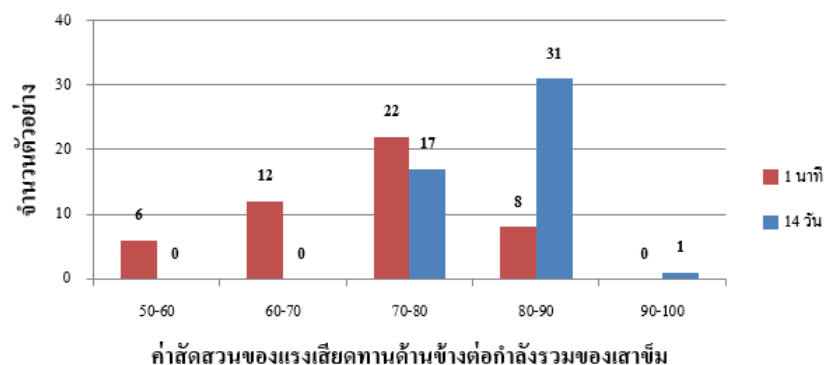
บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็ม

ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ สำหรับโซนตะวันออกเฉียงใต้ (SE) โซน ตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และโซนเหนือ (N) สรุปในตารางที่ 4.1 ,4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ในตารางมีค่า กำลังรวม (Total capacity, Q) ค่าแรงเสียดทานด้านข้าง (Shaft Friction, Q_s) และ ค่าแรงต้านทานที่ ปลายเสาเข็ม (End Bearing, Q_b) นอกจากนี้ในตารางยังแสดงความยาวของเสาเข็ม และชนิดของดิน ที่ปลายเสาเข็ม จะเห็นว่ามีเสาเข็มบางต้นไม่สามารถทดสอบได้ครบตามเวลาที่กำหนดเนื่องจากมี ข้อจำกัดของแผนงานก่อสร้าง เสาเข็มบางต้นมีการทดสอบกำลังที่ 22 วัน และบางต้นทดสอบที่ 29 วัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าแรงเสียดทานด้านข้างต่อ ค่ากำลังรับน้ำหนักรวม ที่ 1 นาติหลังจากตอกเสาเข็มเสร็จเปรียบเทียบกับที่ 14 วัน จะเห็นว่า สัดส่วนของแรงเสียดทานที่ 1 นาติ มีค่าอยู่ในช่วง ประมาณ 50 – 88 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนัก รวม โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 70-80 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเวลาผ่านไป 14 สัดส่วนของแรงเสียดทานมี ปรับสูงเป็น ประมาณ 70 – 90 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 80-90 เปอร์เซ็นต์ ผล การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างเพิ่มขึ้นตามเวลา



รูปที่ 4.1 การแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์แรงเสียดทานด้านข้างต่อกำลังรวมของเสาเข็ม ที่เวลาตอกเสาเข็มเสร็จ (EOD) และที่เวลา 14 วันหลังตอก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่าง ๆ ของโซนตะวันออกเฉียงใต้ (SE)

หมายเลขเสาเข็ม	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10	SE11	SE12	SE13	SE14	SE15	SE16	SE17	SE18	SE19
ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	CL	S	CH	CH	S	S	CH	S	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	S	CH	CH	CH
ความยาว (ม.)	19.4	18.5	18.4	20.4	24.3	19.6	25	19.6	25.6	21	22	25	19.5	21	19	23.5	17.5	25	25.5
เวลา	กำลังรวม (Total Capacity) - kN																		
EOD	189	227	120	284	193	327	100	280	427	311	192	58	210	246	236	471	205	513	97
1 นาที	198	246	123		275	345	108	292	461	337	201	101	233	252	251	486	209	556	128
10 นาที	223	288	147	315	337	370	149	380	546	387	251	145	261	303	265	537	228	624	177
2 ชั่วโมง	337	379	185	419	480	491	240	451	720	444	321	272	364	503	342	728	304	826	278
1 วัน	473	459	254	531	596	557	411	565	886	605	448	368	446	665	497	965	384	945	374
14 วัน	664		553	773	900		586	804		814	571	468	538	996	652	1,140	508	1,110	445
22 วัน		756																	
29 วัน																			
เวลา	แรงเสียดทานด้านข้าง (Shaft Friction) - kN																		
EOD	111	183	78	194	153	241	65	196	308	244	97	41	115	170	170	359	174	407	82
1 นาที	118	201	79		229	255	70	205	340	269	101	77	131	175	174	372	176	433	103
10 นาที	134	241	88	208	282	267	107	271	423	315	145	112	152	218	184	413	181	470	129
2 ชั่วโมง	247	284	123	298	409	372	190	274	592	362	202	193	250	414	229	597	245	657	213
1 วัน	378	350	189	400	506	437	342	423	750	505	307	283	323	561	369	822	305	766	277
14 วัน	550		421	634	800		494	629		681	424	373	409	876	517	992	393	926	359
22 วัน		638																	
29 วัน																			
เวลา	แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Shaft Friction) - kN																		
EOD	78	43	41	90	40	85	35	83	119	67	95	17	95	77	67	112	31	106	15
1 นาที	80	45	43		46	90	38	87	121	69	100	24	102	77	77	114	33	124	25
10 นาที	88	47	59	107	56	103	42	109	124	72	106	33	109	85	80	124	47	154	47
2 ชั่วโมง	90	95	63	121	71	119	50	178	129	82	119	78	114	89	114	130	59	169	64
1 วัน	95	109	65	130	90	121	69	142	135	100	141	85	124	104	129	143	78	179	97
14 วัน	114		133	139	99		91	176		133	147	95	129	120	135	149	115	184	89
22 วัน		119																	
29 วัน																			

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่าง ๆ ของโซนตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

หมายเลขเสาเข็ม	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10	SW11
ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	CH	S	CH	CH	CH	S	CL	CH	CH	CH	CL
ความยาว (m)	18	25.5	20	19.3	20.3	25.6	20	17.2	20.6	19	20.4
เวลา	กำลังรวม (Total Capacity) - kN										
EOD	300	204	225	194	284	353	254	240	263	203	175
1 นาที	333	234	266	214	336	354	281	299	267	224	182
10 นาที	369	299	295	234	389	426	310	343	318	244	198
2 ชั่วโมง	515	430	392	276	533	607	383	431	393	396	280
1 วัน	729	601	497	361	685	808		535	521	428	379
14 วัน	991	855	690	564	938	869	735	701	741		524
22 วัน											
29 วัน											
เวลา	แรงเสียดทานด้านข้าง (Shaft Friction) - kN										
EOD	151	140	153	131	194	296	164	161	136	143	118
1 นาที	176	168	182	149	241	297	185	214	138	157	124
10 นาที	205	224	205	168	293	340	215	252	187	165	131
2 ชั่วโมง	337	341	290	207	433	503	283	336	253	277	208
1 วัน	546	506	393	291	571	695		438	375	307	298
14 วัน	802	749	581	492	804	737	605	593	590		439
22 วัน											
29 วัน											
เวลา	แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Shaft Friction) - kN										
EOD	149	64	72	63	90	57	90	79	127	60	57
1 นาที	157	67	83	65	95	57	95	85	129	67	59
10 นาที	164	76	90	67	96	85	95	91	130	79	67
2 ชั่วโมง	178	88	102	69	100	104	100	95	140	120	72
1 วัน	182	95	104	70	114	114		97	146	130	80
14 วัน	188	106	109	72	133	132	129	109	151		85
22 วัน											
29 วัน											

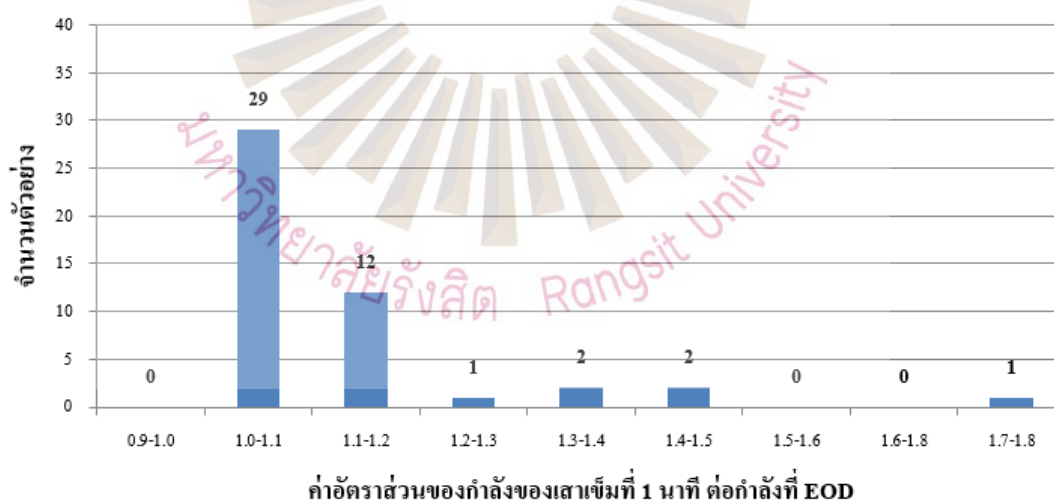
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่าง ๆ ของโซนเหนือ (N)

หมายเลขเสาเข็ม	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19
ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	S	CH	CL	CH	CH	S	S	S	S	CH	CL	CH	CH	S	CL	S	S	S	CH
ความยาว (m)	22	18.25	19.3	16.5	19.5	11.3	16.25	15.4	15.4	17.6	14	15	21	12.8	14	16.4	16.4	15.4	15
เวลา	กำลังรวม (Total Capacity) - kN																		
EOD	109	294	426	558	341	239	327	219	205	229	198	274	398	565	263	300	205	326	214
1 นาที	153	300	475	575	353	271	358	258	273	238	211	290	426	606	300	319	233	349	232
10 นาที	165	337	572	603	411	301	394	296	295	259	254	311	505	639	339	330	273	414	268
2 ชั่วโมง	245	437	644	637	528	356	512	414	384	357	339	371	610	696	396	403	351	488	355
1 วัน	301	529	837	696	615	380	640	542	507	501	428	433	805	766	496	511	451	619	477
14 วัน	508		900	890	759	674	705		891		465	476	937	914	668	760	569		545
22 วัน								773											
29 วัน										630									
เวลา	แรงเสียดทานด้านข้าง (Shaft Friction) - kN																		
EOD	77	232	292	389	284	168	285	120	125	172	136	207	327	416	196	217	155	241	138
1 นาที	121	236	333	402	293	195	316	153	189	177	144	222	345	447	220	232	184	261	154
10 นาที	131	252	410	428	344	216	369	182	207	187	179	239	409	477	240	238	204	322	187
2 ชั่วโมง	191	341	468	460	449	251	464	290	288	279	254	271	491	532	289	308	279	379	262
1 วัน	239	422	642	515	520	261	584	395	406	387	337	319	646	594	388	414	373	505	385
14 วัน	425		766	697	648	537	638		781		370	358	773	739	516	653	488		450
22 วัน								618											
29 วัน										506									
เวลา	แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Shaft Friction) - kN																		
EOD	31	62	133	169	57	72	41	99	80	57	62	67	72	149	67	83	50	84	76
1 นาที	32	64	142	173	60	76	42	105	83	62	67	69	80	159	80	86	57	88	78
10 นาที	33	85	162	176	67	85	43	114	88	72	76	72	96	162	100	90	69	92	80
2 ชั่วโมง	54	95	176	177	78	105	48	124	95	78	85	100	119	164	107	95	73	109	83
1 วัน	62	107	195	181	95	119	57	147	101	114	90	114	159	172	108	97	78	114	92
14 วัน	83		0	187	109	137	68		120		95	118	164	176	152	107	81		95
22 วัน								155											
29 วัน										124									

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในการศึกษานี้ใช้ค่ากำลังที่ 1 นาฬิกาเป็นมาตรฐาน แทนที่จะใช้กำลังที่หลังจากสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (EOD) เพื่อหลีกเลี่ยงการสมมุติเวลาที่จุดสิ้นสุดการตอกเสาเข็มในการพล็อตลอการิทึมของเวลา ซึ่งเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ไม่ได้ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ 1 นาฬิกา กับกำลังที่ EOD ได้ถูกศึกษาและสรุปเป็นค่าสถิติในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลังที่ 1 นาฬิกา กับกำลังที่ EOD ในตารางที่ 4.4 โดยของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน มีค่าเฉลี่ยที่ 1.12 โดยมีค่าสูงสุดที่ 1.75 และต่ำสุดที่ 1.0 รูปที่ 4.2 แสดงกราฟแจกแจงความถี่ของค่าอัตราส่วน จะเห็นว่า เสาเข็มส่วนใหญ่มีค่าอัตราส่วนของกำลังที่ 1 นาฬิกา ต่อกำลังที่ EOD ในช่วง 1.0-1.1

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังที่ 1 นาฬิกา กับกำลังที่ EOD

ค่าเฉลี่ย	1.12
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.14
ค่าสูงสุด	1.75
ค่าต่ำสุด	1.00



รูปที่ 4.2 กราฟแจกแจงความถี่ของค่าอัตราส่วนของกำลังที่ 1 นาฬิกา ต่อกำลังที่ EOD

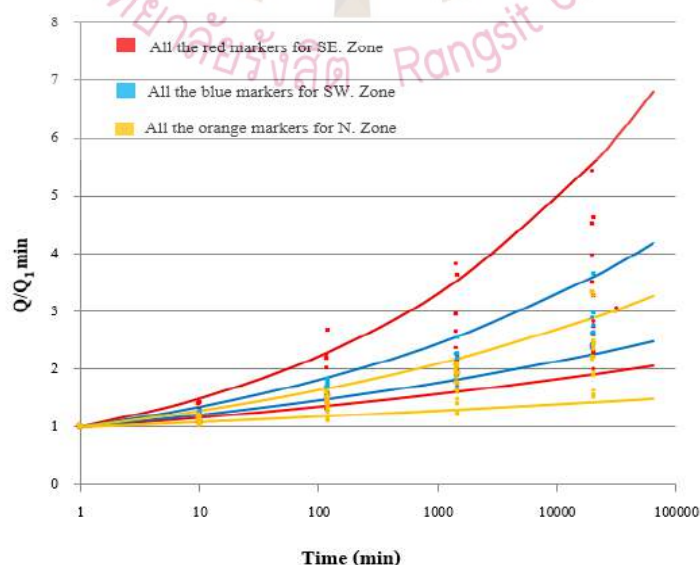
4.2 ภาพรวมของการเพิ่มขึ้นของกำลังเสาะเข็มกับเวลา

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ เทียบกับกำลังที่ 1 นาที่ แสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 โดยรูปที่ 4.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังรวม Q ต่อกำลังรวมที่ 1 นาที่ Q_1 กับเวลา รูปที่ 4.4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้าง Q_s ต่อแรงเสียดทานด้านข้างที่ 1 นาที่ Q_{s1} กับเวลา และรูปที่ 4.5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม Q_b ต่อแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 1 นาที่ Q_{b1} กับเวลา

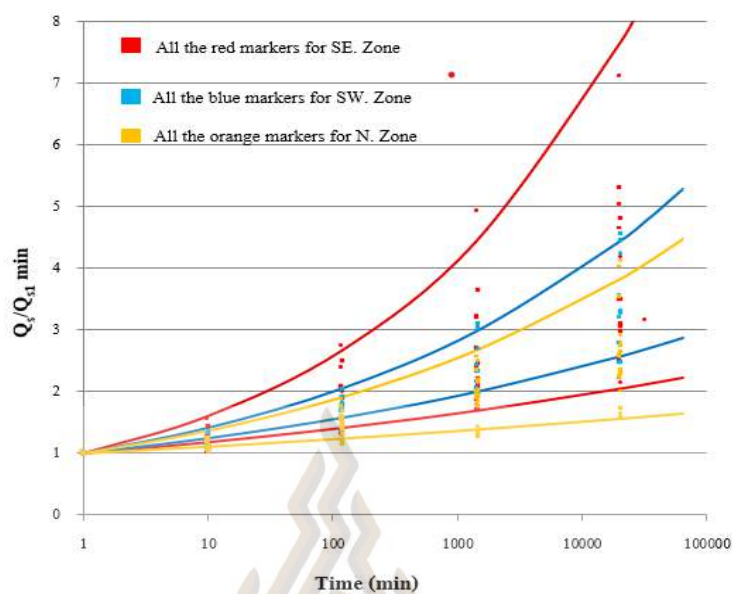
ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน กำลังของเสาเข็มรวมเพิ่มสูงขึ้นกว่ากำลังที่ 1 นาที่ในช่วงประมาณ 1.5 - 5.5 เท่าตัว แรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วันสูงกว่าที่ 1 นาที่ ประมาณ 1.6 - 7.1 เท่า และแรงต้านทานที่ 14 วันสูงกว่าที่ 1 นาที่ ประมาณ 1.1 - 4.0 ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลาจะมีขนาดค่อนข้างกระจัดกระจาย แต่พอจะสรุปเป็นแนวโน้มได้ดังนี้

1) การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้างมีขนาดสูงที่สุด ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมีขนาดต่ำที่สุด

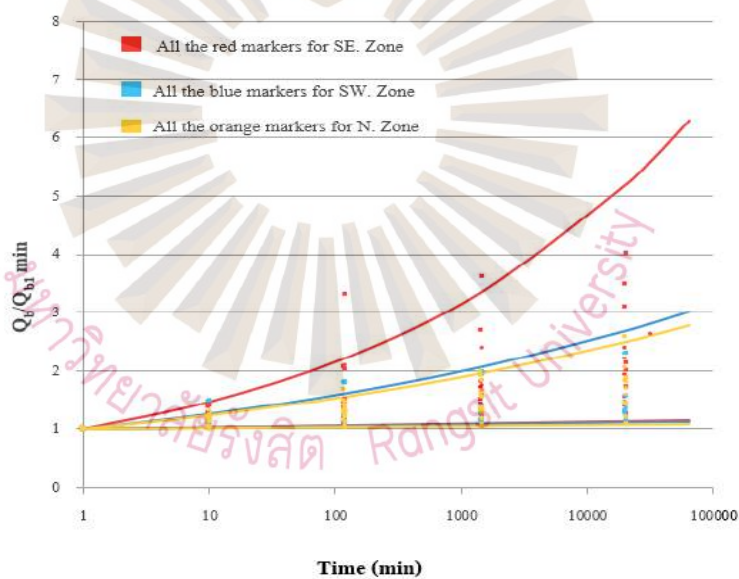
2) การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในโซนตะวันออกเฉียงเหนือมีขนาดสูงที่สุด ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในโซนเหนือมีขนาดต่ำที่สุด เป็นที่น่าสังเกตว่าโซนตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งอยู่ติดกับปากอ่าวไทยด้านจังหวัดสมุทรปราการมีชั้นดินอ่อนที่อ่อนที่สุด และมีความหนาของชั้นดินอ่อนสูงที่สุด ในขณะที่โซนเหนือซึ่งอยู่ห่างจากปากอ่าวไทยมีชั้นดินอ่อนที่บางที่สุดและมีกำลังของดินอ่อนสูงที่สุด



รูปที่ 4.3 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรวม Q กับเวลาของการทดสอบ



รูปที่ 4.4 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานด้านข้าง Q_s กับเวลาของการทดสอบ



รูปที่ 4.5 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม Q_b กับเวลาของการทดสอบ

4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา

ดังที่กล่าวแล้ว ในการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นฐานในการศึกษา ประกอบด้วย 1) สมการที่ 3-1 ที่เสนอโดย Skov และ Denver (1988) ซึ่งกำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับลอการิทึมของเวลา โดยมีพารามิเตอร์ A เป็นค่ากำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลา และ 2) สมการที่ 3-2 ที่มีลักษณะคล้ายกับเสนอโดย Svinkin (1996) ซึ่งกำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงโค้งงอกับลอการิทึมของเวลา โดยมีพารามิเตอร์ m เป็นค่ากำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลา

รายละเอียดการหาค่าพารามิเตอร์ A สำหรับสมการที่ 3-1 และ พารามิเตอร์ m สำหรับสมการที่ 3-2 มีดังนี้

4.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ A

ในการศึกษา พารามิเตอร์ A สำหรับการเพิ่มขึ้นของกำลังรวมของเสาเข็ม หากได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่า (Q/Q_{1-1}) เป็นตัวแปรตาม (Dependence Variable) โดย Q คือค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่เวลาใดๆ Q_1 คือค่ากำลังรวมที่ 1 นาที และใช้ค่า $\log_{10}(t)$ เป็นตัวแปรอิสระ (Independence Variable) โดยกำหนดให้เส้นความสัมพันธ์ผ่านจุดพิกัด $(0,0)$ ค่าพารามิเตอร์ A ได้จากค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์

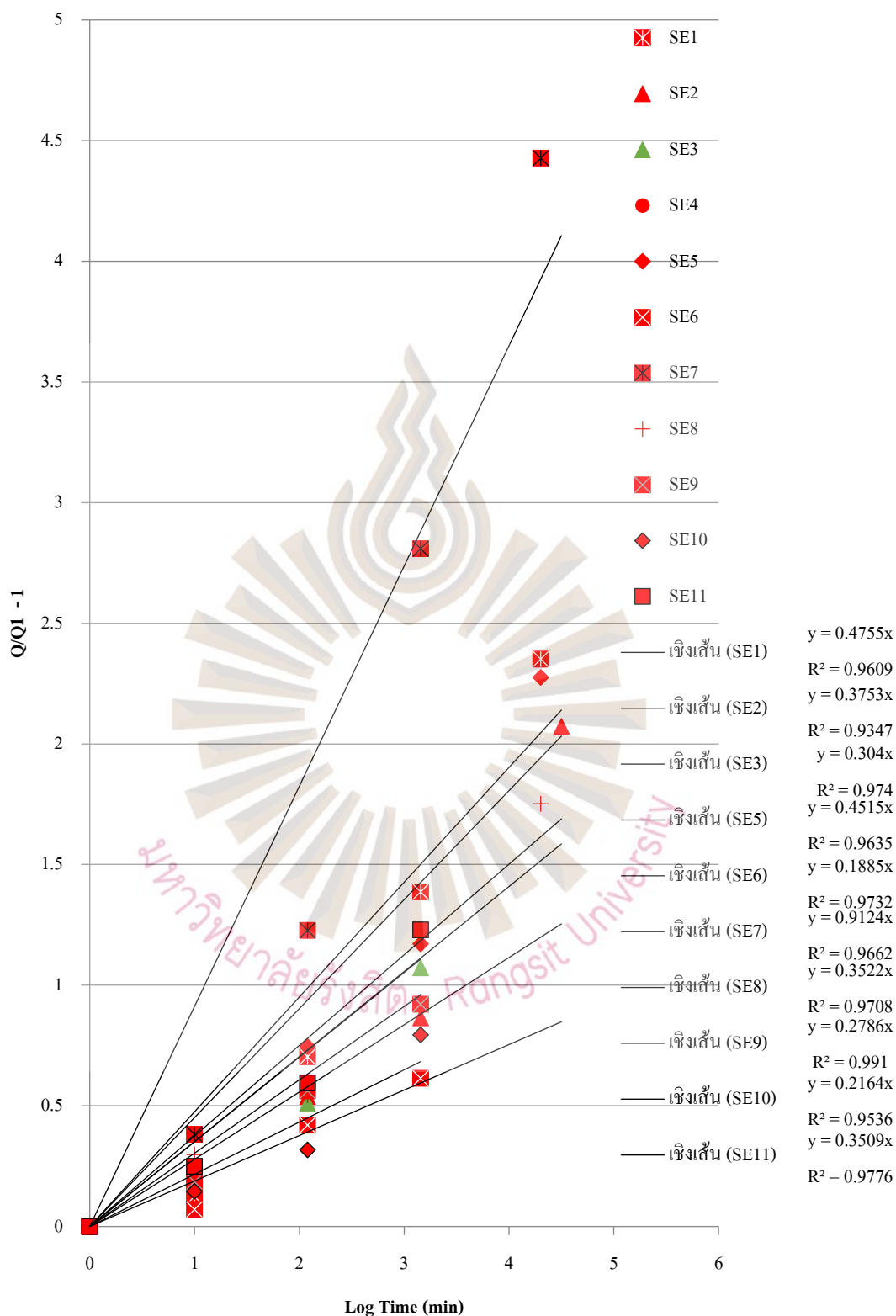
ในการหาค่าพารามิเตอร์ A_s สำหรับแรงเสียดทานด้านข้าง และ พารามิเตอร์ A_b สำหรับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มได้ใช้วิธีเดียวกับที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ A แต่ใช้ค่าแรงเสียดทานด้านข้าง (Q_s) และ แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) แทนค่ากำลังรวม (Q)

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.10, รูปที่ 4.11 ถึง 4.15 และ รูปที่ 4.16 ถึง 4.20 สำหรับ ค่ากำลังรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มตามลำดับ และตารางที่ 4.5 สรุปสถิติของค่าพารามิเตอร์ A , A_s และ A_b ที่ได้จากการวิเคราะห์ จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ A , A_s และ A_b มีค่า R-Squared เฉลี่ยสูงกว่า 0.9 ซึ่งแสดงว่า สมการที่ 3-1 สามารถใช้คำนวณค่า Q/Q_1 , Q_s/Q_{s1} และ Q_b/Q_{b1} ที่เวลาต่างๆ ได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ

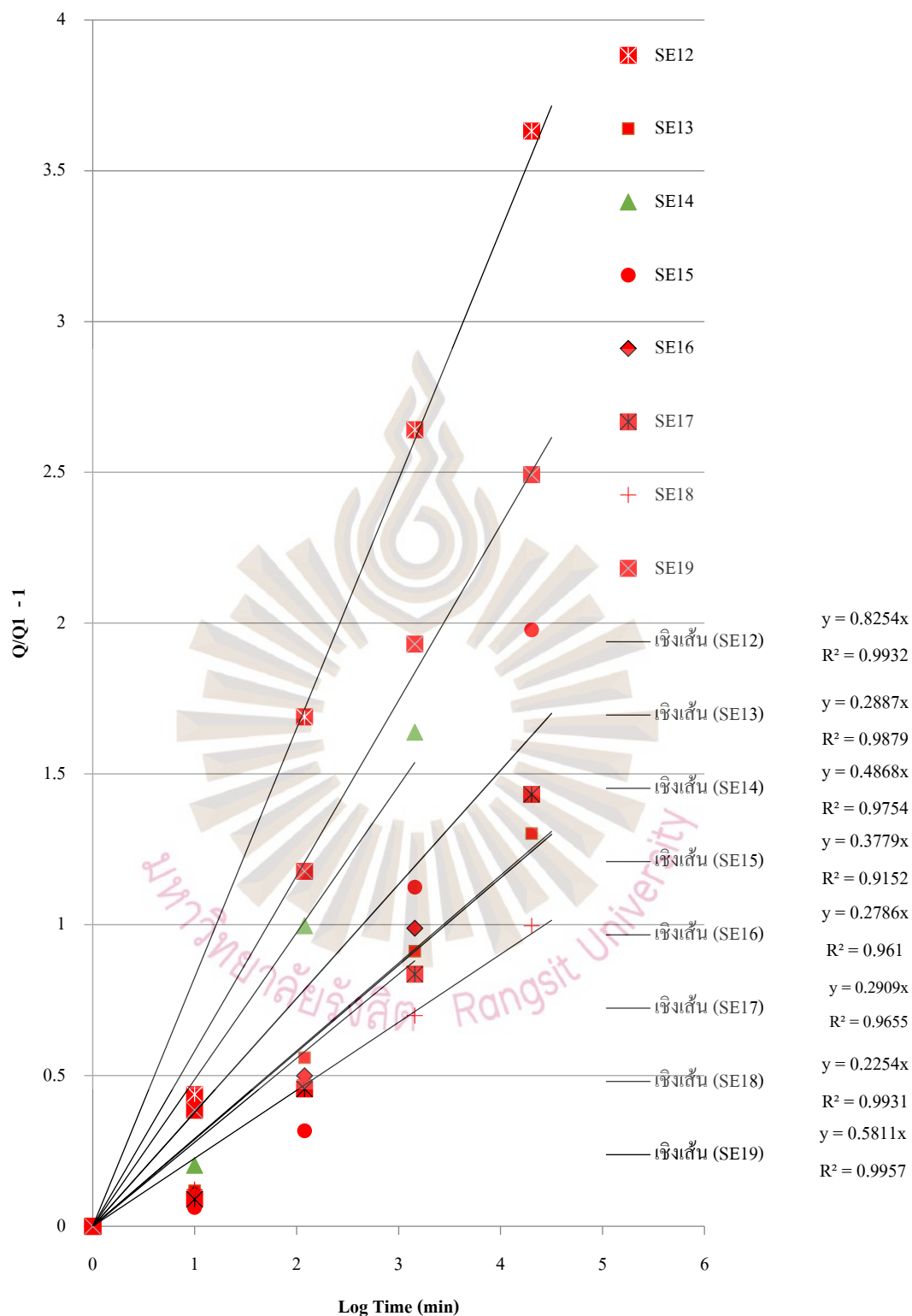
ภาคผนวก ก. แสดงกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q/Q_1 Q_s/Q_{s1} และ Q_b/Q_{b1} กับเวลาที่คำนวณจากสมการที่ 3-1 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของทุก

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปสถิติของค่าพารามิเตอร์ A A_s และ A_b

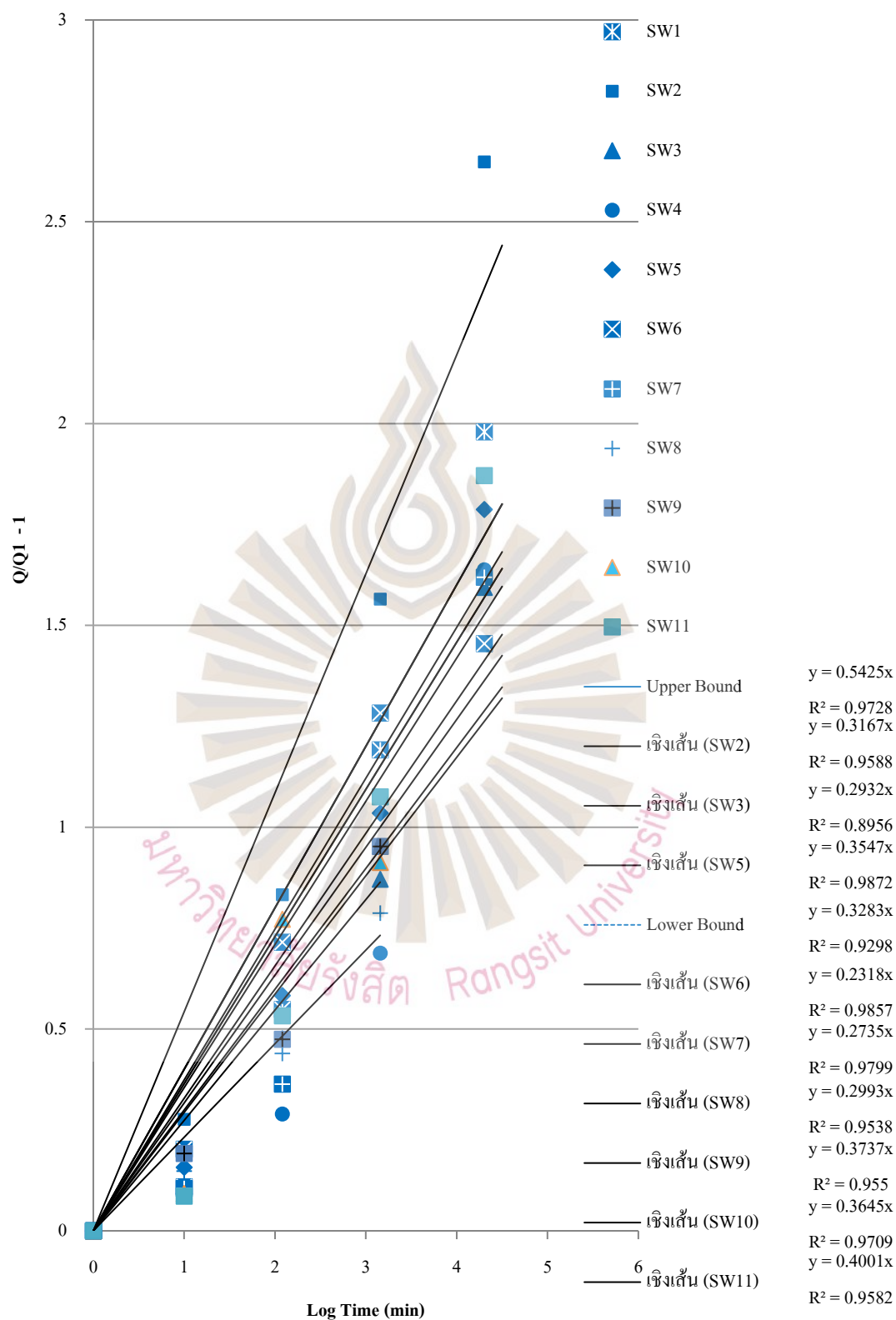
	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความเบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่าสัมประสิทธิ์ ของการ CV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
A	0.333	0.151	0.453	0.912	0.097
R^2	0.921			0.988	0.730
A_s	0.425	0.210	0.493	1.263	0.130
R^2	0.902			0.981	0.650
A_b	0.179	0.164	0.917	0.787	0.017
R^2	0.915			0.993	0.653



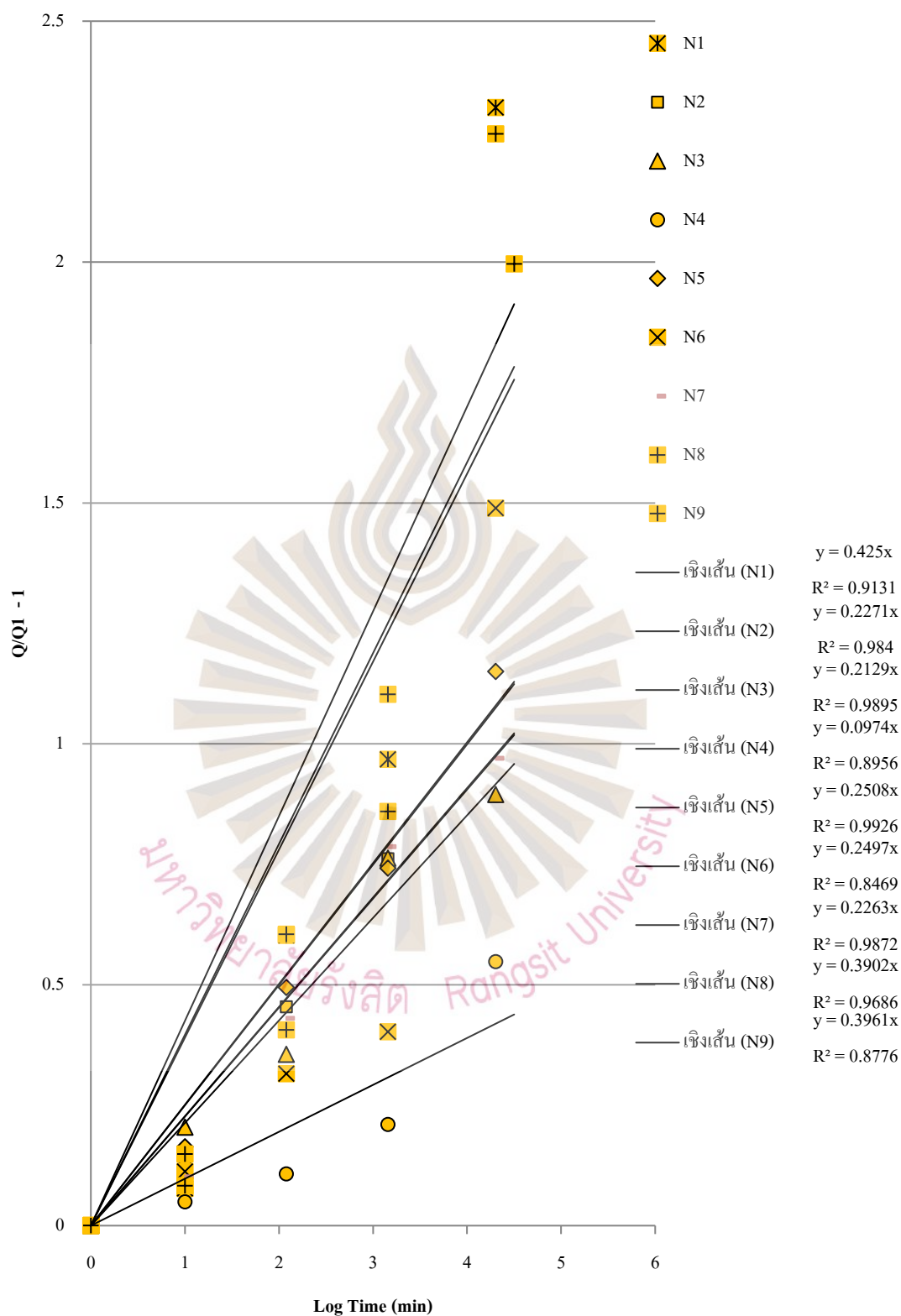
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ Log (t) ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



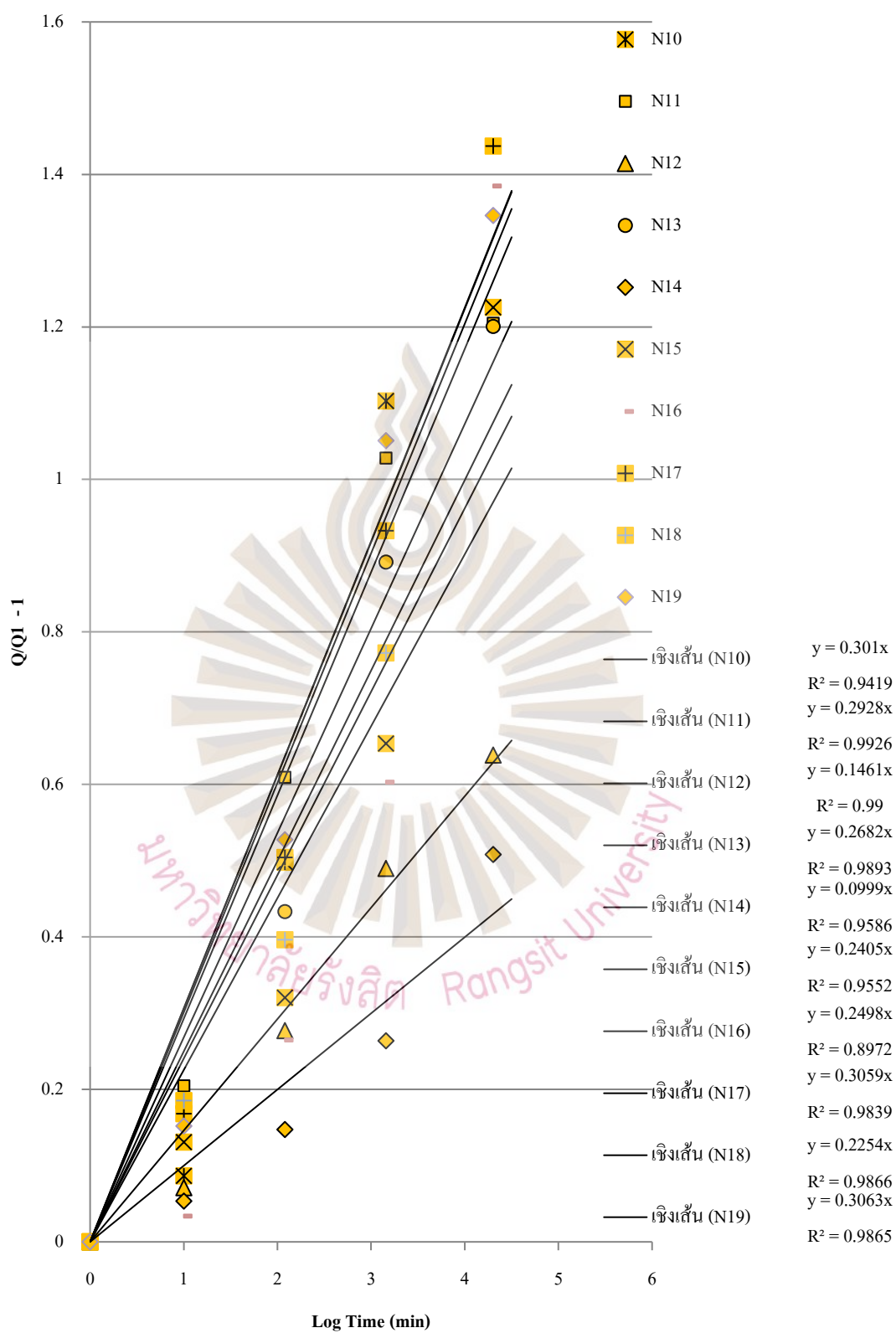
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



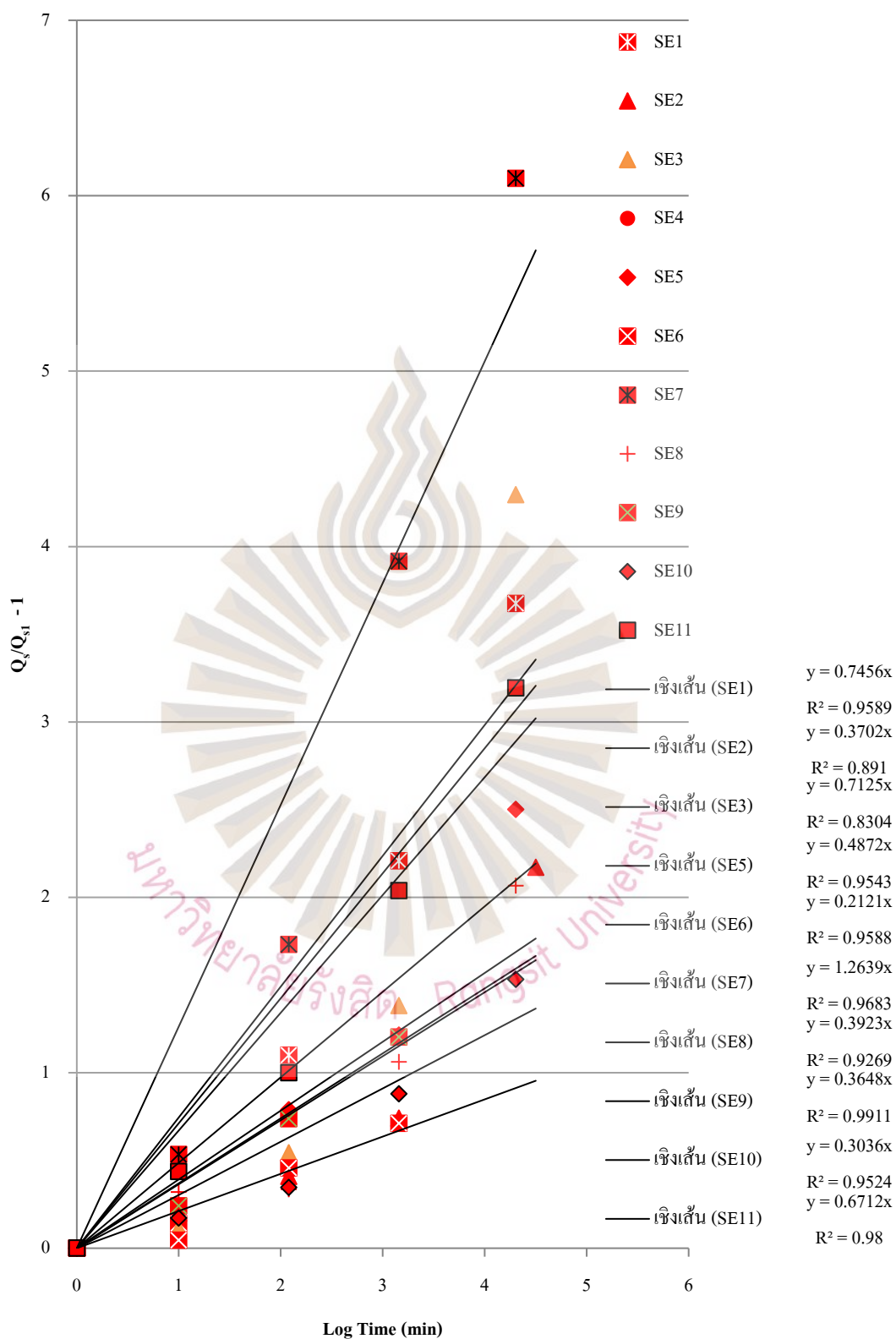
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนะวันตกเฉียงใต้



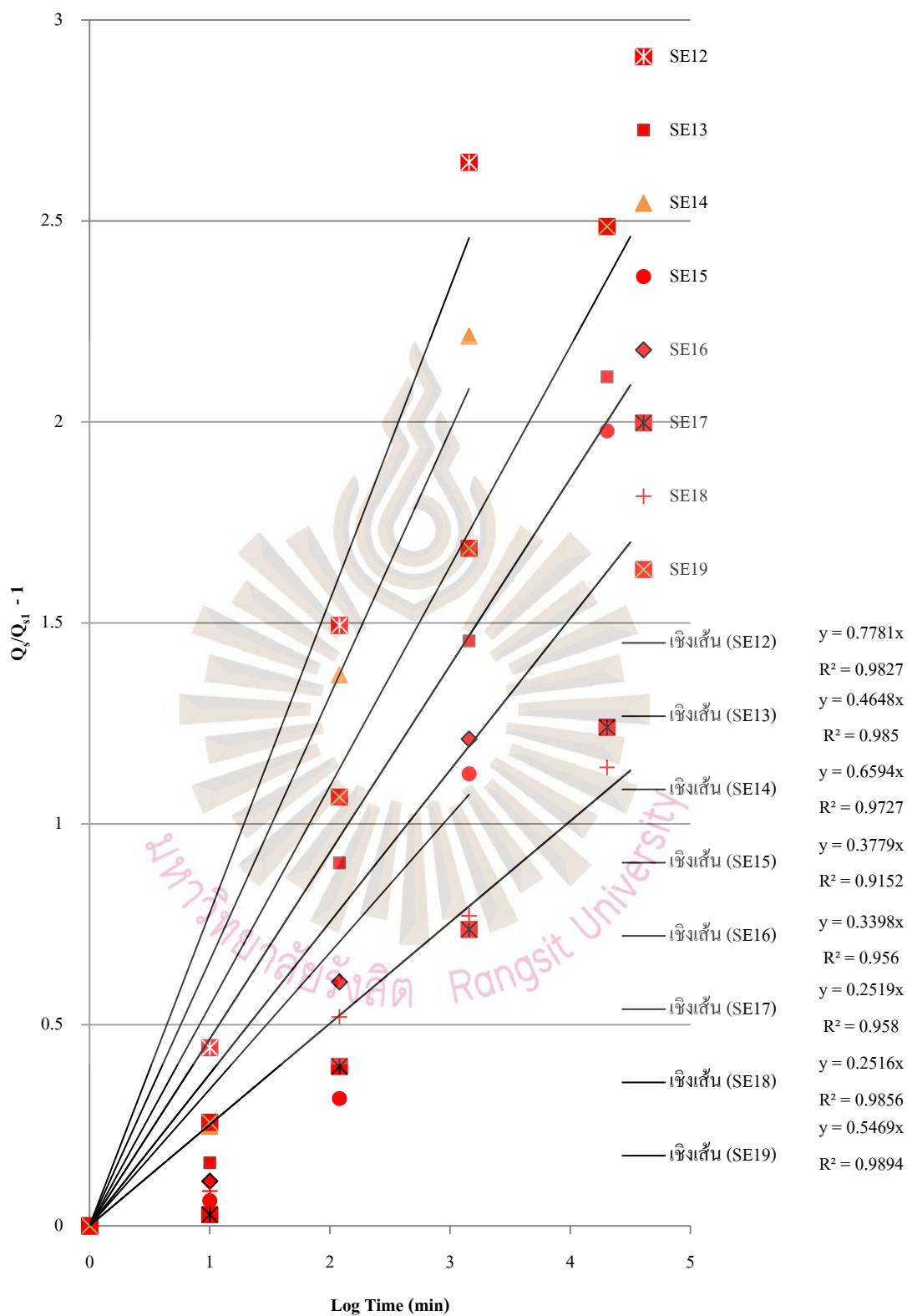
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



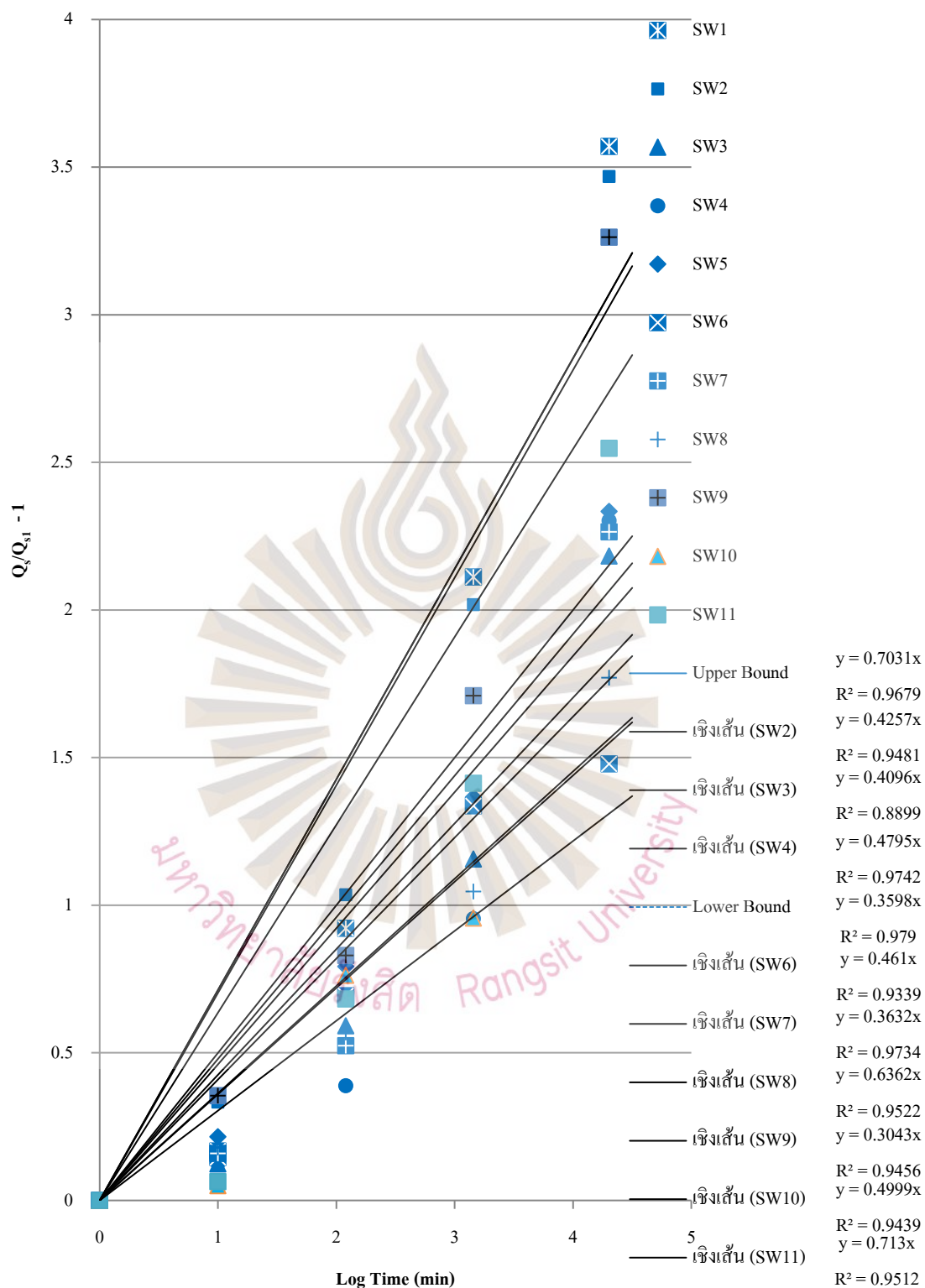
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q/Q_1 - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2



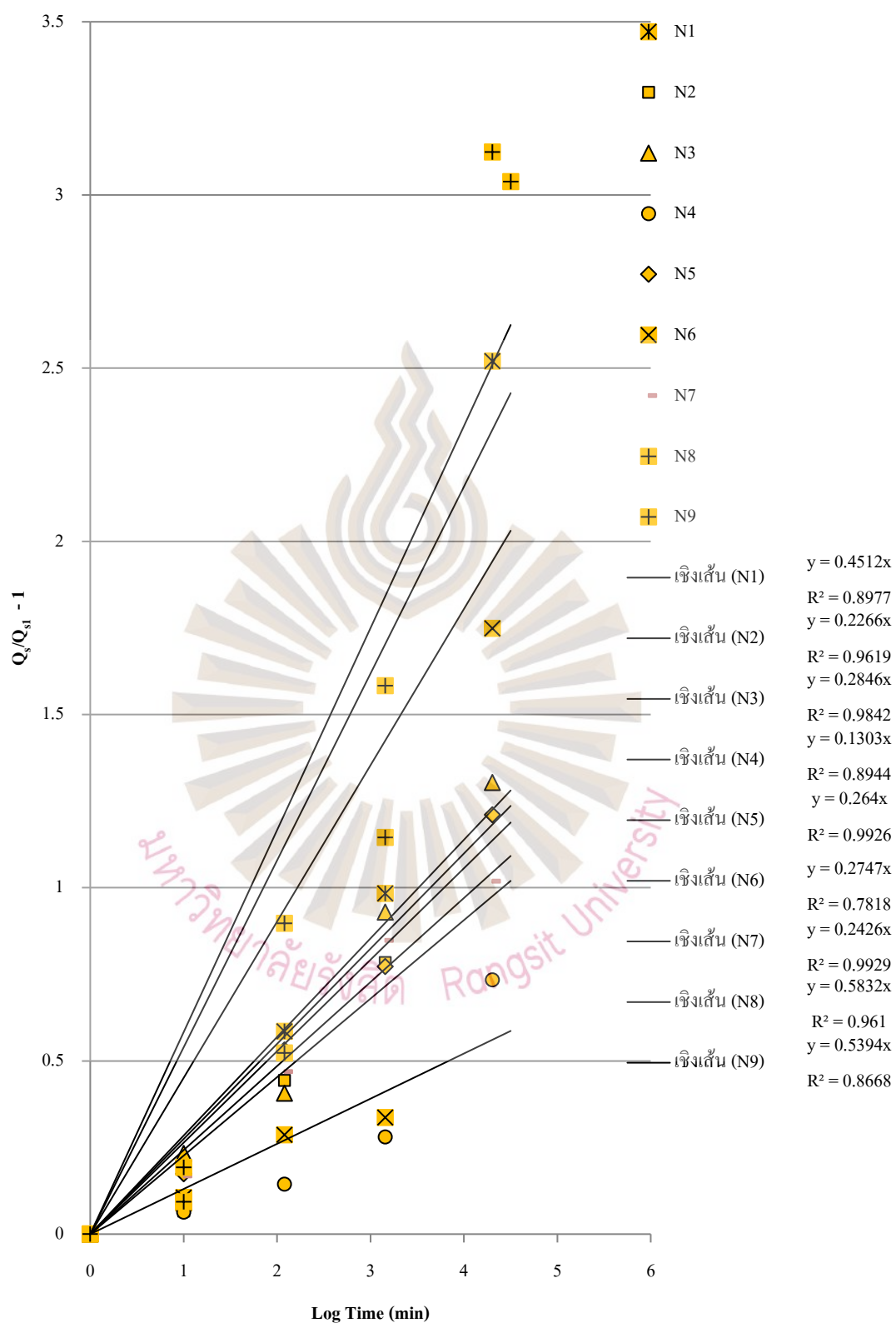
รูปที่ 4.11 ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ Log (t) ของแรงเสียดทาน
ด้านข้างของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



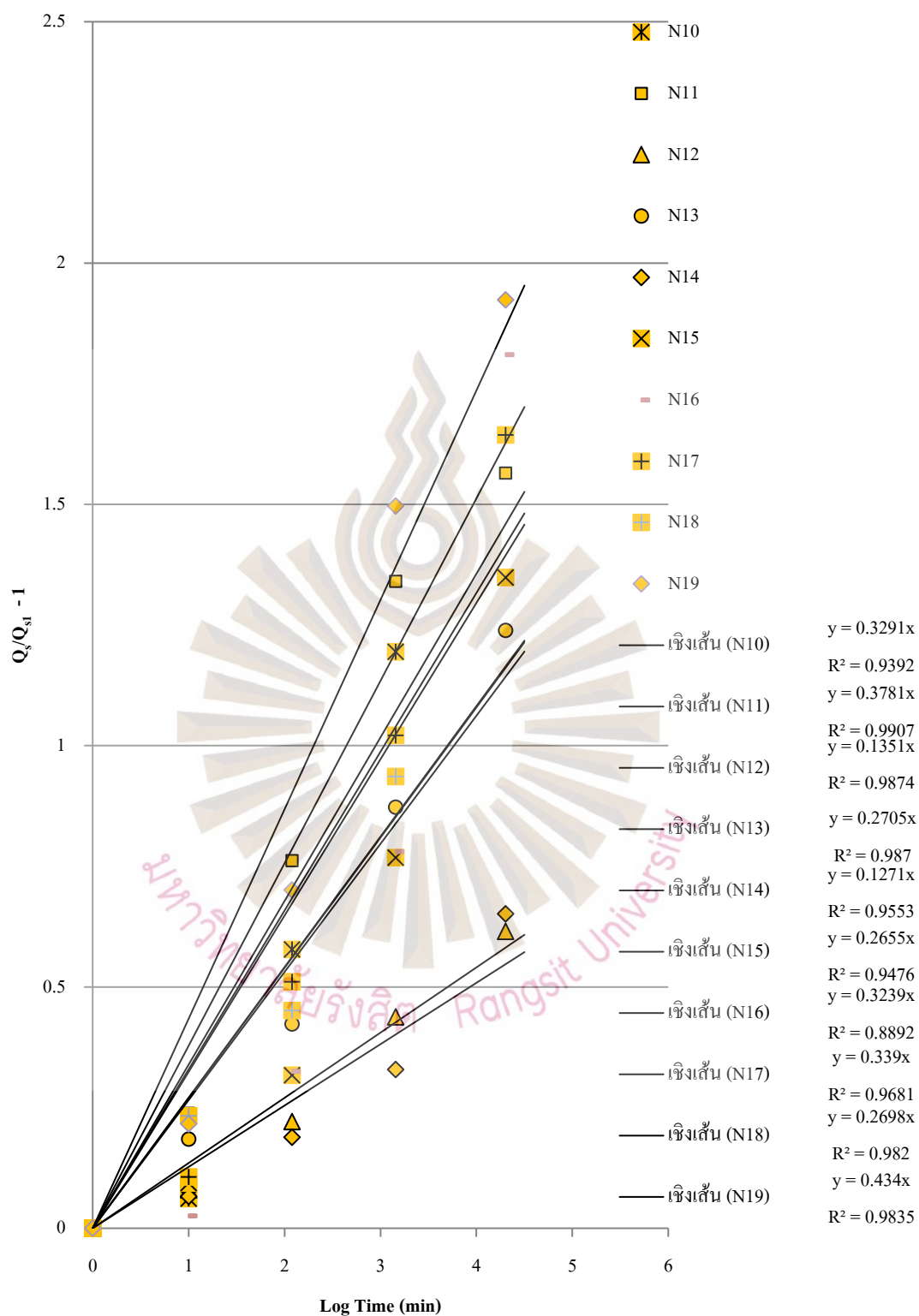
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ Log (t) ของแรงเสียดทาน
ด้านข้างของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



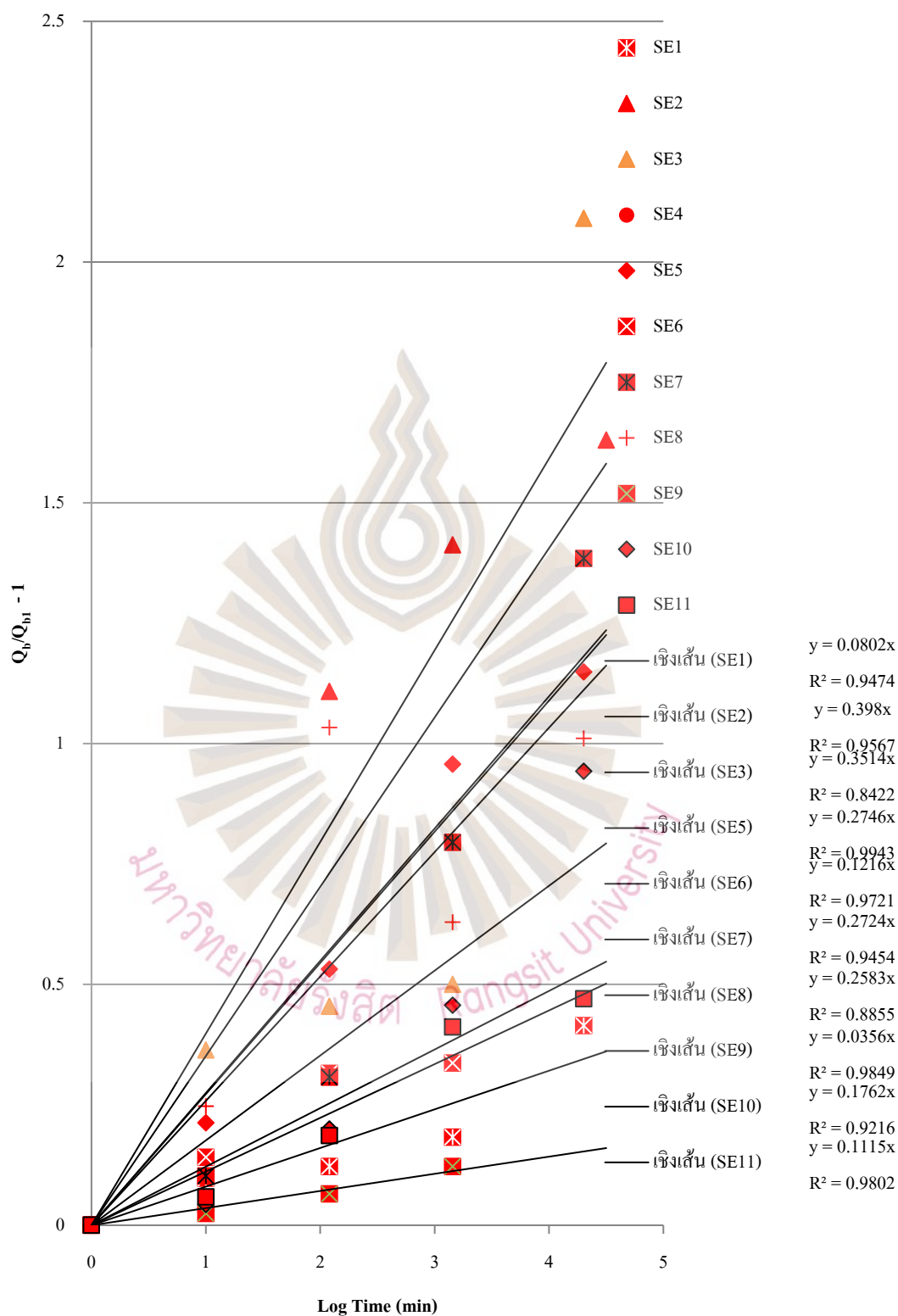
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ Log (t) ของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้



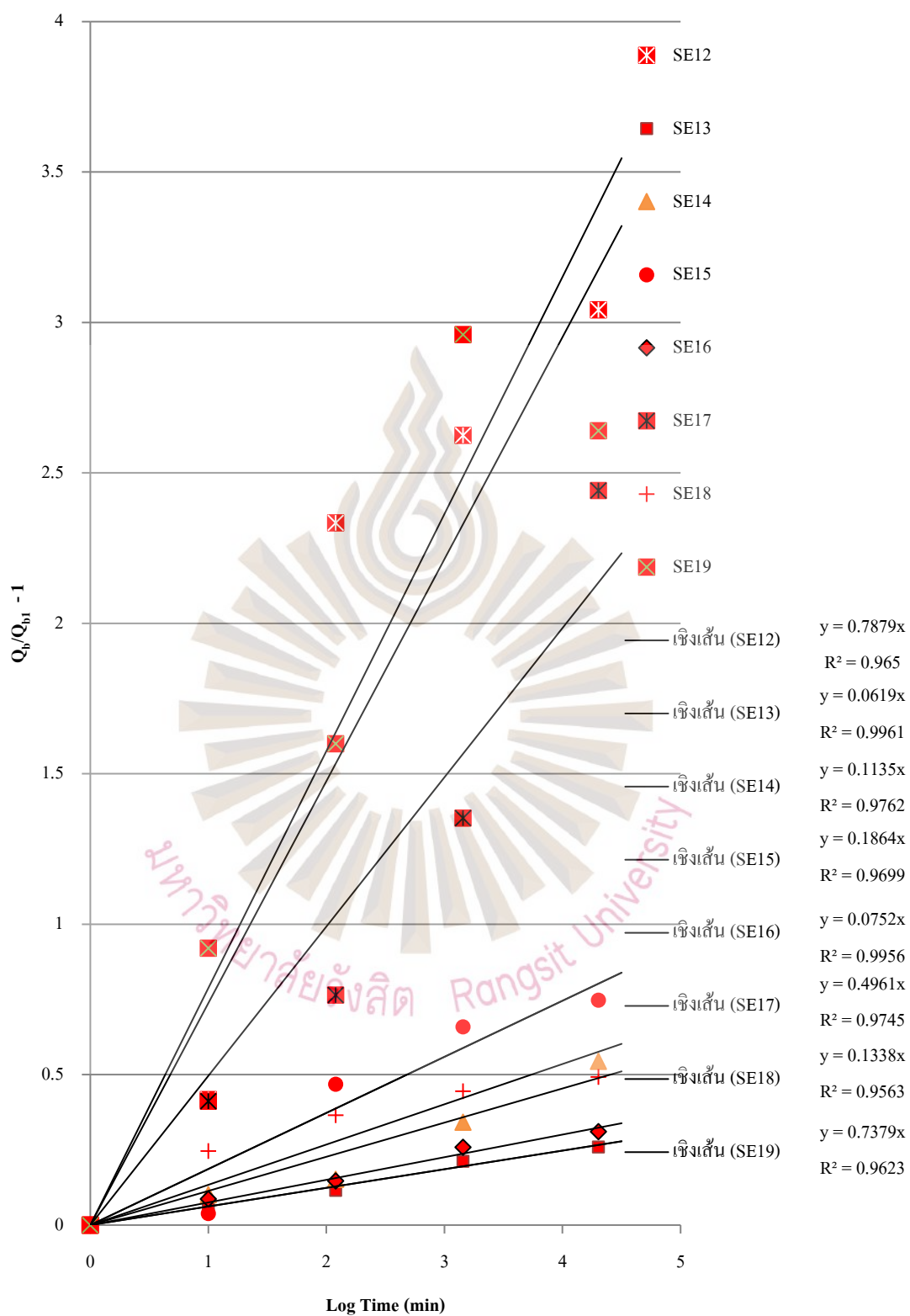
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ Log (t) ของแรงเสียดทาน
ด้านข้างของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



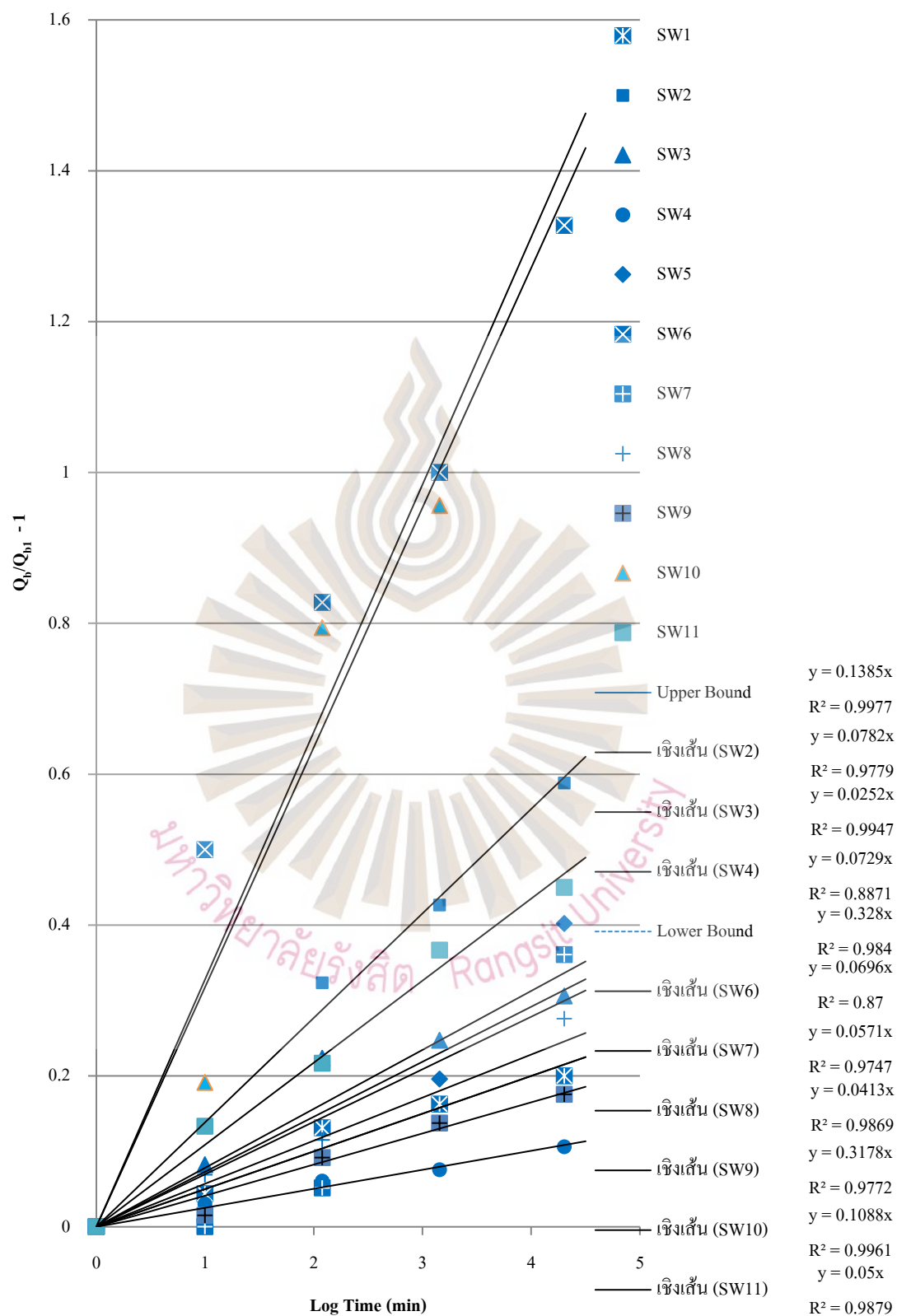
รูปที่ 4.15 ผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_s/Q_{s1} - 1$ กับ Log (t) ของแรงเสียดทาน
ด้านข้างของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2



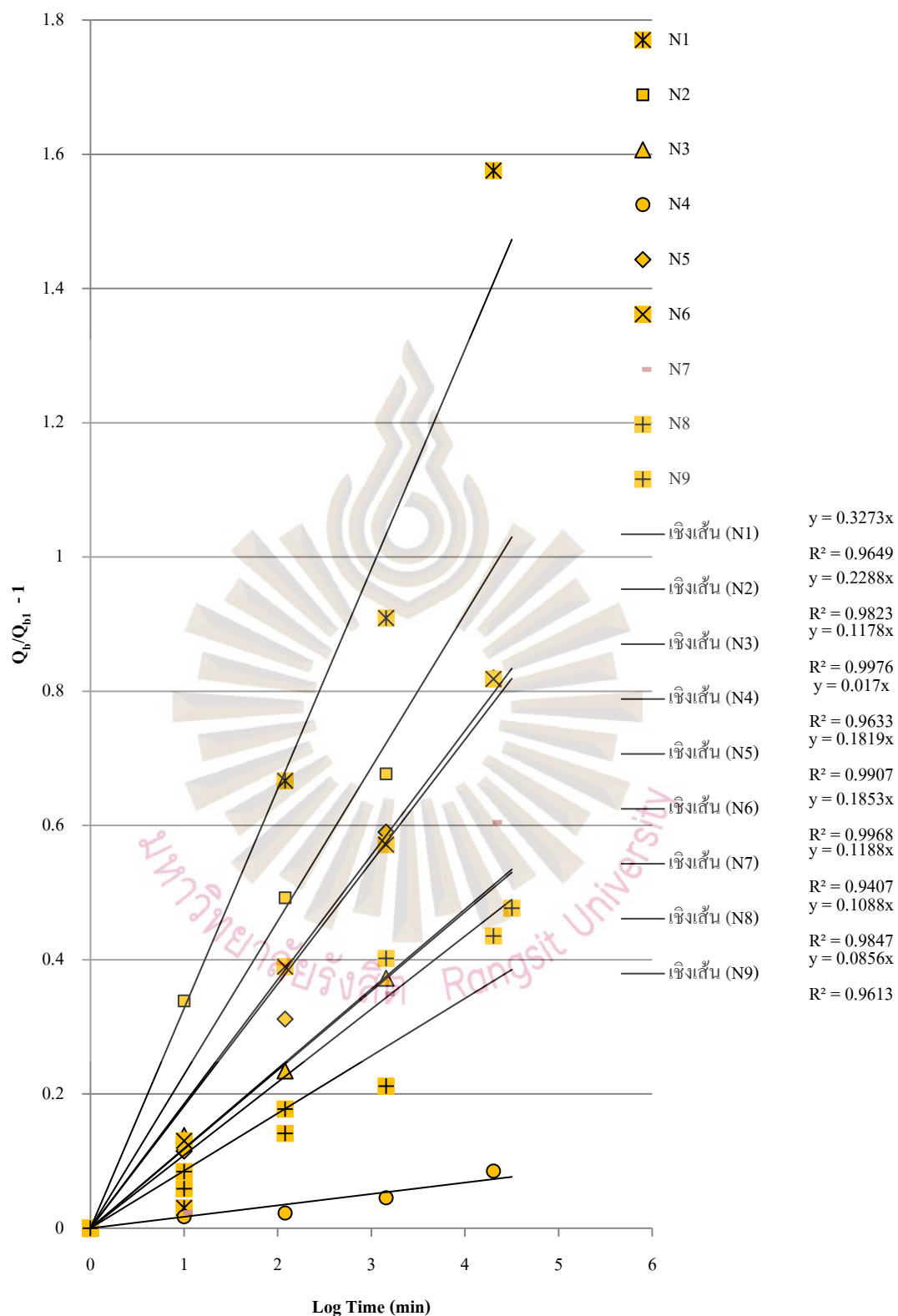
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ Log (t) ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



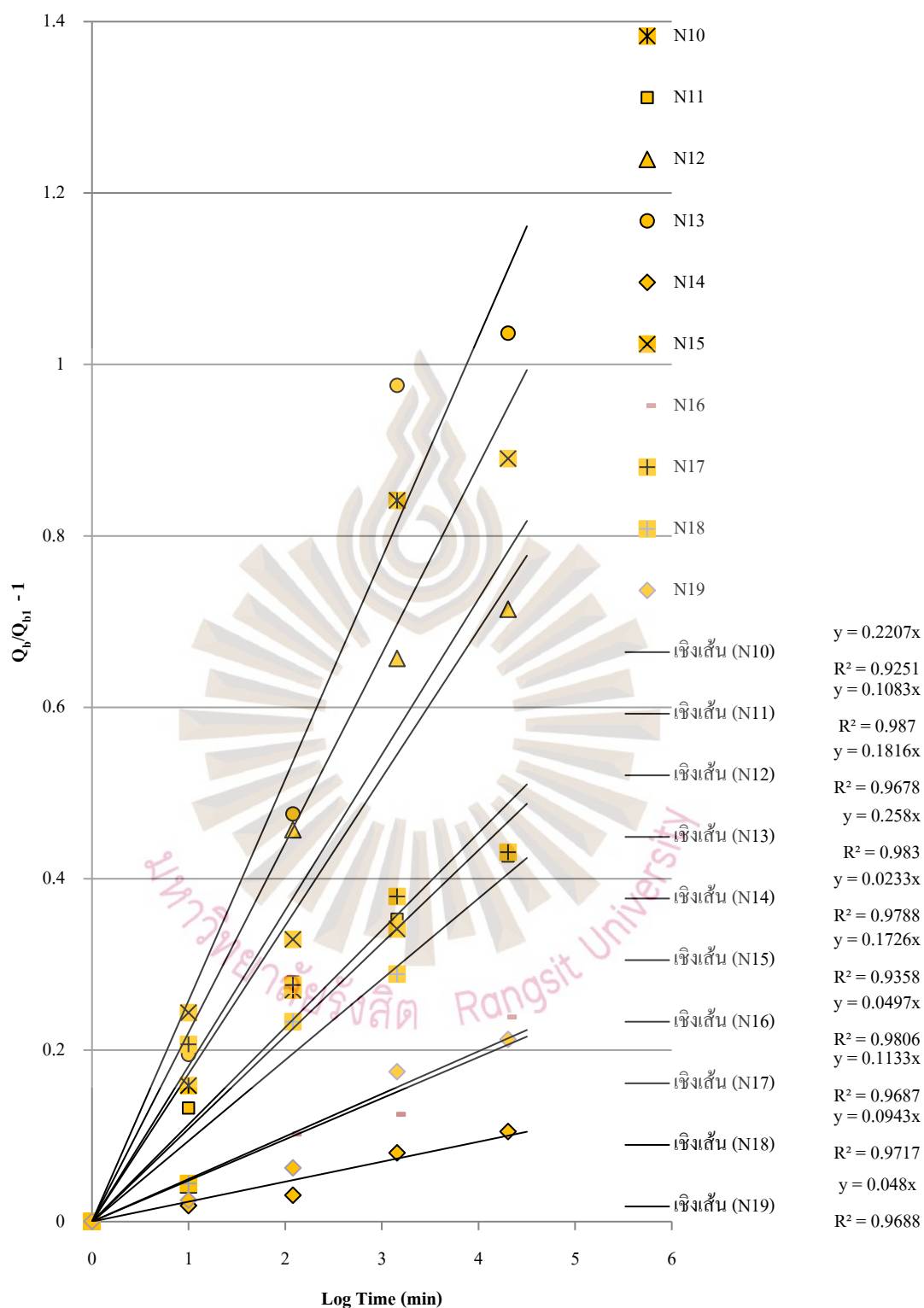
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\log(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{bi} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็ม โชนะวันตกเฉียงใต้



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_t/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็มโชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $Q_b/Q_{b1} - 1$ กับ $\text{Log}(t)$ ของด้านทานที่ปลายของเสาเข็มโชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2

4.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ m

ในการศึกษานี้ พารามิเตอร์ m สำหรับกำลังรวมของเสาเข็ม หาจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่า $\log_{10}(Q/Q_1)$ เป็นตัวแปรตาม (Dependence Variable) และ $\log_{10}(t)$ เป็นตัวแปรอิสระ (Independence Variable) โดยกำหนดให้เส้นความสัมพันธ์ผ่านจุดพิกัด (0,0) ค่าพารามิเตอร์ m ได้จากค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์

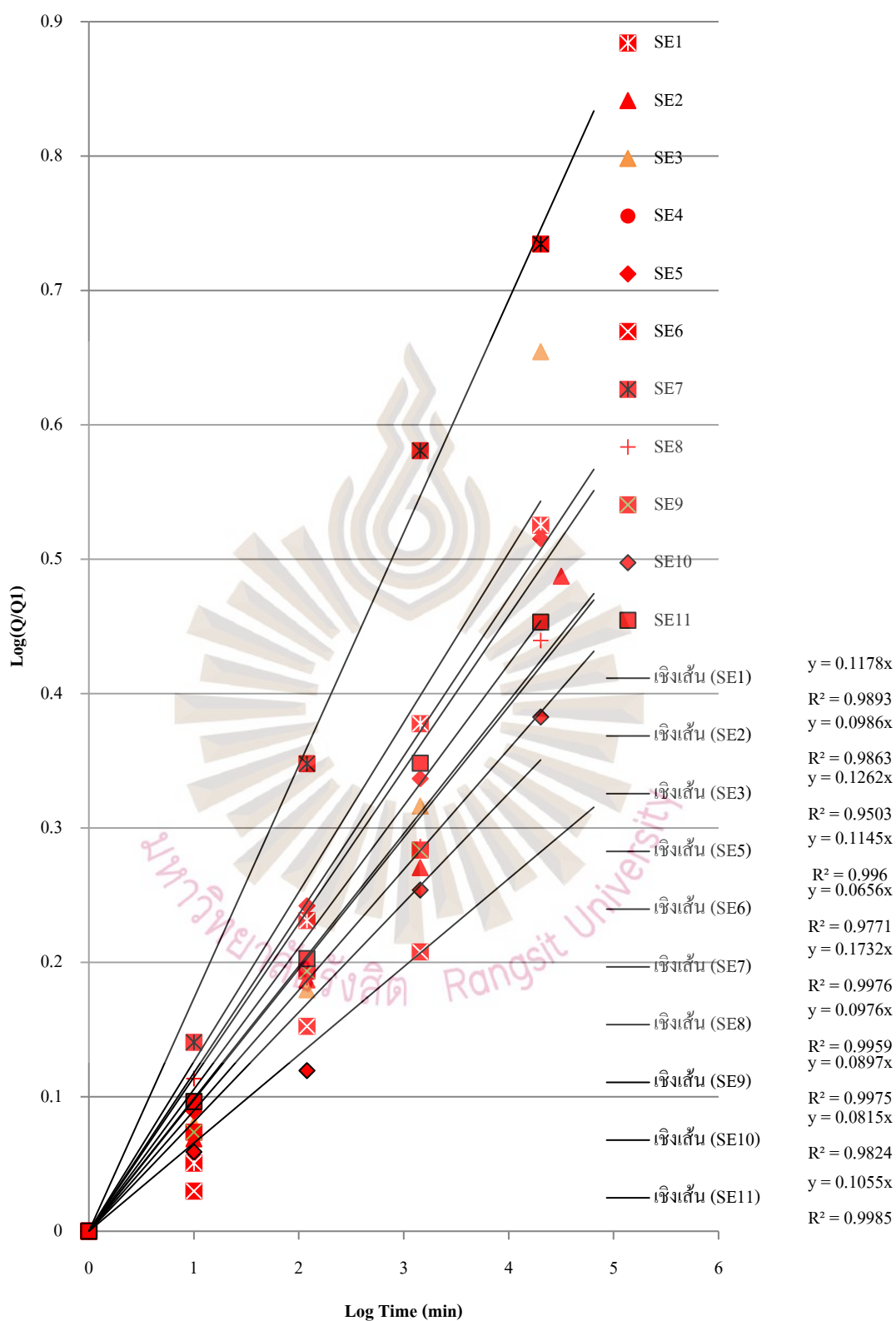
ในการหาค่าพารามิเตอร์ m_s สำหรับแรงเสียดทานด้านข้าง และพารามิเตอร์ m_b สำหรับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ได้ใช้วิธีเดียวกับที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ m แต่ใช้ค่าแรงเสียดทานด้านข้าง (Q_s) และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) แทนค่ากำลังรวม (Q)

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 4.21 ถึง 4.25, รูปที่ 4.26 ถึง 4.30 และรูปที่ 4.31 ถึง 4.35 สำหรับ ค่ากำลังรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ m , m_s และ m_b ที่ได้ถูกสรุปในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ m , m_s และ m_b มีค่า R-Squared เฉลี่ยสูงกว่า 0.92 สูงกว่าของค่าพารามิเตอร์ A ซึ่งแสดงว่า สมการที่ 3.2 สามารถใช้คำนวณค่า Q/Q_1 , Q_s/Q_{s1} และ Q_b/Q_{b1} ที่เวลาต่างๆ ได้อย่างแม่นยำกว่าสมการที่ 3-1

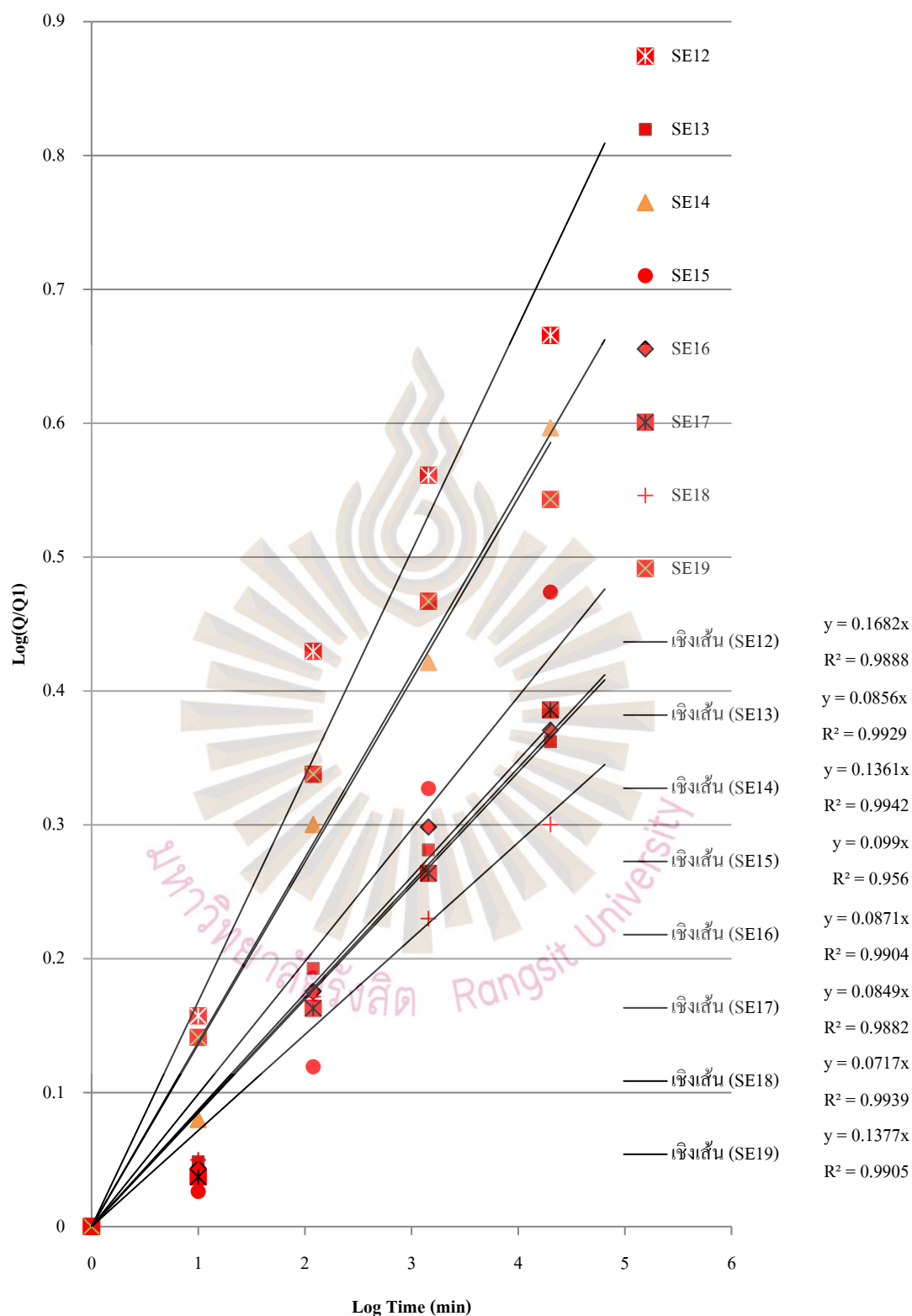
ภาคผนวก ข. แสดงกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q/Q_1 , Q_s/Q_{s1} และ Q_b/Q_{b1} กับเวลาที่คำนวณจากสมการที่ 3-2 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปสถิติของค่าพารามิเตอร์ m , m_s และ m_b

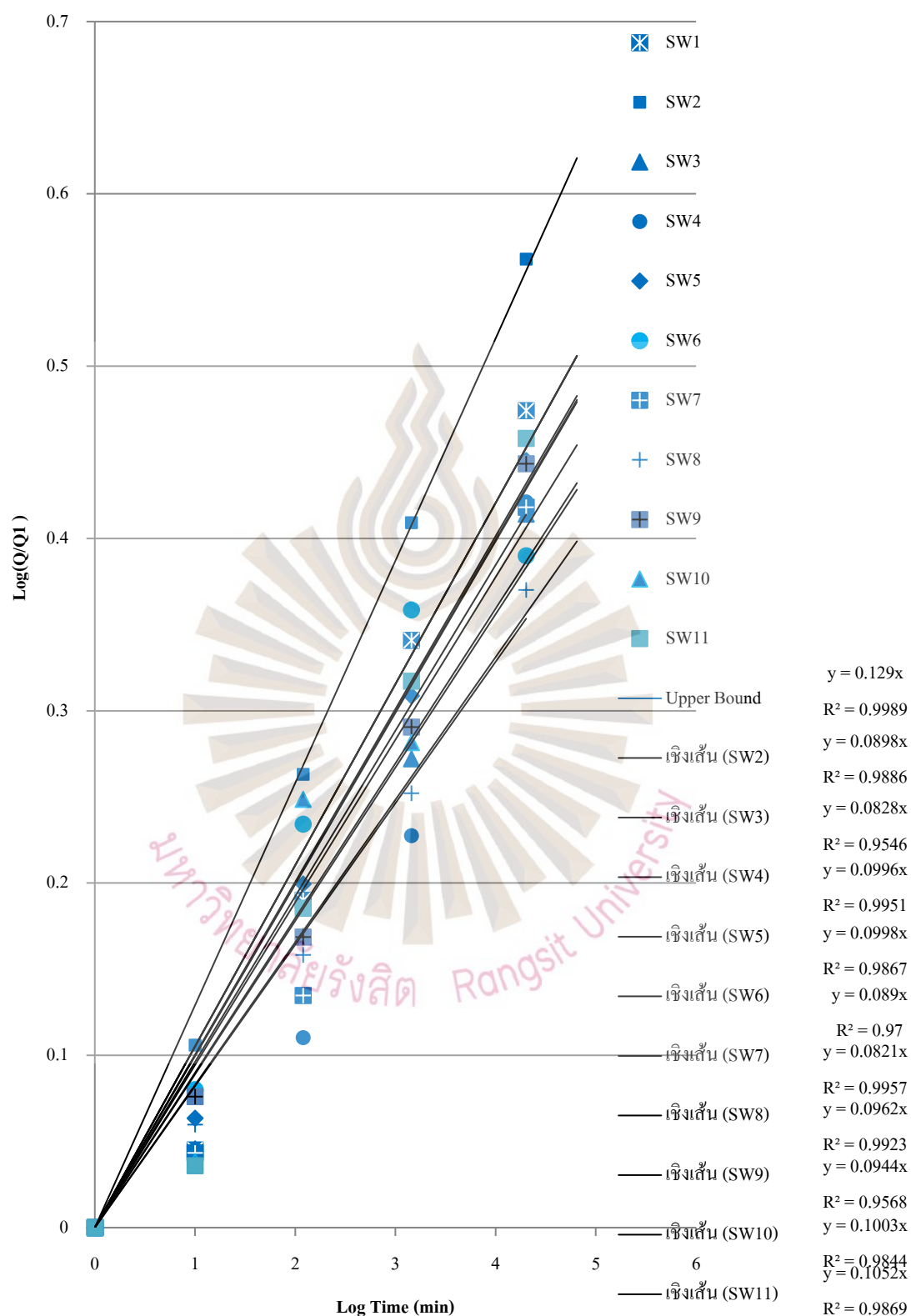
	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความเบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่าสัมประสิทธิ์ของ การแปรปรวน CV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
m	0.093	0.027	0.290	0.173	0.035
R^2	0.962			0.997	0.835
m_s	0.107	0.033	0.307	0.205	0.045
R^2	0.955			0.998	0.758
m_b	0.054	0.036	0.662	0.166	0.007
R^2	0.919			0.993	0.671



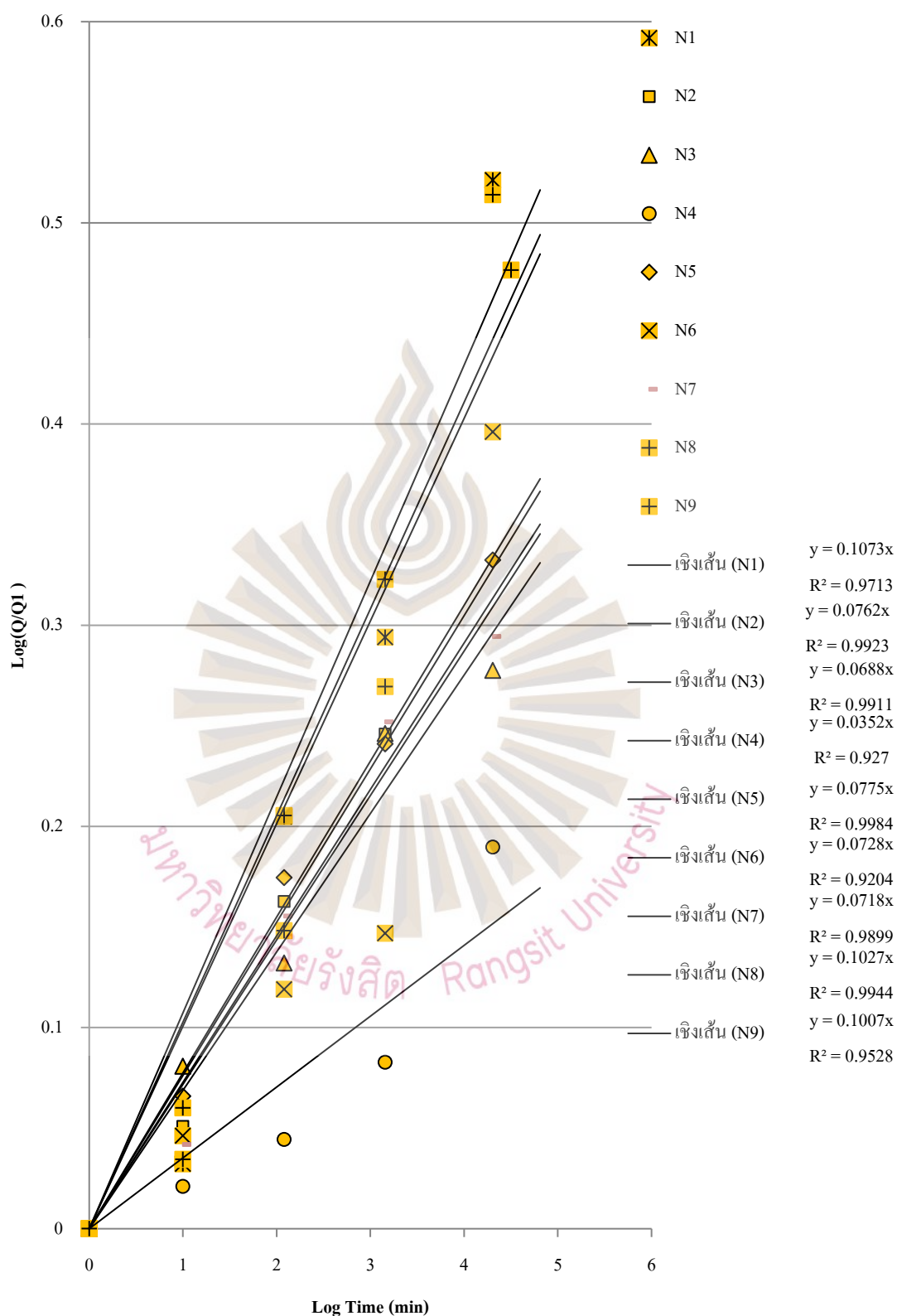
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



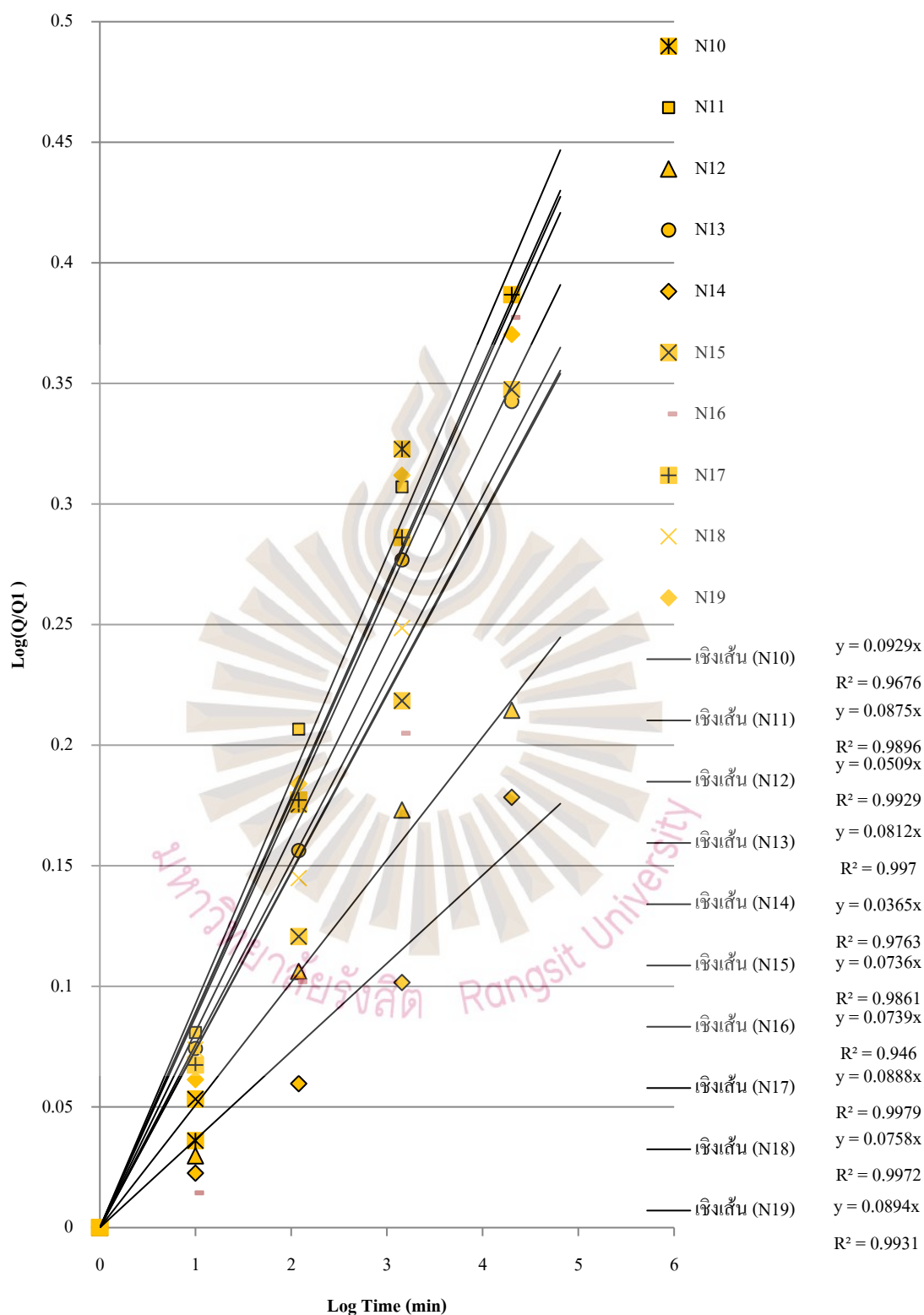
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



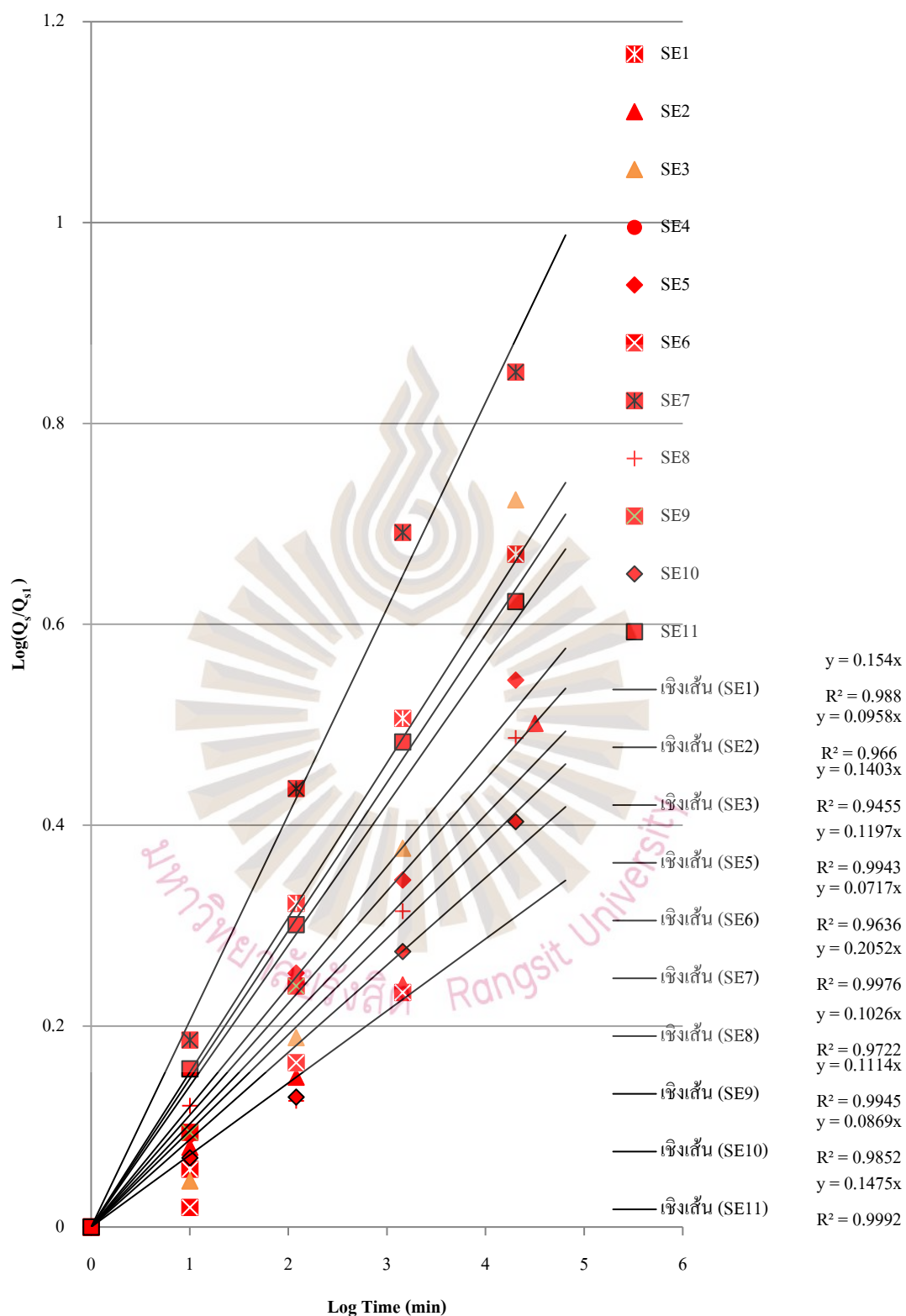
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้



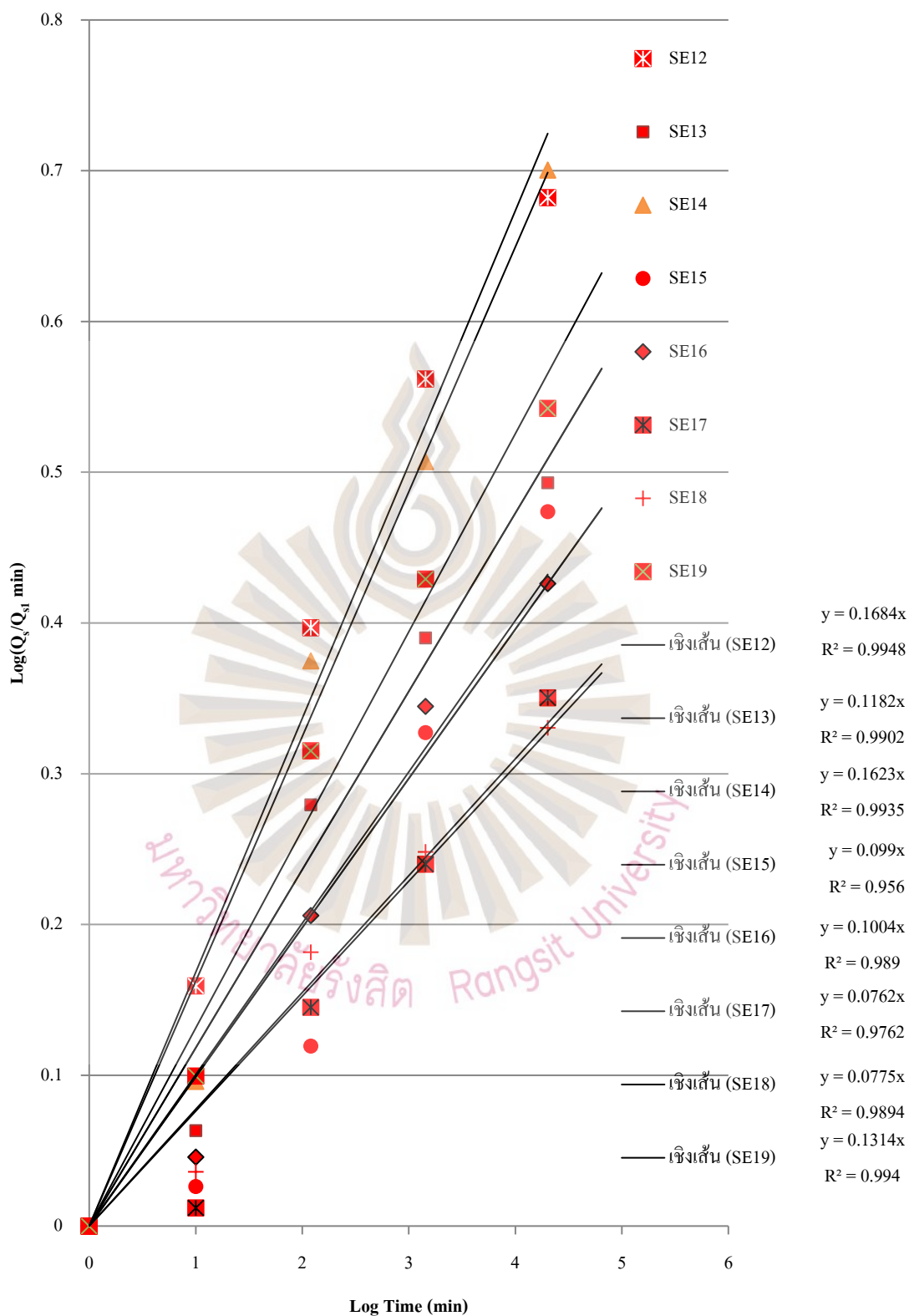
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



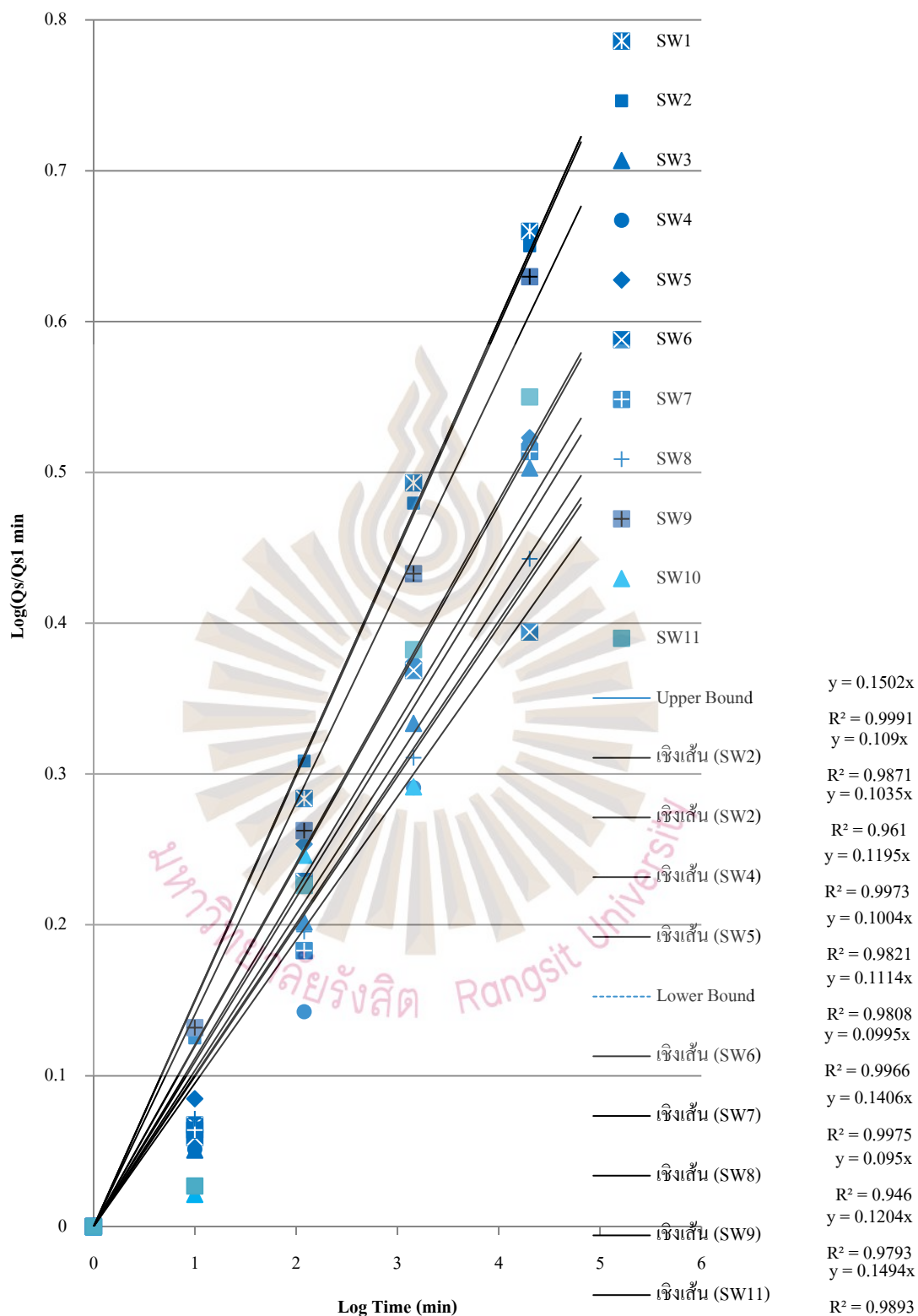
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q/Q_1)$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2



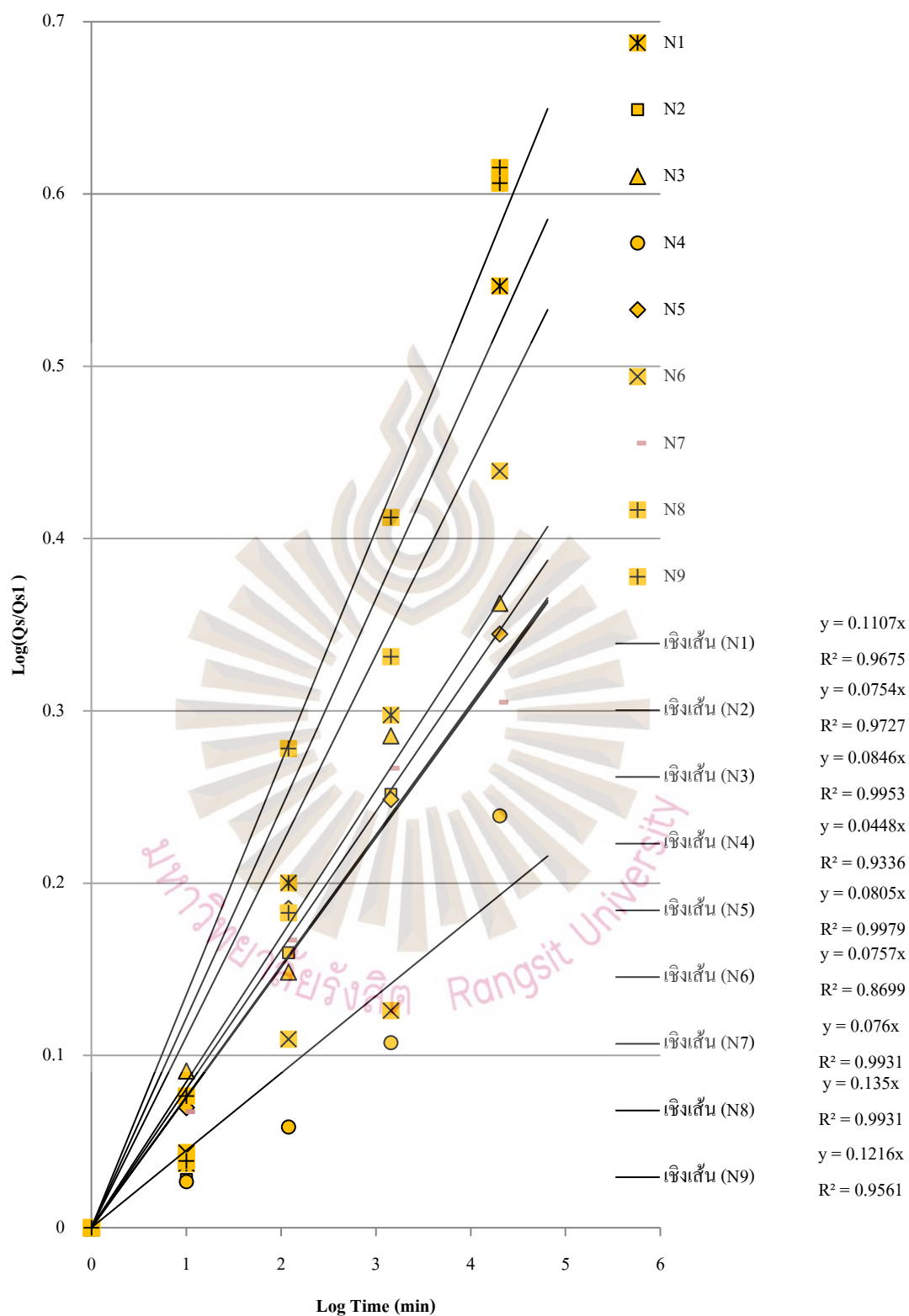
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



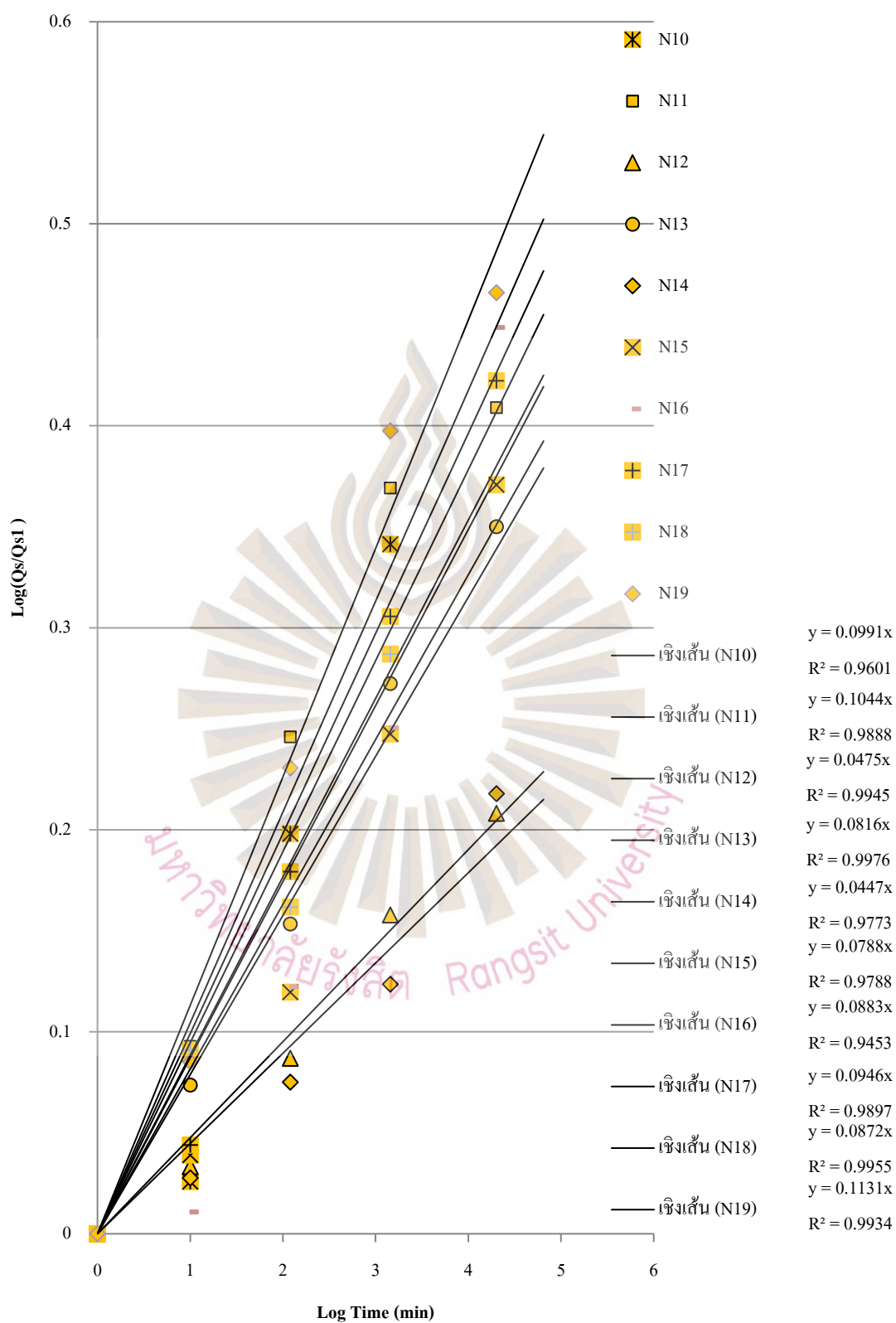
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\text{Log}(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



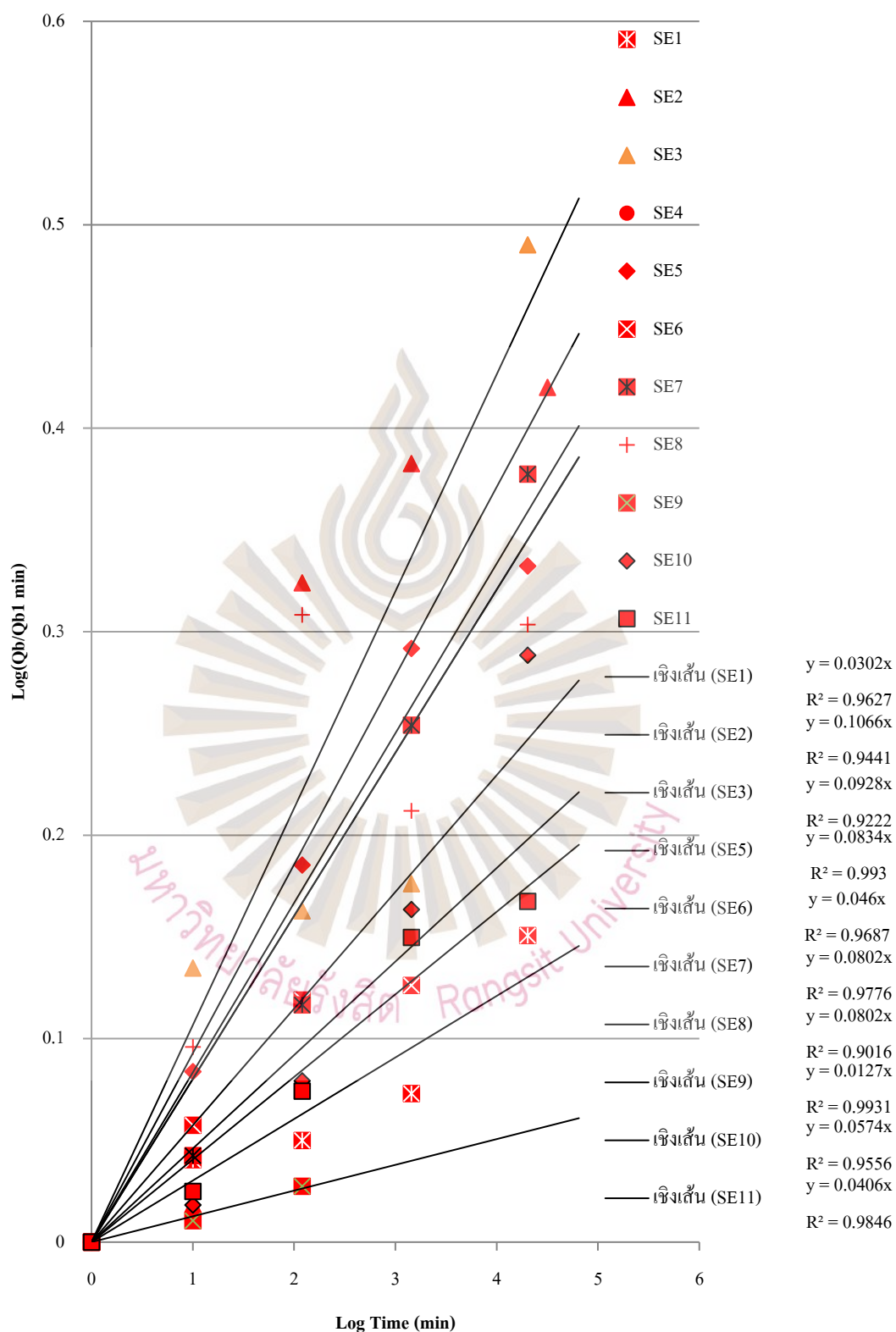
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้



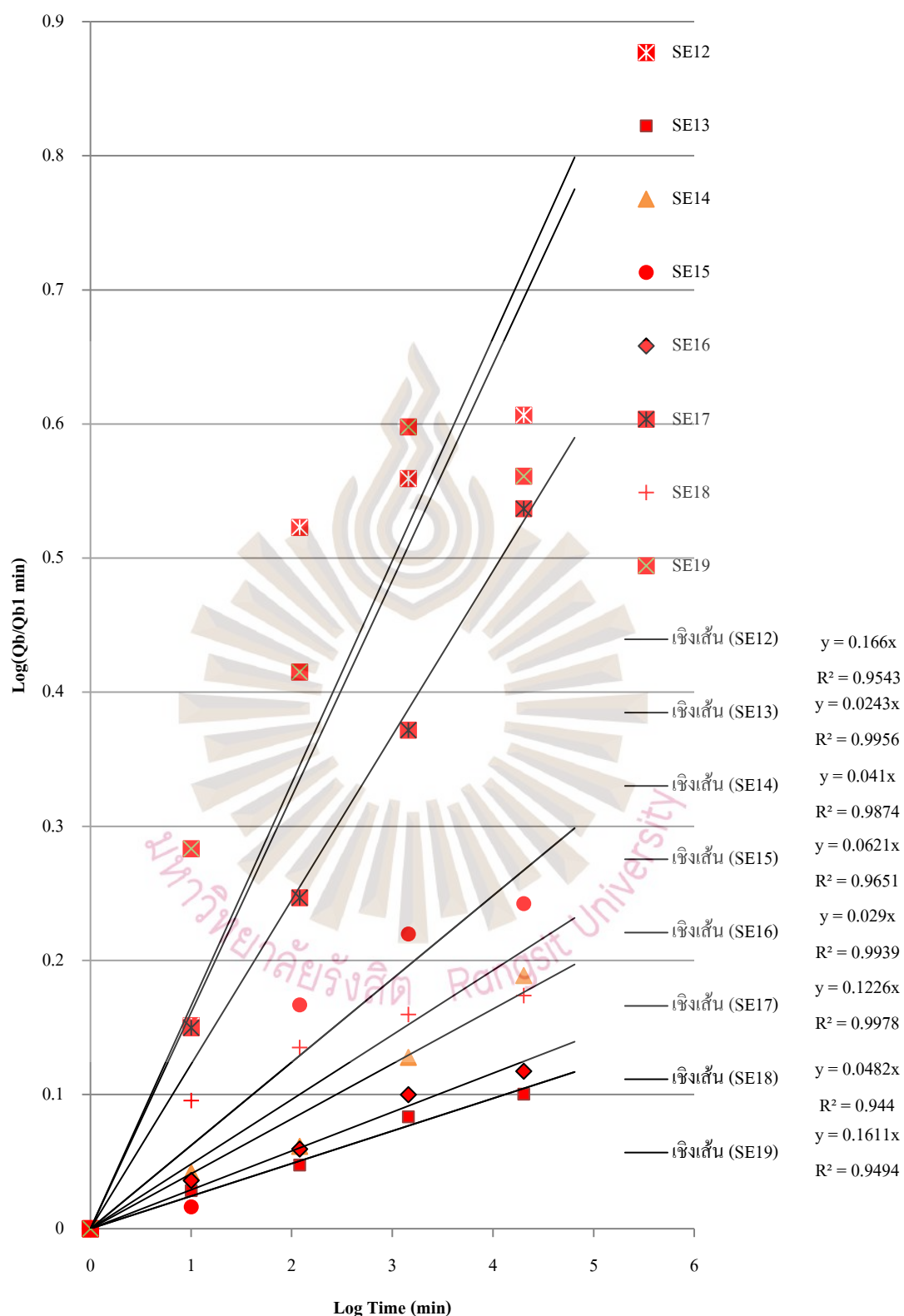
รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



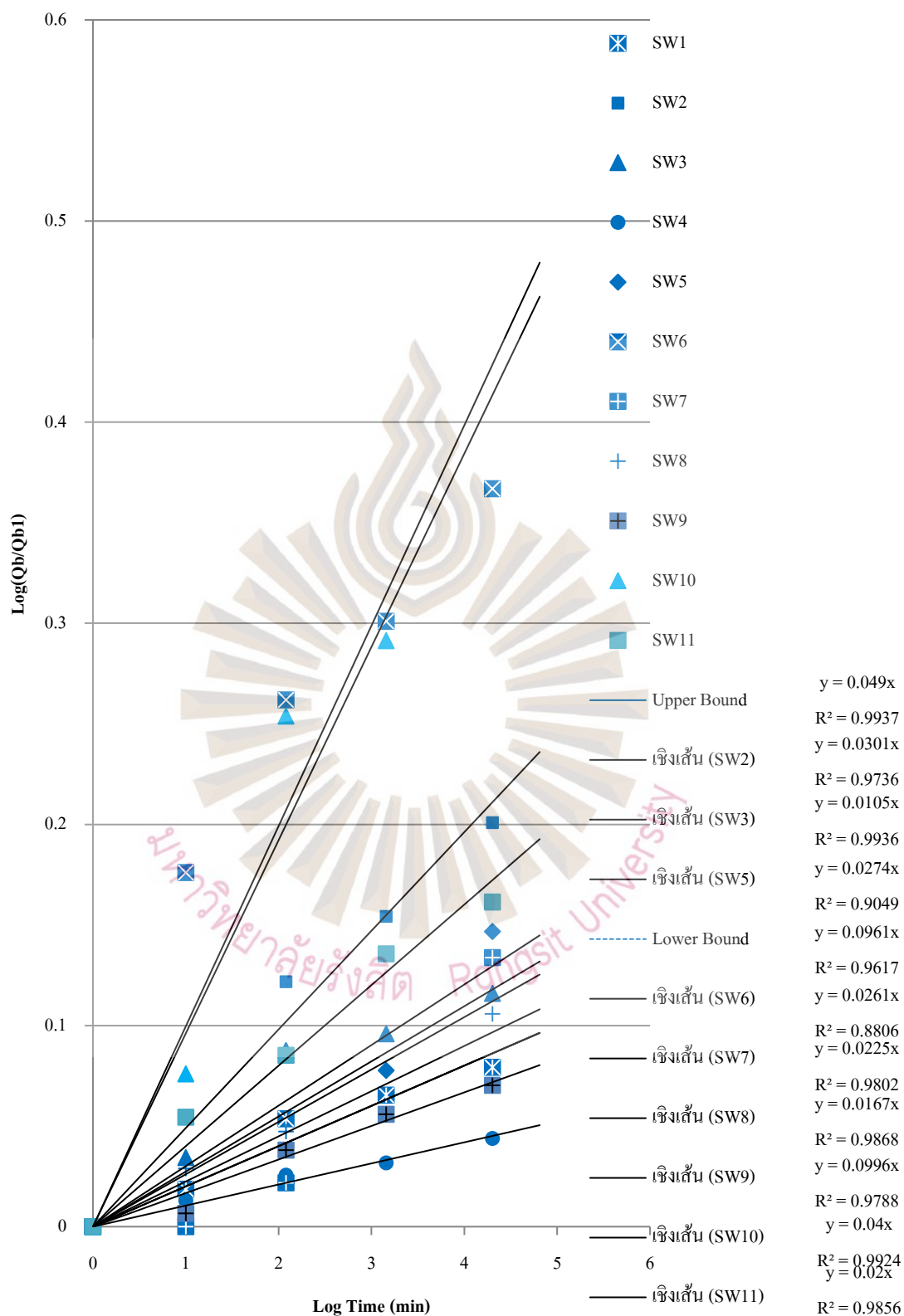
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_s/Q_{s1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2



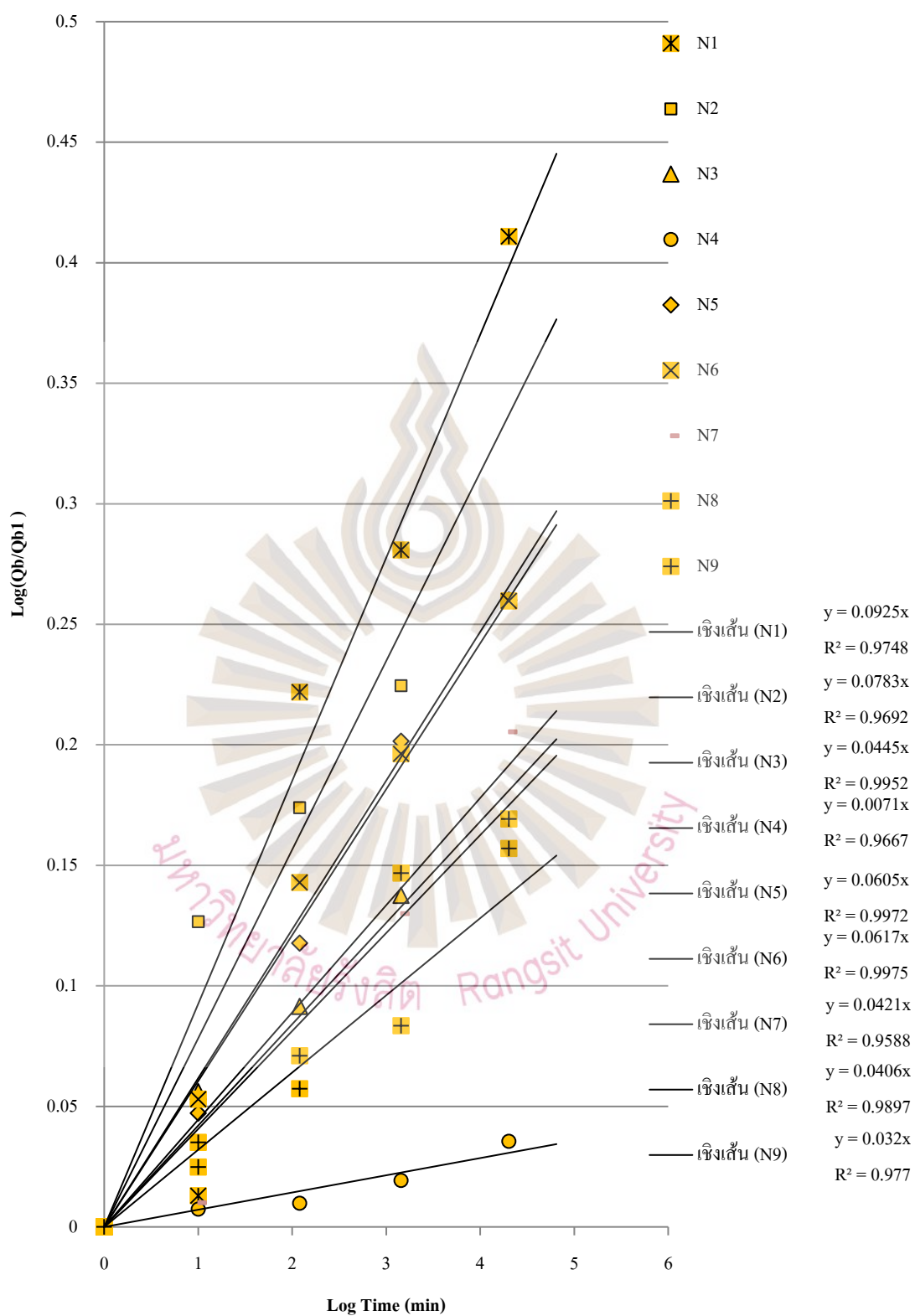
รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 1



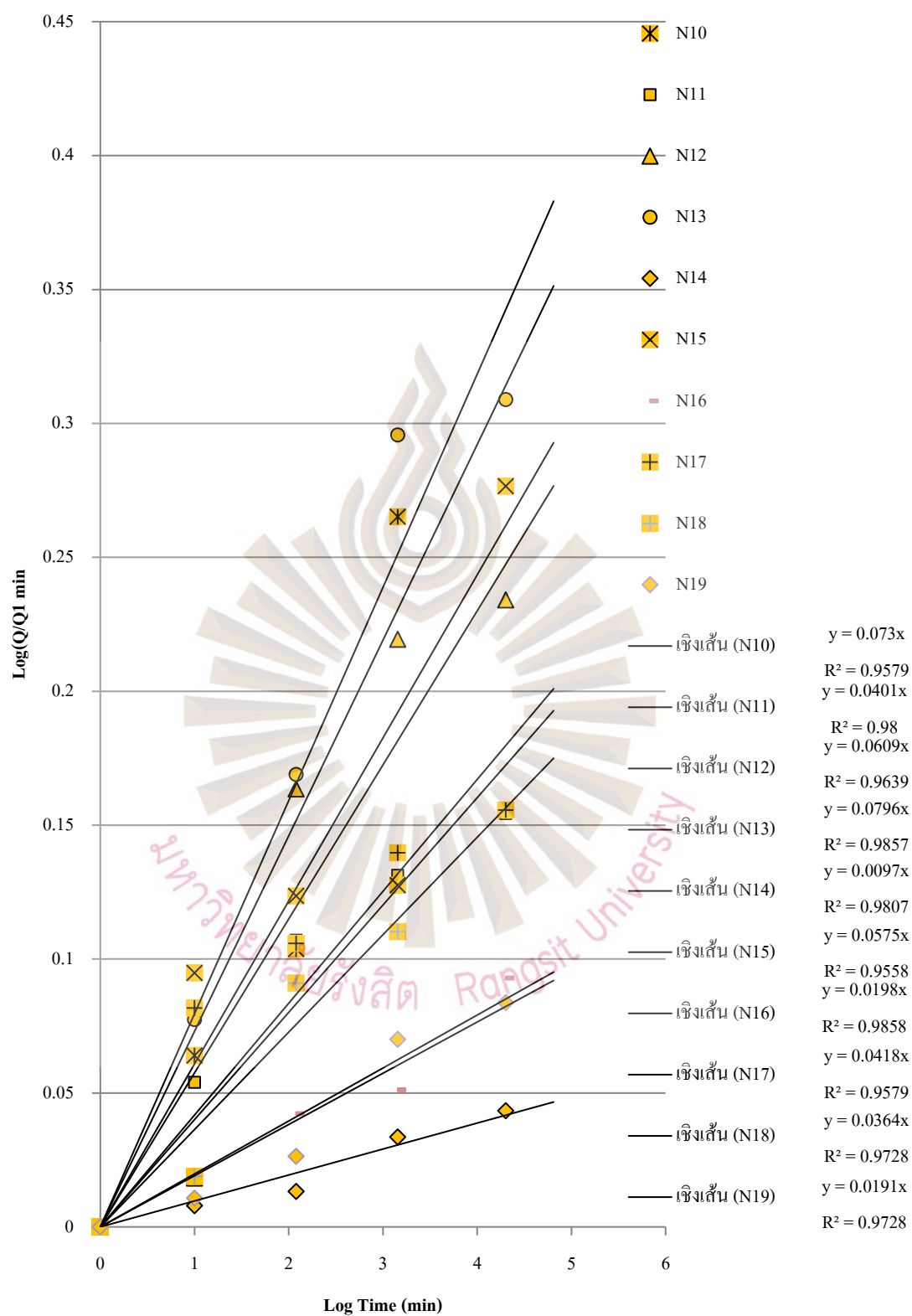
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนตะวันออกเฉียงใต้ ข้อมูลชุดที่ 2



รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของเสาเข็ม โชนตะวันตกเฉียงใต้



รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 1



รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่าง $\log(Q_b/Q_{b1})$ กับ $\log(t)$ ของกำลังรวมของ
เสาเข็ม โชนเหนือ ข้อมูลชุดที่ 2

4.4 อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ 14 วัน ต่อ กำลังที่ เวลาต่างๆ

ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังรวมที่ EOD, 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง และ 1 วัน ถูกแสดงในตารางที่ 4.7 ในตารางแสดงค่าเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ ค่าอัตราส่วนที่ความเชื่อมั่น 90% และ 95% ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จาก T-distribution

ตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนมีช่วงค่อนข้างกว้าง โดยความกว้างของช่วงและสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (CV) ของค่าอัตราส่วน มีขนาดลดลงเมื่อกำลังที่เป็นตัวหารทดสอบที่เวลาเข้าใกล้กับ 14 วันมากขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าการประมาณกำลังที่ 14 วันจะแม่นยำขึ้นหากใช้ค่ากำลังจากการทดสอบเสาเข็มที่เข้าใกล้กับ 14 วันในการประมาณ อย่างไรก็ตามการทดสอบที่ 2 ชั่วโมง ให้ค่า CV เท่ากับ 0.16 ซึ่งแตกต่างจากค่า 0.14 ของการทดสอบที่ 1 วัน ไม่นัก ดังนั้นในทางปฏิบัติการประมาณกำลังที่ 14 วัน ได้จากการทดสอบที่ 2 ชั่วโมงจะเป็นประโยชน์มากเพราะจะสามารถตัดสินใจได้ว่าเสาเข็มที่ทดสอบมีค่ากำลังที่ 14 วันได้ตามเกณฑ์หรือไม่ภายใน 2 ชั่วโมงหลังจากตอกเสาเข็มโดยไม่ต้องรออีก 1 วัน

ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วัน ต่อกำลัง EOD, 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง และ 1 วัน ถูกแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้างตามเวลามีขนาดเฉลี่ยสูงกว่าการเพิ่มของกำลังรวม ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มตามเวลามีขนาดเฉลี่ยต่ำกว่าการเพิ่มของกำลังรวม นอกจากนี้ ค่า CV ของทั้งแรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม มีขนาดสูงกว่าของกำลังรวม

ตารางที่ 4.7 ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่เวลาต่างๆ

	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความ เบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่า สัมประสิทธิ์ ของการ แปรปรวน CV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าที่ ความ เชื่อมั่น 90%	ค่าที่ความ เชื่อมั่น 95%
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{\text{EOD}}$	3.07	1.21	0.39	8.08	1.59	1.50	1.04
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{1 \text{ min.}}$	2.73	0.82	0.30	5.43	1.51	1.67	1.36
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{10 \text{ mins.}}$	2.30	0.53	0.23	3.93	1.43	1.61	1.41
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{2 \text{ hrs.}}$	1.72	0.27	0.16	2.44	1.28	1.37	1.26
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{1 \text{ day}}$	1.33	0.18	0.14	1.78	1.08	1.09	1.02

ตารางที่ 4.8 ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วัน ต่อแรงเสียดทานด้านข้างที่เวลาต่างๆ

	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความ เบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่า สัมประสิทธิ์ ของการ แปรปรวน CV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าที่ ความ เชื่อมั่น 90%	ค่าที่ความ เชื่อมั่น 95%
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s\text{EOD}}$	3.76	1.56	0.42	9.05	1.73	1.72	1.13
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s1 \text{ min.}}$	3.24	1.13	0.35	7.10	1.62	1.77	1.34
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s10 \text{ mins.}}$	1.90	0.41	0.21	3.20	1.20	1.37	1.21
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s2 \text{ hrs.}}$	1.94	0.43	0.22	3.43	1.32	1.38	1.22
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s1 \text{ day}}$	1.41	0.25	0.18	2.22	1.06	1.08	0.99

ตารางที่ 4.9 ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างด้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วัน ต่อด้านทานที่ปลายเสาเข็มที่เวลาต่างๆ

	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความ เบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่า สัมประสิทธิ์ ของการ แปรปรวน CV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าที่ ความ เชื่อมั่น 90%	ค่าที่ความ เชื่อมั่น 95%
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{bEOD}$	1.98	1.05	0.53	6.07	1.11	0.62	0.22
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{b1 \text{ min.}}$	1.79	0.71	0.39	4.04	1.09	0.87	0.60
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{b10 \text{ mins}}$	1.52	0.42	0.27	2.85	1.07	0.98	0.82
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{b2 \text{ hrs.}}$	1.28	0.24	0.19	2.13	0.99	0.97	0.87
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{b1 \text{ day}}$	1.14	0.19	0.17	2.06	0.92	0.90	0.82



บทที่ 5

อภิปรายผล

5.1 การเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา

5.1.1 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของกำลังรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มตามเวลา

ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่พิจารณากำลังการเพิ่มขึ้นของกำลังรวมของเสาเข็มกับเวลา แต่ Bullock (1999) เสนอแนะว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มส่วนใหญ่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้างจากการสลายของแรงดันน้ำส่วนเกินที่รอบๆ เสาเข็ม ดังนั้นเพื่อความแม่นยำของการทำนายกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ จึงควรพิจารณาเฉพาะการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้าง เพื่อตรวจสอบว่าการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาตามเวลาในชั้นดินกรุงเทพฯ ควรแยกพิจารณาการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้าง และการเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มหรือไม่ ในการศึกษาจึงได้ทำคำนวณค่าสถิติของการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ 14 วันเทียบกับกำลังที่ 1 นาทีและสรุปในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวม แรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วัน ต่อกำลังที่ 1 นาที

	ค่าเฉลี่ย	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าที่ความเชื่อมั่น 90%	ค่าที่ความเชื่อมั่น 95%
	AV.	SD.	CV.				
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{1 \text{ min.}}$	2.73	0.82	0.30	5.43	1.51	1.67	1.36
$Q_{s14 \text{ days}}/Q_{s1 \text{ min.}}$	3.24	1.13	0.35	7.10	1.62	1.77	1.34
$Q_{b14 \text{ days}}/Q_{b1 \text{ min.}}$	1.79	0.71	0.39	4.04	1.09	0.87	0.60

ตารางที่ 5.1 แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความความแปรปรวน (CV) ของอัตราส่วนของกำลังรวมที่ 14 วันเทียบกับที่ 1 นาที่มีค่าเท่ากับ 0.3 ส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 0.35 และ 0.39 ตามลำดับ จะเห็นว่าการคำนวณการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มโดยใช้กำลังรวมจะแม่นยำกว่าคำนวณโดยแยกส่วน นอกจากนี้การศึกษายังคำนวณสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination) หรือ R-squared ของผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่า พารามิเตอร์ A , A_s และ A_b และ พารามิเตอร์ m , m_s และ m_b ตารางที่ 5.2 และ 5.3 สรุปค่า R-squared ของผลการการวิเคราะห์ดังกล่าว ส่วนรูปที่ 5-1 และ 5-2 แสดงกราฟแจกแจงความถี่ของค่า R-squared จะเห็นว่า ค่า R-squared ของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ A และ m ของกำลังรวม มีค่าสูงกว่าของแรงเสียดทานด้านข้าง และ แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งแสดงว่าการทำคำนวณค่ากำลังที่เวลาต่างๆ โดยคิดแบบกำลังรวม จะแม่นยำกว่าการคิดแบบแยกส่วน นอกจากนี้เนื่องค่าแรงเสียดทานด้านข้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจากผลการทดสอบ Dynamic Pile Load มีใช้ค่าที่วัดได้โดยตรงแต่เป็นค่าที่ประมาณจากลักษณะของสัญญาณของคลื่นของความเร็วและแรงที่หัวเสาเข็มจึงมีความแม่นยำน้อยกว่าค่ากำลังรวม ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ค่ากำลังรวม โดยไม่แยกเป็นส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างและส่วนของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

ตารางที่ 5.2 ตารางสรุปสถิติของ R-squared ของผลการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหา

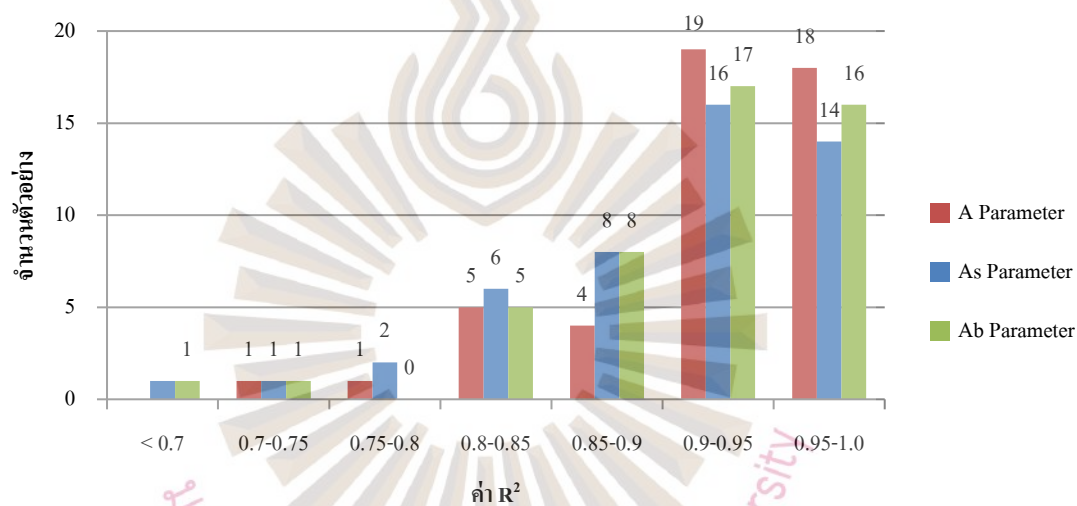
ค่าพารามิเตอร์ A , A_s และ A_b

	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
R^2 ของค่า A	0.921	0.988	0.730
R^2 ของค่า A_s	0.902	0.981	0.650
R^2 ของค่า A_b	0.915	0.993	0.653

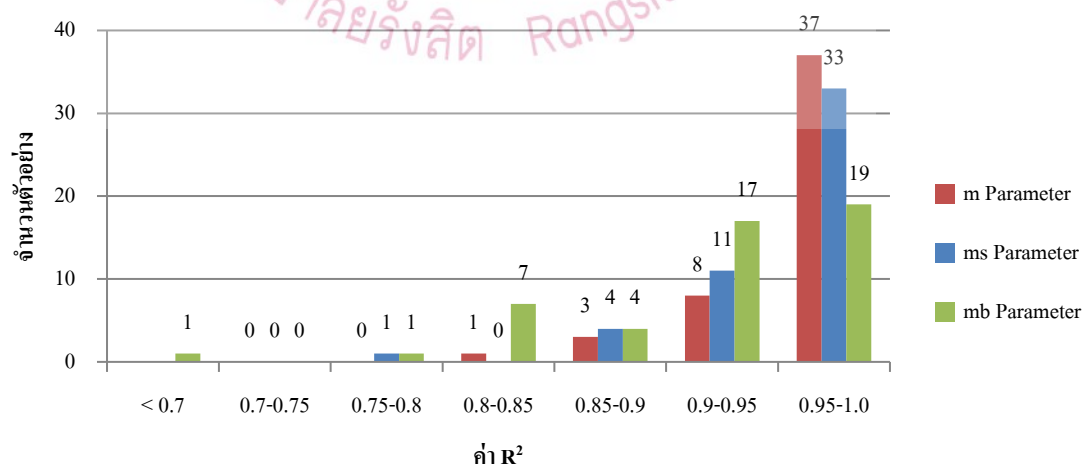
ตารางที่ 5.3 ตารางสรุปสถิติของ R-squared ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหา

ค่าพารามิเตอร์ m , m_s และ m_b

	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
R^2 ของค่า m	0.962	0.997	0.835
R^2 ของค่า m_s	0.955	0.998	0.758
R^2 ของค่า m_b	0.919	0.993	0.671



รูปที่ 5.1 กราฟการแจกแจงความถี่ของค่า R-squared ของค่า A, A_s และ A_b



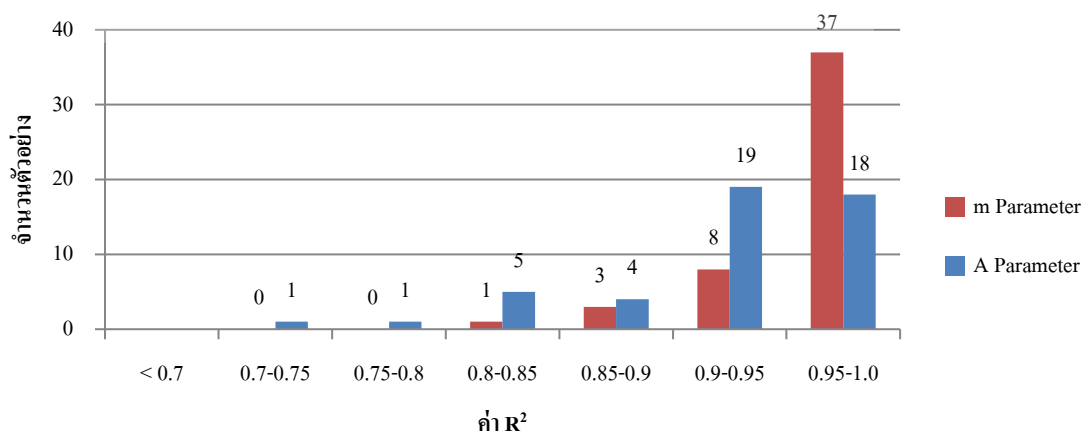
รูปที่ 5.2 กราฟการแจกแจงความถี่ของค่า R-squared ของค่า m , m_s และ m_b

5.1.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ A และค่าพารามิเตอร์ m

เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการที่ 3.1 และ 3.2 ในการคำนวณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ค่า R-squared ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ A ได้ถูกเปรียบเทียบกับค่าของค่าพารามิเตอร์ m จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นว่า ค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ m มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.962 และมีช่วงสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 0.997 ถึง 0.835 ส่วนค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.921 และมีช่วงสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 0.988 ถึง 0.73 รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกราฟแจกแจงความถี่ของค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ A และ m ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างที่มีค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ m สูงกว่าหรือเท่ากับ 0.95 มีจำนวนถึง 37 ตัวอย่าง คิดเป็น 76 % ของตัวอย่างทั้งหมด ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ A มีเพียง 18 ตัวอย่างคิดเป็น 36 % ของตัวอย่างทั้งหมด

จากค่าสถิติข้างต้นจะเห็นว่า การคำนวณกำลังของเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ด้วยสมการที่ 3-2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ m โดยเฉลี่ยจะแม่นยำกว่าการคำนวณด้วยสมการที่ 3-1 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ A ด้วยเหตุนี้ กราฟระหว่างกำลังรวมของเสาเข็มกับลอกการทมิกของเวลาที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นโค้งหงายขึ้น

ดังกล่าวข้างต้น สมการที่ 3-2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ m มีความแม่นยำในการคำนวณการเพิ่มขึ้นตามเวลาของเสาเข็ม และการคำนวณโดยใช้กำลังรวมของเสาเข็มมีความแม่นยำกว่าการคำนวณแบบแยกส่วนเป็นแรงเสียดทานด้านข้างกับแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจึงเน้นไปที่ค่าพารามิเตอร์ m เป็นหลัก



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกราฟการแจกแจงความถี่ของค่า R-squared ของค่าพารามิเตอร์ A และ m

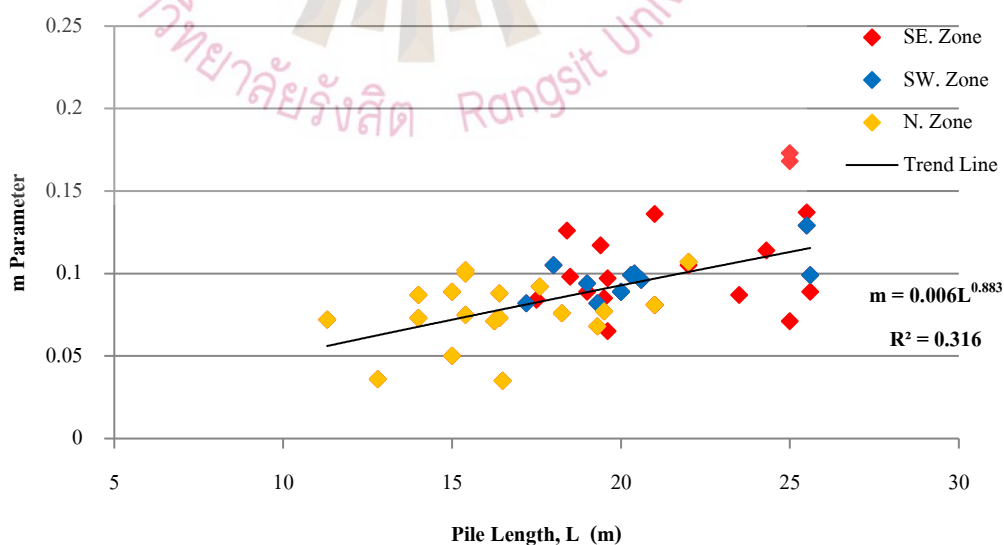
5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ m

การศึกษานี้ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าพารามิเตอร์ m โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 1) ความยาวเสาเข็ม 2) สัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างต่อกำลังรวม 3) กำลังของเสาเข็ม 4) กำลังของเสาเข็มต่อความยาว 5) โซนดินต่างๆ และ 6) ชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม

ในการศึกษานี้การวิเคราะห์แนวโน้มของผลกระทบของตัวแปรต่างๆ วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากทุกโซนดินรวมกัน แต่กราฟที่ใช้วิเคราะห์ได้แยกสีของจุดข้อมูลแต่ละโซนอย่างชัดเจนโดยโซนตะวันออกเฉียงใต้ใช้สีแดง ข้อมูลของโซนตะวันตกเฉียงใต้ใช้สีน้ำเงิน และข้อมูลของโซนเหนือใช้สีเหลือง

5.2.1 ผลกระทบของความยาวของเสาเข็มต่อค่าพารามิเตอร์ m

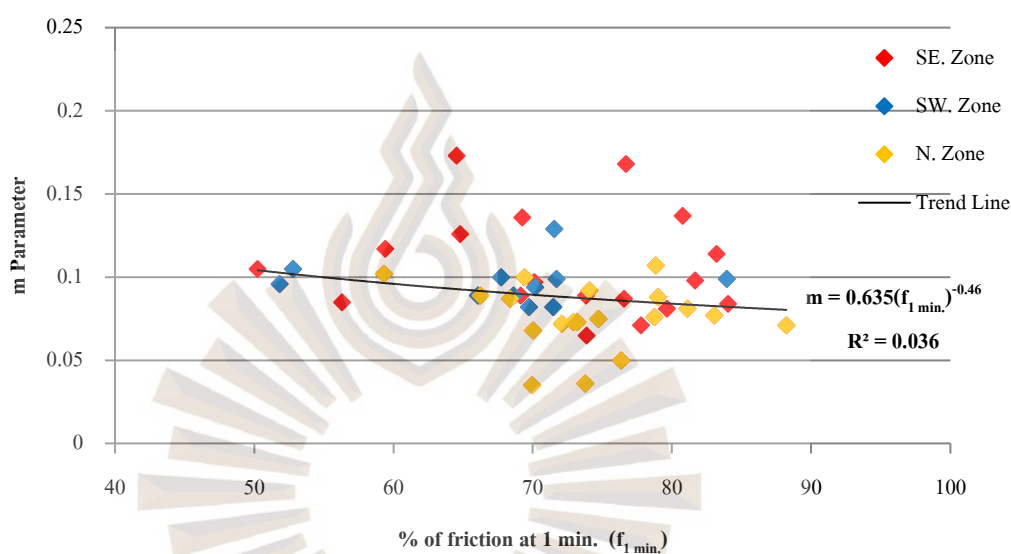
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับความยาวของเสาเข็ม กราฟนี้แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ m มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของเสาเข็ม โดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.336 ถึงแม้ว่าเสาเข็มโซนเหนือมีความยาวเฉลี่ยสั้นกว่าโซนอื่น แต่กราฟรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบของโซนเหนืออยู่ในเส้นแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบของโซนตะวันตกเฉียงใต้และโซนตะวันออกเฉียงใต้



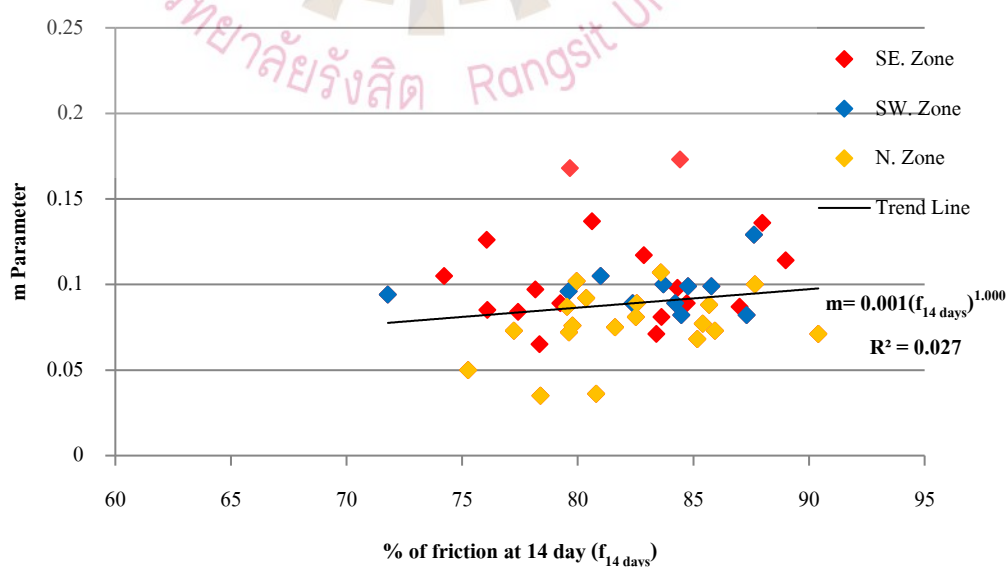
รูปที่ 5.4 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับความยาวของเสาเข็ม

5.2.2 ผลกระทบของสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างต่อกำลังรวม ต่อค่าพารามิเตอร์ m

รูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างต่อกำลังรวมของเสาเข็มที่ 1 นาที ($f_{1 \text{ min.}}$) และที่ 14 วัน ($f_{14 \text{ days}}$) ในรูปของเปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าตัวแปรทั้งสองไม่มีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ m โดยความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรกับค่าพารามิเตอร์ m มีค่า R-squared ใกล้เคียงกับศูนย์



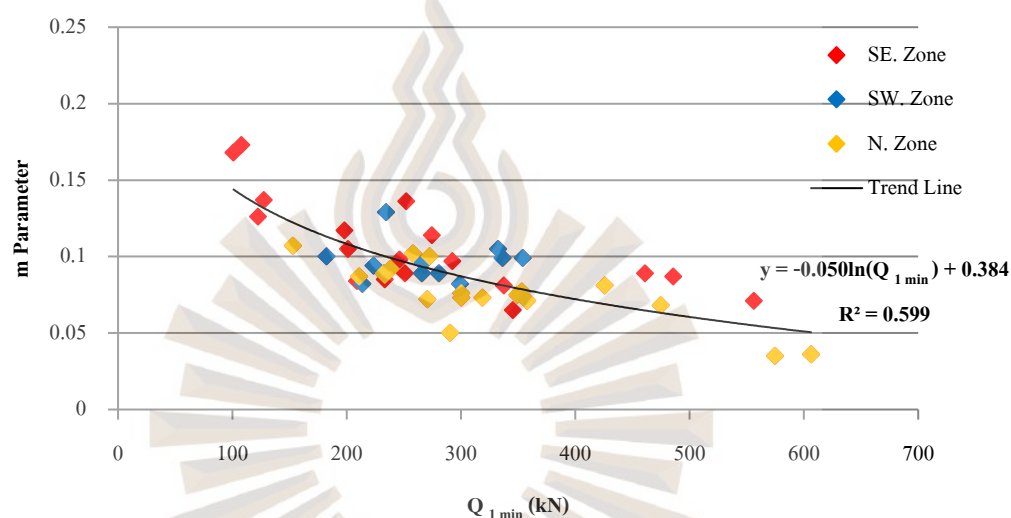
รูปที่ 5.5 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่ 1 นาที



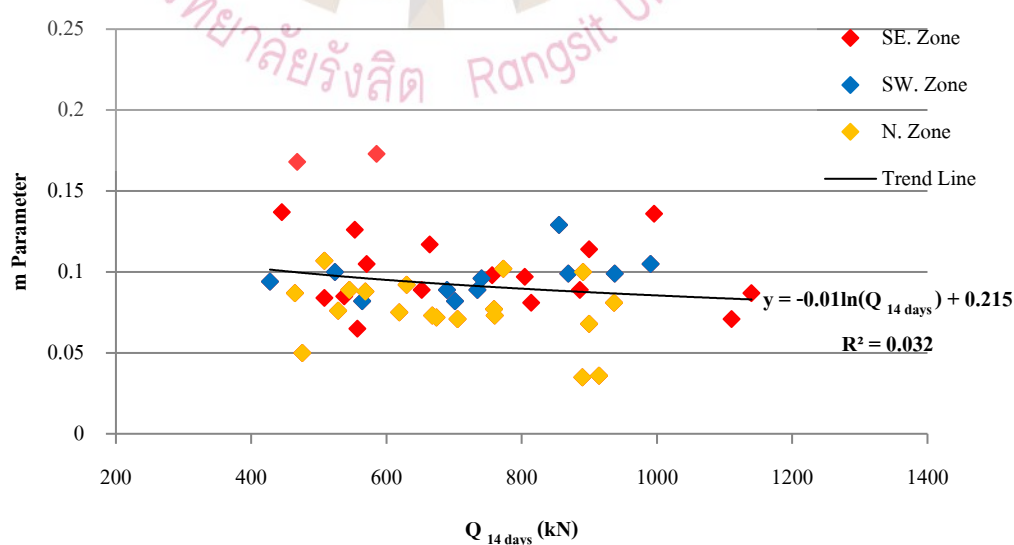
รูปที่ 5.6 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับสัดส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วัน

5.2.3 ผลกระทบของกำลังของเสาเข็มต่อค่าพารามิเตอร์ m

รูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่ 1 นาที ($Q_{1 \text{ min.}}$) และที่ 14 วัน ($Q_{14 \text{ days}}$) ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ m มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อกำลังรวมของเสาเข็มที่ 1 นาทีเพิ่มขึ้นโดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.561 แต่ค่าพารามิเตอร์ m ไม่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรวมที่ 14 วัน โดยมีค่า R-squared ของความสัมพันธ์ ใกล้เคียงกับศูนย์



รูปที่ 5.7 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่ 1 นาที ($Q_{1 \text{ min.}}$)



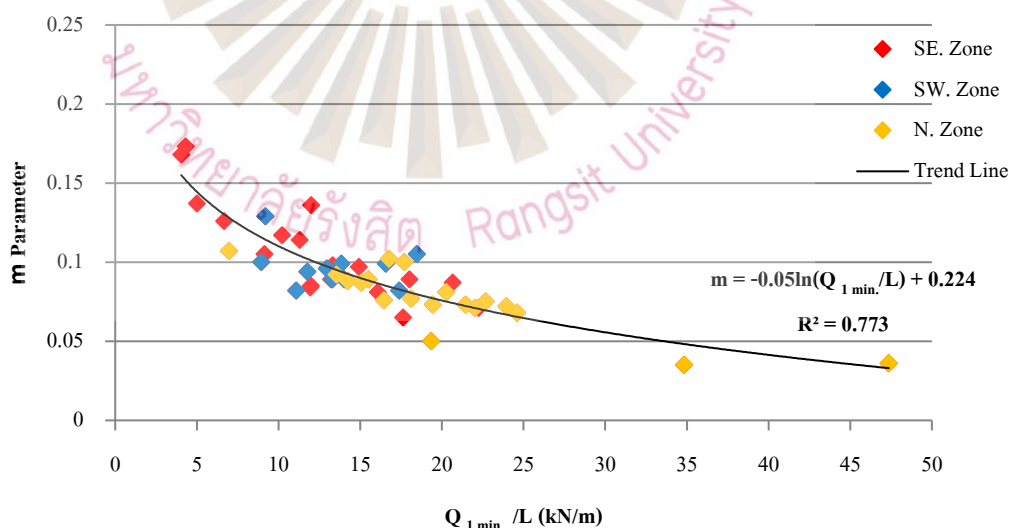
รูปที่ 5.8 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมของเสาเข็มที่ 14 วัน ($Q_{14 \text{ days}}$)

5.2.4 ผลกระทบของกำลังของเสาเข็มต่อหน่วยความยาว ต่อค่าพารามิเตอร์ m

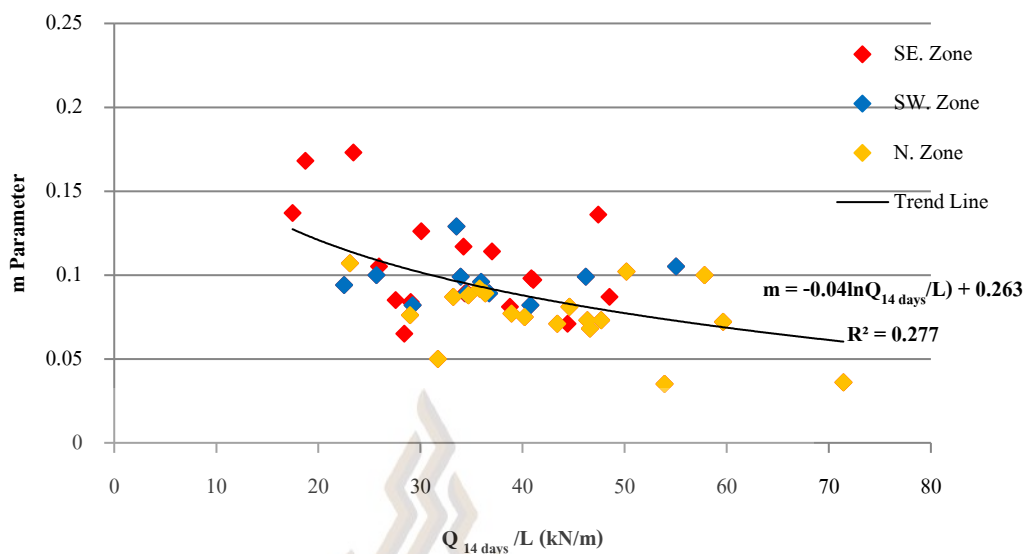
รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาติ ($Q_{1 \text{ min.}}/L$) และที่ 14 วัน ($Q_{14 \text{ days.}}/L$) จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ m มีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อกำลังรวมของต่อหน่วยความยาวเสาเข็มที่ 1 นาติเพิ่มขึ้นโดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.724 นอกจากนี้ว่าค่าพารามิเตอร์ m มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อกำลังรวมของต่อหน่วยความยาวเสาเข็มที่ 14 วันเพิ่มขึ้นโดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.268

ผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ m มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนที่สุดกับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาติ ($Q_{1 \text{ min.}}/L$) ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาติเป็นหลัก โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาติ ($Q_{1 \text{ min.}}/L$) ในหน่วย kN/m เป็นดังนี้

$$m = -0.050 \ln \left(\frac{Q_{1 \text{ min.}}}{L} \right) + 0.224 \quad (5-1)$$



รูปที่ 5.9 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาติ ($Q_{1 \text{ min.}}/L$)



รูปที่ 5.10 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วย
ความยาวของเสาเข็มที่ 14 วัน ($Q_{14 \text{ days}} / L$)

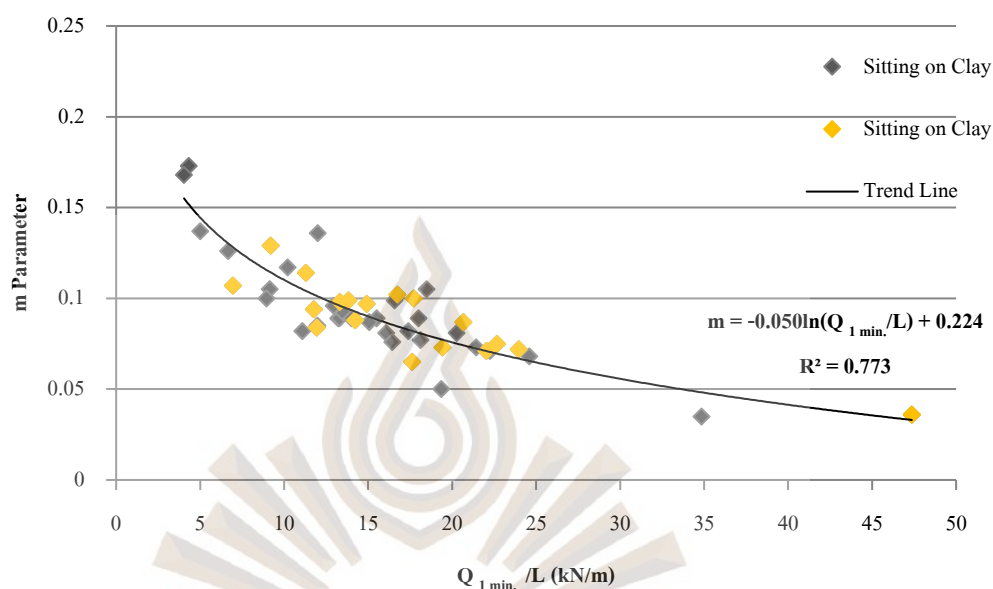
5.2.5 ผลการทดสอบของโซนของดินต่อค่าพารามิเตอร์ m

ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าค่าพารามิเตอร์ m ของโซนเหนือนี้อาจมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าของโซนตะวันออกเฉียงใต้และโซนตะวันตกเฉียงใต้ แต่รูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาที ($Q_{1 \text{ min}} / L$) ของโซนเหนืออยู่ในเส้นแนวโน้มเดียวกับของโซนอื่น จึงอาจสรุปได้ในเบื้องต้นว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาที ของแต่ละโซนมีเส้นแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ประเด็นนี้จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมให้มีจำนวนตัวอย่างในแต่ละโซนเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนต่อไป

5.2.6 ผลการทดสอบของชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มต่อค่าพารามิเตอร์ m

ผลของชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มว่าเป็นดินเหนียวหรือทรายต่อค่าพารามิเตอร์ m ถูกนำเสนอในรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 วันเหมือนกับรูปที่ 5.9 แต่จำแนกชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม โดยข้อมูลของเสาเข็มที่นั่งอยู่บนชั้นดินเหนียวถูกพล็อตด้วยจุดสีเทา ส่วนที่นั่งบนชั้นทรายถูกพล็อตด้วยจุดสีเหลือง จะเห็นว่า

ข้อมูลทั้งสองส่วนไม่มีการแยกแยะอย่างชัดเจน โดยทั้งสองส่วนกระจายอยู่บนเส้นแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มไม่มีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ m อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.11 กราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 วัน ($Q_{1 \text{ min.}}/L$) จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม

5.3 การประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบเสาเข็มที่เวลาต่างๆ ก่อนหน้า

การประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วันสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ 1) การประมาณโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ m และ 2) การประมาณโดยใช้ค่าสถิติของอัตราส่วนของกำลังที่ 14 วันต่อกำลังที่เวลาต่างๆ ก่อนหน้า รายละเอียดของวิธีการทั้งสองมีดังต่อไปนี้

5.3.1 การประมาณกำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ m

ในการประมาณกำลังที่ 14 วันโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ m มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

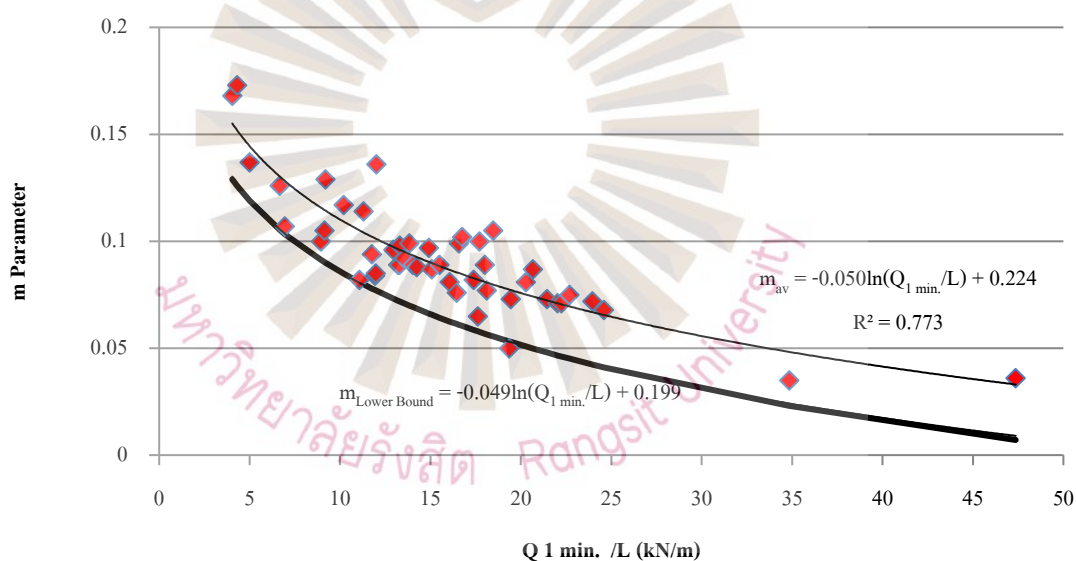
- 1) ทำการทดสอบกำลังของเสาเข็มที่ 1 นาที และคำนวณหาค่ากำลังต่อหน่วยความยาว ($Q_{1 \text{ min.}}/L$)

- 2) ใช้สมการที่ 5-1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ m
- 3) ใช้สมการที่ 2-2 คำนวณหาค่ากำลังที่ 14 วัน

ค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากสมการที่ 5-1 เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งในรูปที่ 5.9 แสดงว่าพารามิเตอร์ m มีค่าค่อนข้างกระจายกระจัดกระจาย ในกรณีที่ต้องการความมั่นใจว่ากำลังที่ 14 วันที่ประมาณจากค่าพารามิเตอร์ m จะไม่สูงเกินความเป็นจริง ค่า Lower Bound ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน LINEST ของโปรแกรม Excel และพล็อตในกราฟรูปที่ 5.12 รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค. โดยสมการของเส้น $m_{\text{Lower Bound}}$ คือ

$$m_{\text{Lower Bound}} = -0.049 \ln \left(\frac{Q_{1 \text{ min.}}}{L} \right) + 0.199 \quad (5-2)$$

โดย $(Q_{1 \text{ min.}}/L)$ มีหน่วยเป็น kN/m^2



รูปที่ 5.12 กราฟระหว่างค่า Lower bound ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ของค่าพารามิเตอร์ m กับค่ากำลังรวมต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่ 1 นาที ($Q_{1 \text{ min.}}/L$)

5.3.2 การประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน โดยใช้ค่าสถิติของอัตราส่วนของกำลังที่ 14 วัน ต่อกำลังที่เวลาต่างๆ

การประมาณค่ากำลังที่ 14 วัน จากค่ากำลังที่เวลาต่างๆ สามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังรวมที่ EOD, 1 นาที, 10 นาที, 2 ชั่วโมง และ 1 วัน ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4.7 และเพื่อความสะดวกของผู้อ่านดูนำเสนออีกครั้งในตารางที่ 5.4 ค่าต่ำสุดที่ความเชื่อมั่น 95% ในตารางนี้สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน ตัวอย่างเช่นหากมีผลการทดสอบกำลังที่ 10 นาที จะสามารถประมาณค่าต่ำสุดของกำลังที่ 14 วันโดยมีความเชื่อมั่นที่ 95% ได้โดยการคูณค่ากำลังที่ทดสอบได้ด้วย 1.41 เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าต่ำสุดที่ความเชื่อมั่น 95 % ของอัตราส่วนกำลังที่ 14 วัน ต่อ กำลังที่ EOD และที่ 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.04 และ 1.36 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าของที่ 10 นาที (1.41) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่ควรใช้กำลังที่ EOD และ 1 นาทีมาใช้ในการประมาณค่ากำลังที่ 14 วัน เพราะจะได้ค่ากำลังที่ค่อนข้างต่ำมาก ทำให้ไม่ประหยัด

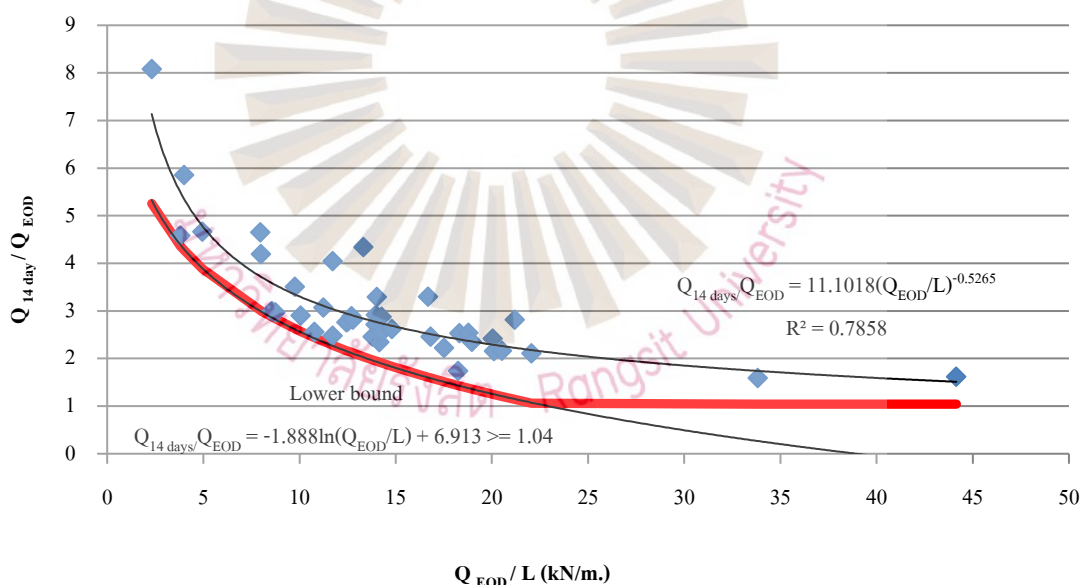
อย่างไรก็ตามการประมาณค่ากำลังที่ 14 วันโดยใช้ค่าต่ำสุดดังกล่าวข้างต้นอาจไม่ประหยัดเนื่องจากผลการทดสอบมีค่าค่อนข้างกระจาย ดังนั้นการศึกษานี้จึงเสนอแนวทางปรับปรุงวิธีการประมาณเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของกำลังที่ 14 วันต่อกำลังที่เวลาต่างๆ กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวของเสาเข็ม

ตารางที่ 5.4 ค่าสถิติของอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วัน ต่อกำลังที่เวลาต่างๆ

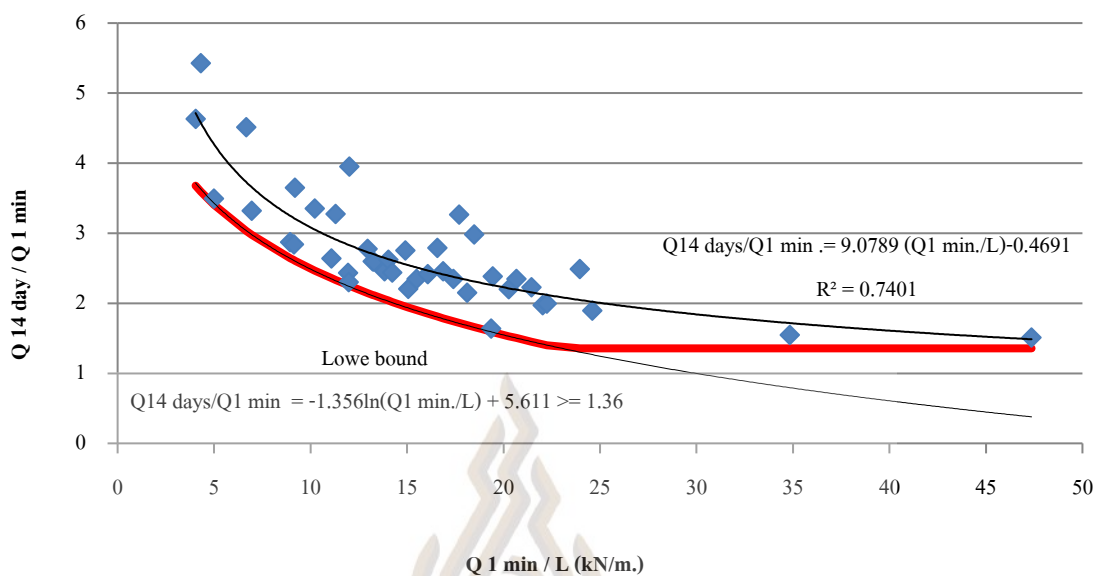
	ค่าเฉลี่ย AV.	ค่าความ เบี่ยงเบน มาตรฐาน SD.	ค่าสัมประสิทธิ์ ของการ แปรปรวน CV.	ค่าสูงสุด	ค่า ต่ำสุด	ค่าต่ำสุดที่ความ เชื่อมั่น 95%
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{\text{EOD}}$	3.07	1.21	0.39	8.08	1.59	1.04
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{1 \text{ min.}}$	2.73	0.82	0.30	5.43	1.51	1.36
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{10 \text{ mins.}}$	2.30	0.53	0.23	3.93	1.43	1.41
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{2 \text{ hrs.}}$	1.72	0.27	0.16	2.44	1.28	1.26
$Q_{14 \text{ days}}/Q_{1 \text{ day}}$	1.33	0.18	0.14	1.78	1.08	1.02

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังรวมของเสาเข็มที่ 14 วันต่อกำลังที่เวลา EOD, 1 นาที่, 10 นาที่, 120 นาที่ และ 1 วัน กับค่ากำลังของเสาเข็มต่อหน่วยความยาวแสดงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.17 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนกำลังมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อกำลังต่อหน่วยความยาวมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ m นอกจากนี้ในรูปยังแสดงเส้นสีแดงซึ่งเป็นเส้น Lower bound ที่ความเชื่อมั่น 95% เส้น Lower bound นี้ คำนวณจากค่าสถิติของเส้นแนวโน้มของข้อมูลด้วยฟังก์ชัน LINEST ของ โปรแกรม Excel โดยมีรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค. ทั้งนี้ค่า Lower bound ที่คำนวณด้วยวิธีข้างต้นต้องไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ความเชื่อมั่น 95% ของตารางที่ 5.4

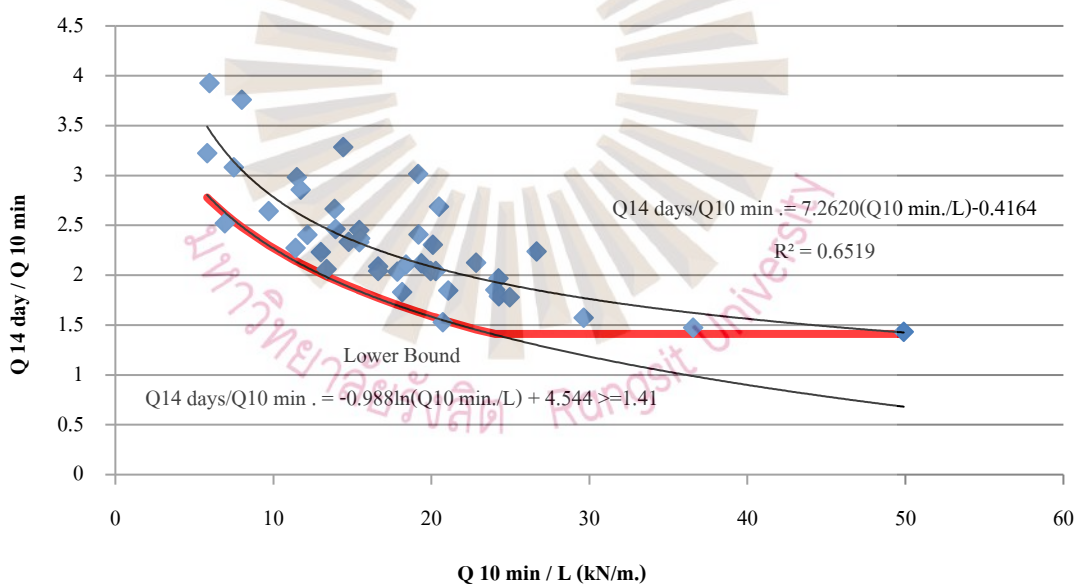
ถึงแม้ว่าค่า Lower bound ของกราฟในรูปที่ 5.13 ถึง 5.19 สามารถใช้ในการประมาณค่าต่ำสุดของกำลังที่ 14 วัน ที่ความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดสอบ ที่ EOD, 1 นาที่, 10 นาที่, 120 นาที่ และ 1 วัน แต่ในทางปฏิบัติการทดสอบกำลังควรกระทำที่ 10 นาที่ขึ้นไปเนื่องจากการทดสอบที่ EOD และที่ 1 นาที่ให้ผลที่ค่อนข้างกระจุกกระจาย และอาจมีความไม่แม่นยำของการควบคุมเวลา 1 นาที่หลังการตอกเสาเข็ม



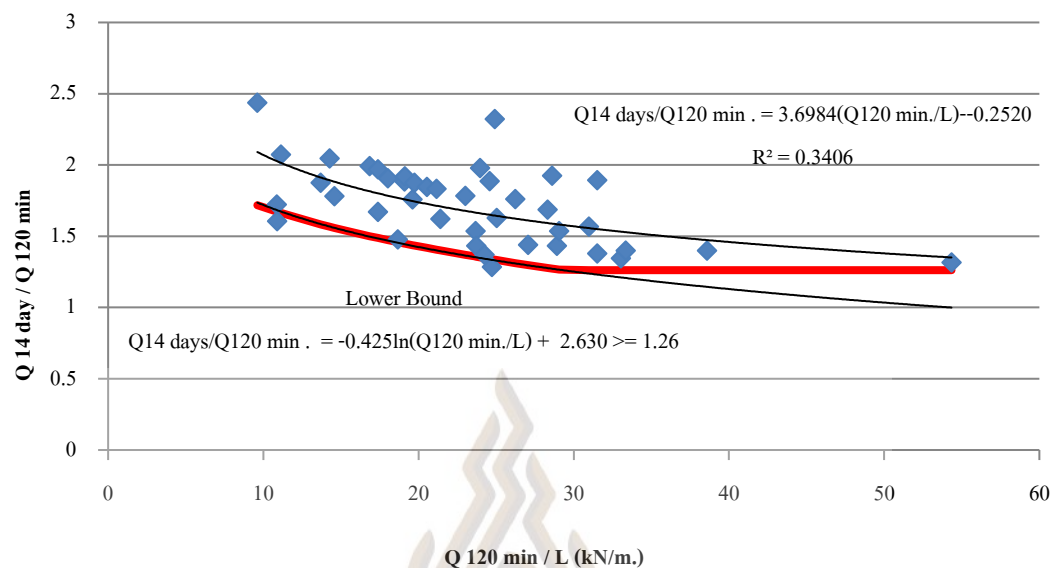
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วันต่อกำลังที่ EOD กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ EOD



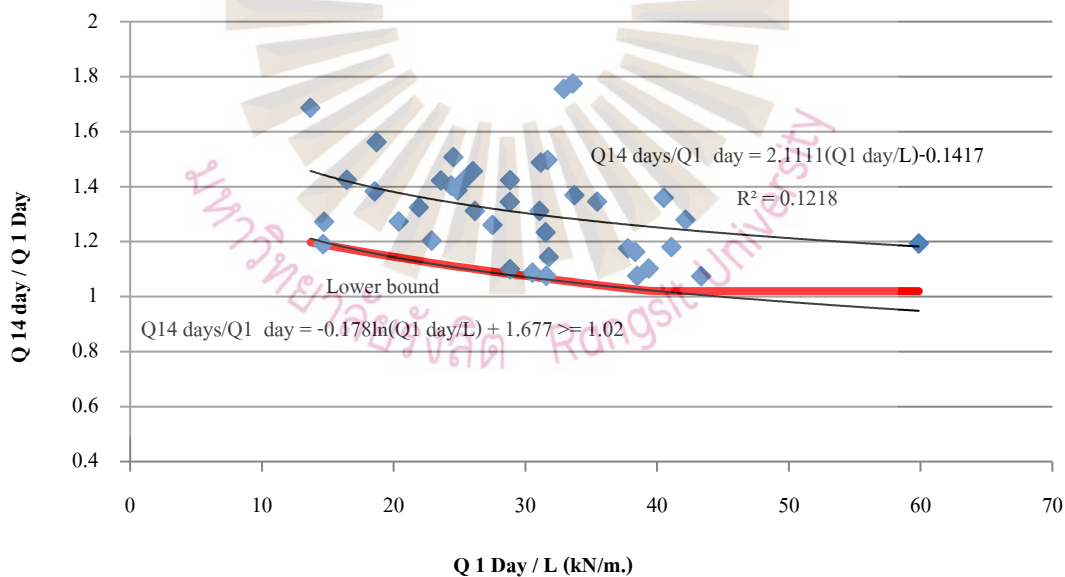
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วันต่อกำลังที่ 1 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 1 นาที



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วันต่อกำลังที่ 10 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 10 นาที



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วันต่อกำลังที่ 120 นาที กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 120 นาที



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของเสาเข็มรวมที่ 14 วันต่อกำลังที่ 1 วัน กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่ 1 วัน

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางการประมาณกำลังของเสาเข็มที่ 14 วันจากผลการทดสอบกำลังของเสาเข็มหลังการตอกแล้วใหม่ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการควบคุมการตอกเสาเข็มให้ได้กำลังระยะยาวที่ต้องการโดยไม่ต้องรอทิ้งระยะเวลา 7-14 วันก่อนทดสอบเสาเข็ม การศึกษายังรวมถึงการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเสาเข็มกับเวลา การศึกษาใช้การทดสอบกำลังแบบพลศาสตร์ของเสาเข็ม (Dynamic Pile Load Test) ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่เวลาต่างๆ รวมถึงที่เวลาสิ้นสุดการตอกเสาเข็ม (End of Driving, EOD) 1 นาที 10 นาที 2 ชั่วโมง 1 วัน และ 14 วันหลังการทดสอบ เสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มรูปตัวไอ ขนาด 0.22 เมตรมีจำนวนทั้งสิ้น 49 ต้น มีความยาวในช่วง 11-25 เมตร โดยพื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยแบ่งพื้นที่ศึกษาเป็นสามโซนประกอบด้วยโซนเหนือ โซนตะวันออกเฉียงใต้ และโซนตะวันตกเฉียงใต้ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน กำลังของเสาเข็มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากำลังที่ 1 นาทีในช่วง 1.5 - 5.4 เท่าตัว แรงเสียดทานด้านข้างที่ 14 วันสูงกว่า ที่ 1 นาที 1.6 - 7.1 เท่า และ แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ 14 วันสูงกว่า ที่ 1 นาที 1.1-4.0
- 2) ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลา ควรพิจารณาโดยใช้กำลังรวมของเสาเข็มเนื่องจากมีความแม่นยำกว่าการแยกพิจารณาเป็นการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานด้านข้างรวมกับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม
- 3) ขนาดของการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลาจะน้อยลงเมื่อกำลังต่อความยาวเสาเข็มที่ 1 นาทีมีค่าสูงขึ้น
- 4) กราฟระหว่างกำลังกับลอการิทึมของเวลามีลักษณะเป็นโค้งหงายโดยมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{Q}{Q_{1 \text{ min.}}} = t^m$$

เมื่อ	Q	คือกำลังที่เวลาใดๆ
	$Q_{1 \min}$	คือกำลังที่ 1 นาที
	t	คือเวลาเป็นนาที
	m	คือค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังต่อหน่วยความยาวที่นาที ($Q_{1 \min}/L$) ในหน่วย kN/m ดังนี้

$$m_{\text{LowerBound}} = -0.049 \ln\left(\frac{Q_{1 \min}}{L}\right) + 0.199$$

เมื่อ L คือความยาวของเสาเข็มเป็นเมตร

สมการข้างต้นสามารถใช้ได้กับดินทั้งสามโซนพื้นที่ของกรุงเทพ และสามารถเข้ากับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวและชั้นทราย

5) กำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน สามารถคำนวณด้วยค่าความมั่นใจ 95 % จากกำลังของเสาเข็มที่ทดสอบที่ 10 นาที หรือ 120 นาที หรือ 1 วัน หลังจากตอกเสาเข็มจากสมการต่อไปนี้

$$\frac{Q_{14 \text{ days}}}{Q_{10 \min.}} = -0.988 \ln\left(\frac{Q_{10 \min.}}{L}\right) + 4.544 \geq 1.41$$

$$\frac{Q_{14 \text{ days}}}{Q_{120 \min.}} = -0.425 \ln\left(\frac{Q_{120 \min.}}{L}\right) + 2.630 \geq 1.26$$

$$\frac{Q_{14 \text{ days}}}{Q_{1 \text{ day.}}} = -0.178 \ln\left(\frac{Q_{1 \text{ day.}}}{L}\right) + 1.677 \geq 1.02$$

เมื่อ	$Q_{14 \text{ days}}$	คือกำลังของเสาเข็มที่ 14 วันในหน่วย kN
	$Q_{10 \min}$	คือกำลังของเสาเข็มที่ 10 นาทีในหน่วย kN
	$Q_{120 \min}$	คือกำลังของเสาเข็มที่ 120 นาทีในหน่วย kN
	$Q_{1 \text{ day}}$	คือกำลังของเสาเข็มที่ 1 วันในหน่วย kN
	L	คือความยาวของเสาเข็มเป็นเมตร

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษานี้ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอขนาด 0.22 เมตรตอกในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล การใช้ข้อสรุปดังกล่าวข้างต้นกับเงื่อนไขอื่นที่แตกต่างไปอาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม



บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). *มาตรฐานการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ Dynamic Load Test และตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Seismic Test* (มยผ. 1252-51 และ มยผ. 1551-51). กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- มิรินทร์ กลั่นสอน. (2564). *การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ* (Unpublished Senior Project). มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี
- Augustesen, A., Andersen, L., & Carsten S. Sørensen, C. S. (2005). *Time Function for Driven Piles in Clay*. AAU Geotechnical Engineering Papers. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Axelsson, G. (1998). Long-term set-up of driven piles in non-cohesive soils evaluated from dynamic tests on penetration rods. In P. K. Robertson & P. W. Mayne (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Site Characterization* (pp.895-900). Brookfield, VT: Balkema.
- Axelsson, G. (2000). *Long-term set-up of driven piles in sand* (Doctoral dissertation, Royal Institute of Technology). Retrieved from <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8755&dswid=-5006>
- Axelsson, G. (2002). A conceptual model of pile set-up for driven piles in non-cohesive soil, deep foundations congress. *Geotechnical Special Publication*, 116(1), 64-79.
- Bullock, P. J. (1999). *Pile Friction Freeze: A Field and Laboratory Study, Volume 1* (Doctoral dissertation, University of Florida). Retrieved from <https://trid.trb.org/view/497227>
- Bullock, P. J. (2008, March). The easy button for driven pile setup: Dynamic testing. In E. L. James, K. C. David & H. H. Mohamad (Eds.), *Symposium Honoring Dr. John H. Schmertmann for His Contributions to Civil Engineering at Research to Practice in Geotechnical Engineering*, Gainesville, FL.
- Burger, J. M. & Blair, G. W. S. (1949). *Report of the Principles of Rheological Nomenclature*. Amsterdam: North-Holland.
- Camp III, W. M., Wright, W. B. & Hussein, M. (1993, October). The effect of overburden of pile capacity in a calcareous marl. *Proceedings of 18th Annual Members' Conference, Deep Foundations Institute*, Englewood Cliffs, N.J

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Camp III, W. M., & Parmar, H. S. (1999). Characterization of pile capacity with time in the Cooper Marl: A study of the applicability of a past approach to predict long-term pile capacity. *Transportation Research Record*, 1663(1), 1-19.
- Chow, F. C., Jardine, R. J., Brucy, F., & Nauroy, J. F. (1998). Effects of time on capacity of pipe piles in dense marine sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124(3), 254-264.
- Gravare, C. J., Goble, G. G., Rausche, F. & Linkins, G. (1980, March). Pile driving construction control by the CASE method. *Ground Engineering*, 1980(March), 20-25. Retrieved from <https://cdn.ca.emap.com/wp-content/uploads/sites/13/1980/03/GE-March-1980-Pile-driving-construction-control-by-the-Case-method.pdf>
- High Strain Dynamic Pile Testing. Test procedure, method statement template.* (2020). Retrieved April 18, 2023, from <https://www.civil-engineers-2020.com/2020/08/high-strain-dynamic-pile-testing-test.html>
- Karlsrud, K., Clausen, C. J. F. & Aas, P. M. (2005). Bearing capacity of driven piles in clay, the NGI approach. In Gourvenec & Cassidy (Eds.), *Proceedings of in Offshore Geotechnics: ISFOG 2005* (pp.775-782), Perth, Taylor & Francis Group.
- Khan L.I., & Decapite, K. (2011). *Prediction of Pile Set-Up for Ohio Soils*. Cleveland, OH: Ohio. Dept. of Transportation.
- Komurka, V. E., Wagner, A. B., & Edil, T. B. (2003). *Estimating Soil/Pile Set-Up*. Madison, WI: Wisconsin Highway Research Program.
- Lee W., Kim D., Salgado R. & Zaheer M. (2010). Setup of driven piles in layered Soil. *Soils and Foundations*, 50(5), 585-598.
- Long, J. H., Kerrigan, J.A., & Wysockey, M. H. (1999). Measured time effects for axial capacity of driven piling. *Journal of the Transportation Research Board*, 1663(1), 8-15.
- McVay, M. C., Schmertmann, J., Townsend, F. & Bullock, P. J. (1999). Pile friction freeze: A field and laboratory study. *Florida Department of Transportation*, 1(1), 192-195.
- Mitchell, J. K. (1960). Fundamental aspects of thixotropy in soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 86(3), 19-52.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Ng, K. W. (2011). *Pile Setup, Dynamic Construction Control, and Load and Resistance Factor Design of Vertically- Loaded Steel H-Piles* (Doctoral dissertations, Iowa State University). Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/38924416.pdf>
- Pestana, J. M., Hunt, C. E., & Bray, J. D. (2002). Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 128(1), 1-12.
- Randolph, M. F., Carter, J. P. & Wroth, C. P. (1979). Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation. *Géotechnique*, 29(4), 361-393.
- Schmertmann, J. H. (1991). The mechanical aging of soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117(9), 1288-1330.
- Skempton, A. W. & Northey, R. D. (1952). The sensitivity of clays. *Géotechnique*, 3(5), 30- 53.
- Skov, R. & Denver, H. (1988). Time dependence of bearing capacity of piles. In B. H. Fellenius (Ed.), *Proceeding of 3rd International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles* (pp.879-888). Vancouver, BC: BiTech Publishers.
- Soderberg, L. O. (1961). Consolidation theory applied to foundation pile time effects. *Géotechnique*, 11(3), 217-225.
- Svinkin, M. R., Morgano, C. M. & Morvant, M. (1994, June). *Pile capacity as a function of time in clayey and sandy Soils*. Proceeding of 5rd International Conference on Piling and Deep Foundations, Belgium.
- Svinkin, M. R. (1996). Set up and relaxation in glacial sand – discussion. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(4), 319-321.
- Svinkin, M.R. and Skov, R. (2000). Set-up effect of cohesive soils in pile Capacity, In S. Niyama & J Beim. (Eds), *Proceeding of 6th International Conference on the Application of Stress Waves Theory to Piles* (pp.107-111). Brazil: Balkema.
- Vesic , A. S. (1977). Design of pile foundations (Doctoral dissertation, Duke University). Retrieved from https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_42.pdf

บรรณานุกรม (ต่อ)

Wangmo, K. & Kuntiwattanakul, P. (2020, May). *Estimation of long term pile capacity from results of short term pile load tests*. RSU International Research Conference, Pathum Thani.

Yang, N. C. (1970). Relaxation of piles in sand and inorganic silt. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96(2), 395-409.



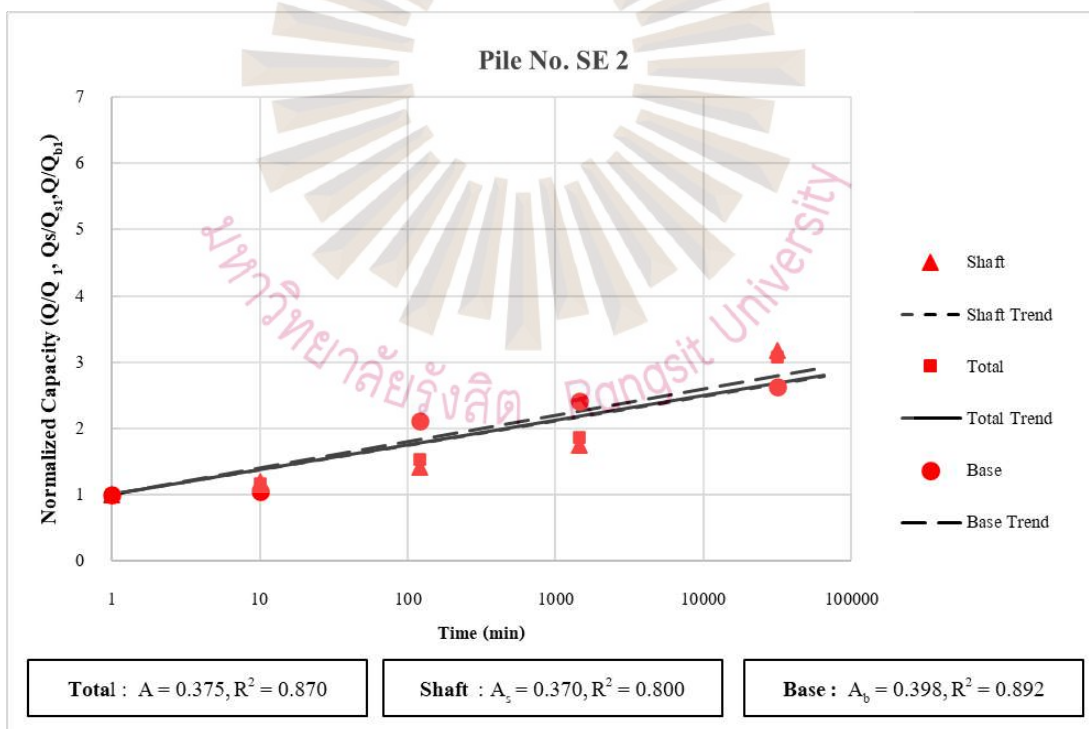
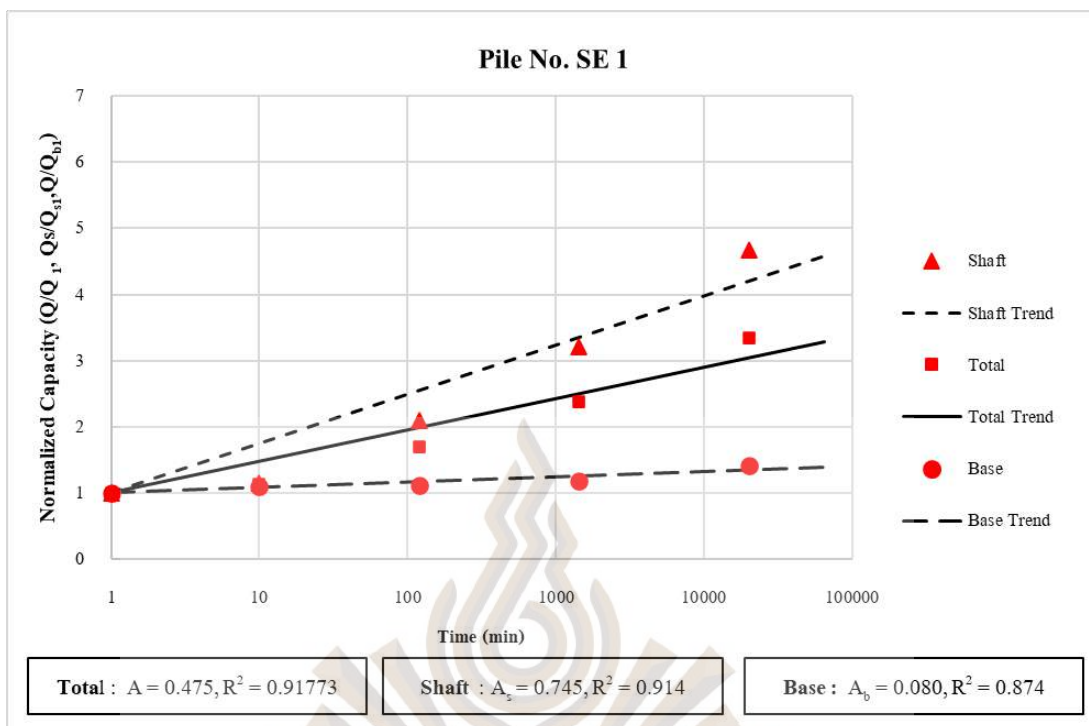
ภาคผนวก

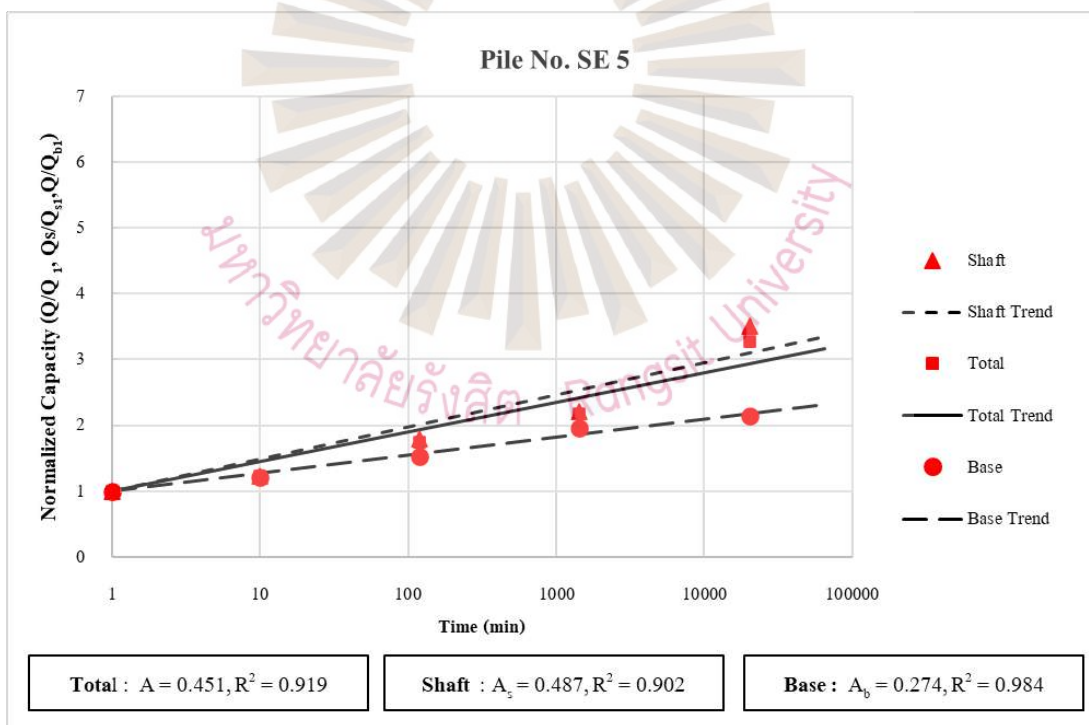
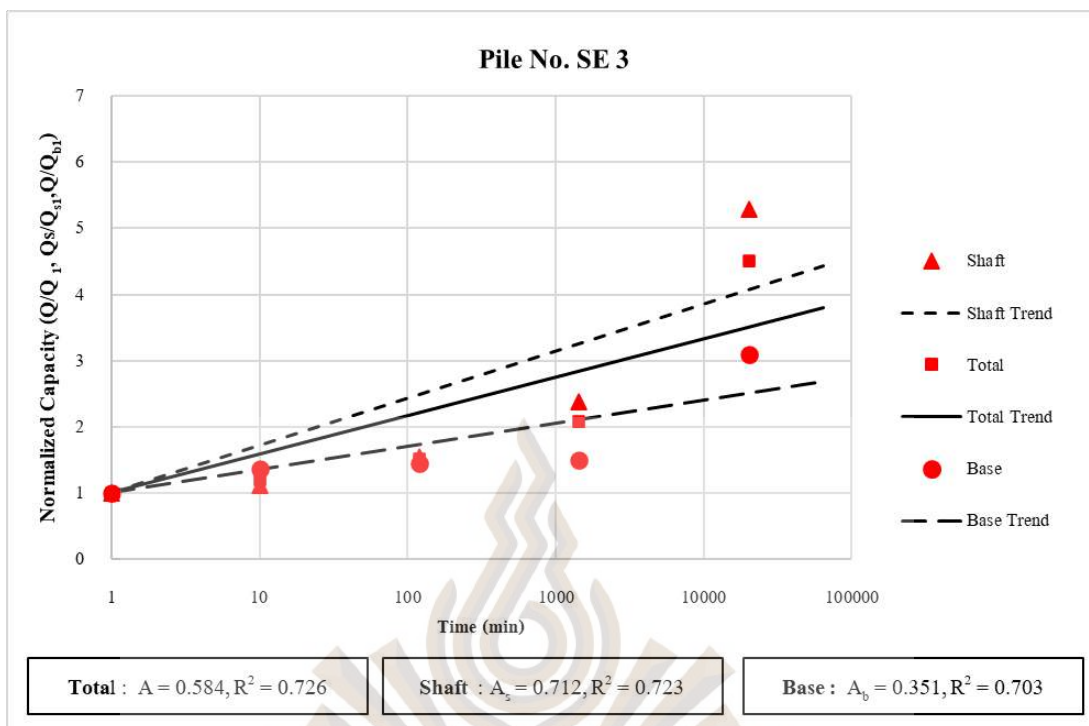


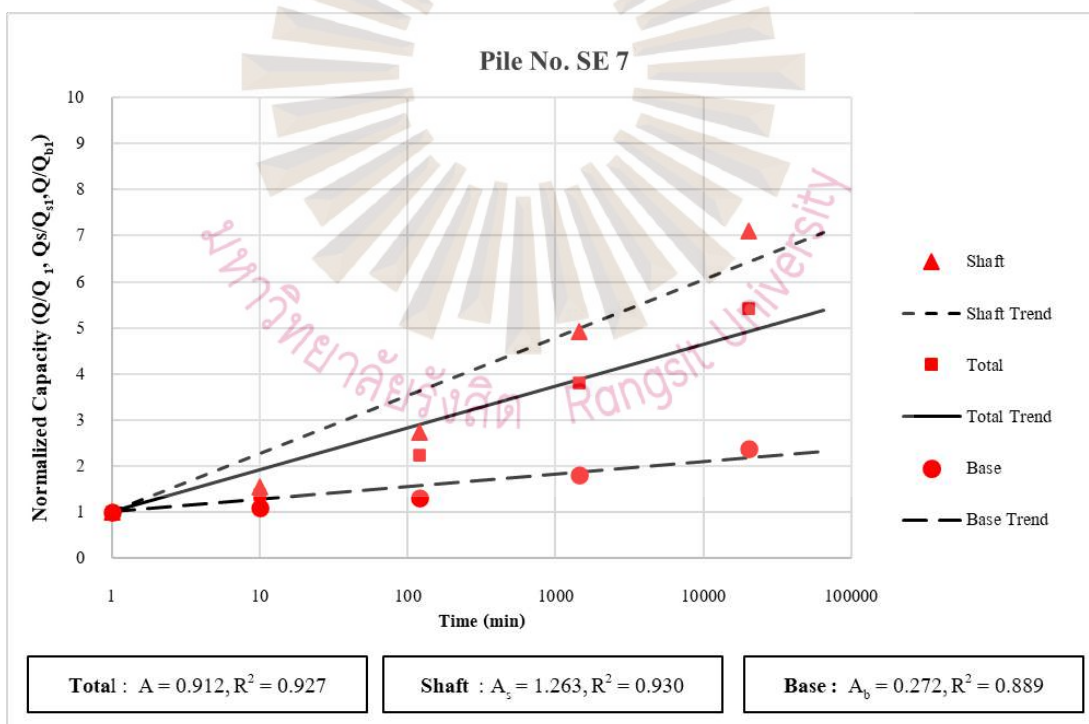
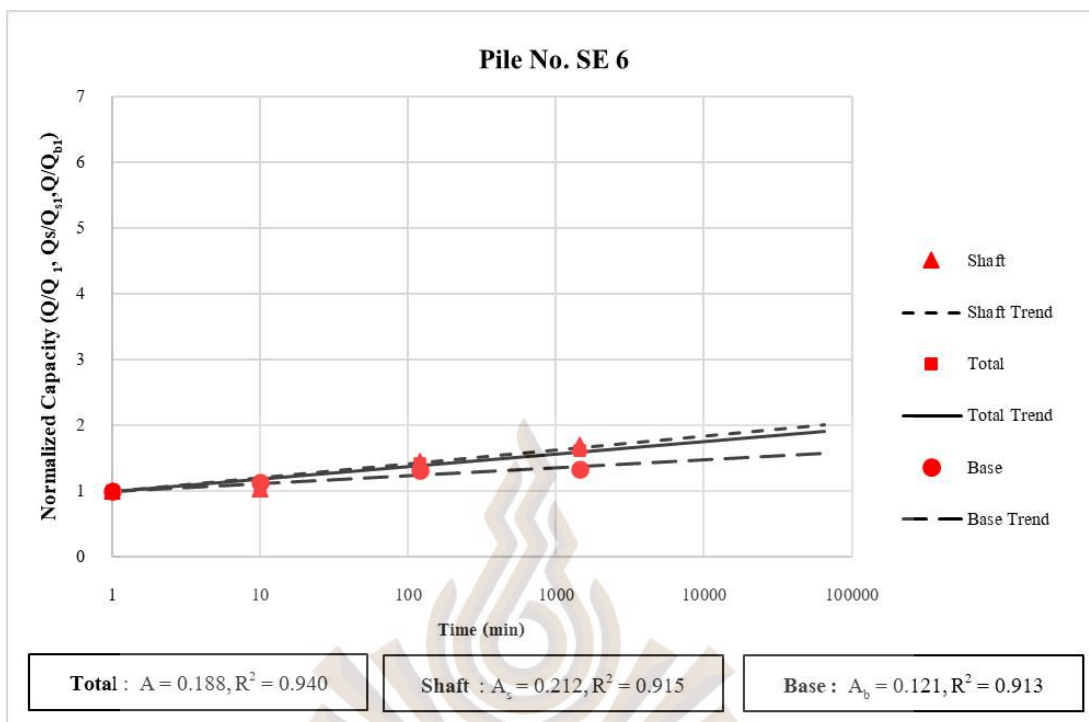
ภาคผนวก ก

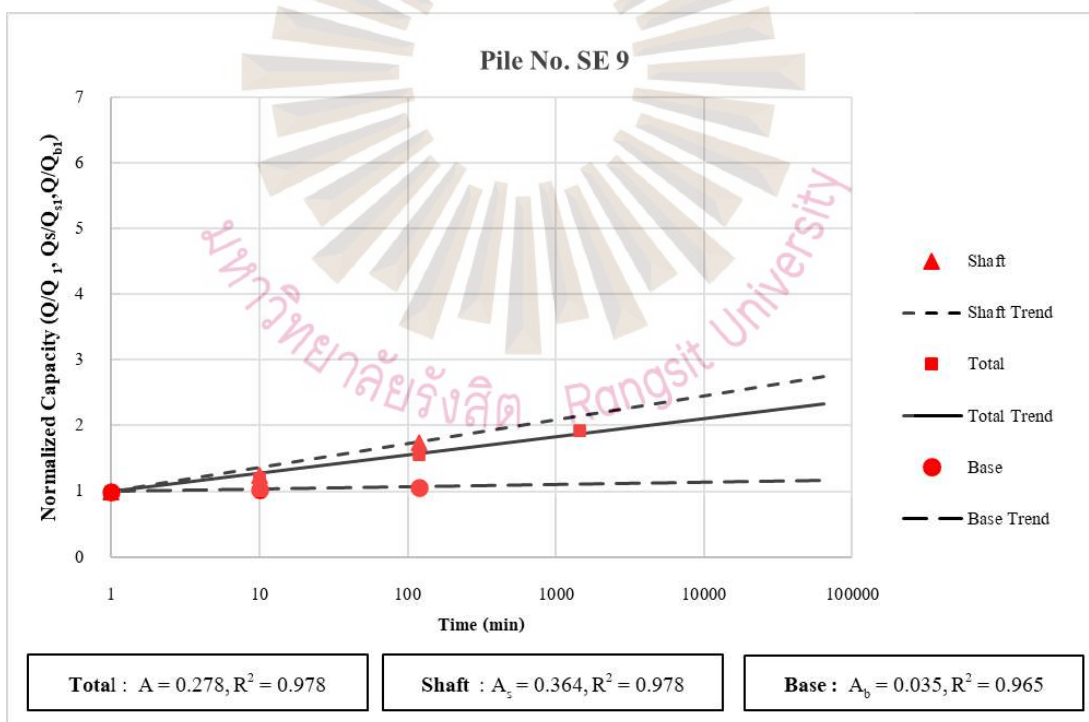
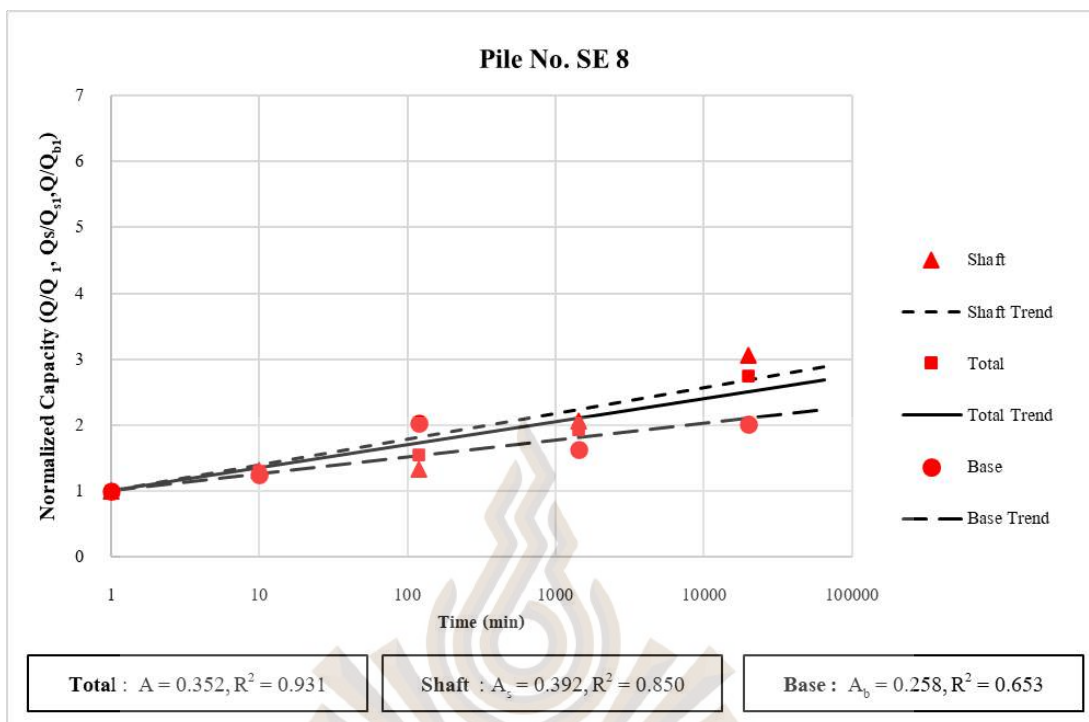
พารามิเตอร์ A สำหรับกำลังรวมของเสาเข็ม

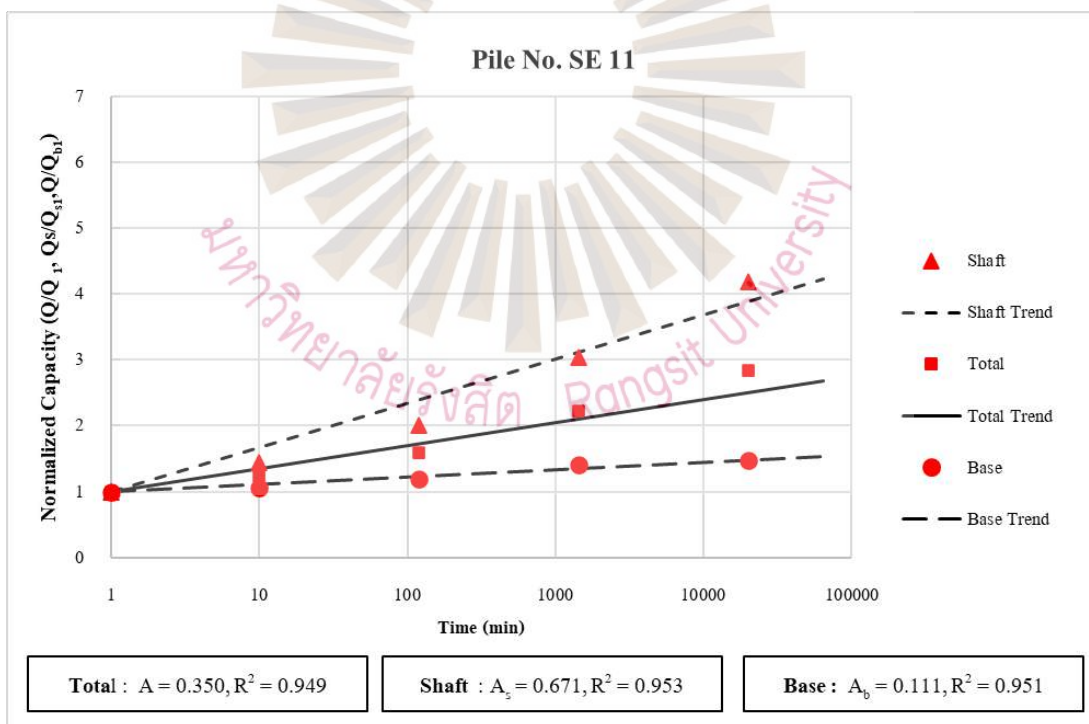
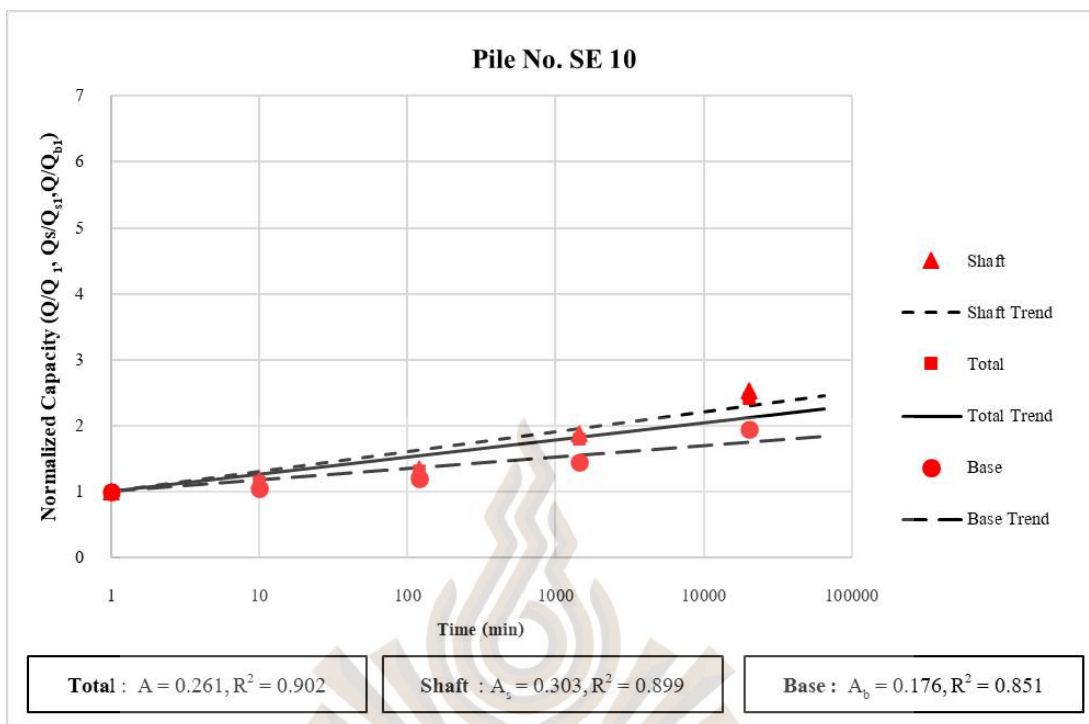
มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

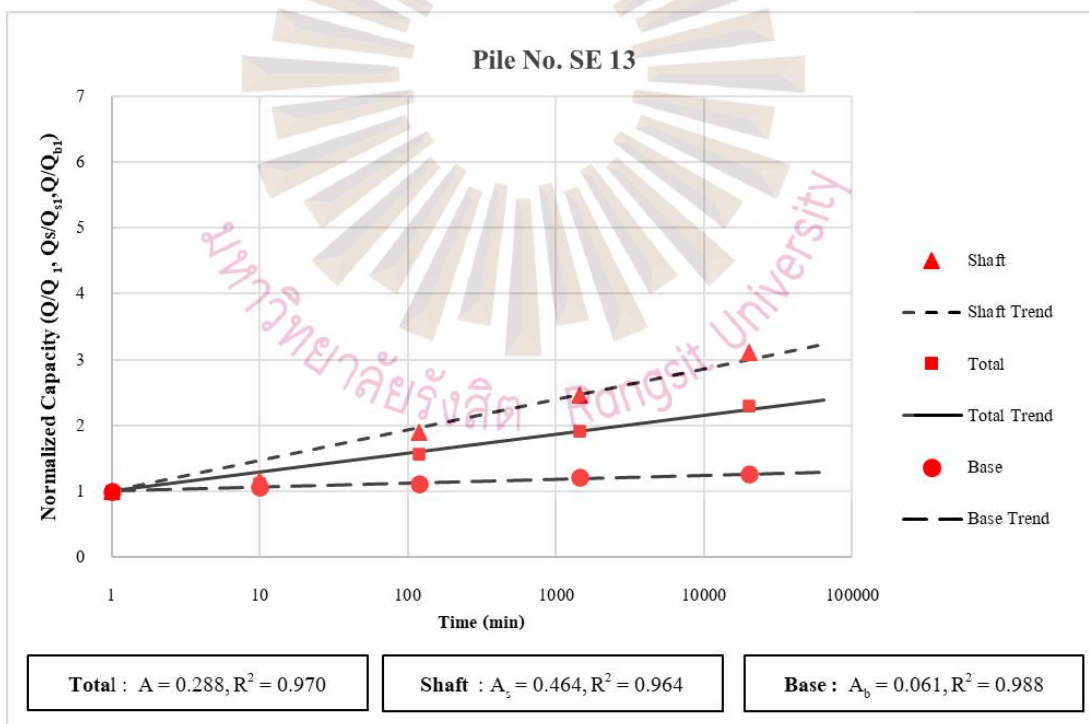
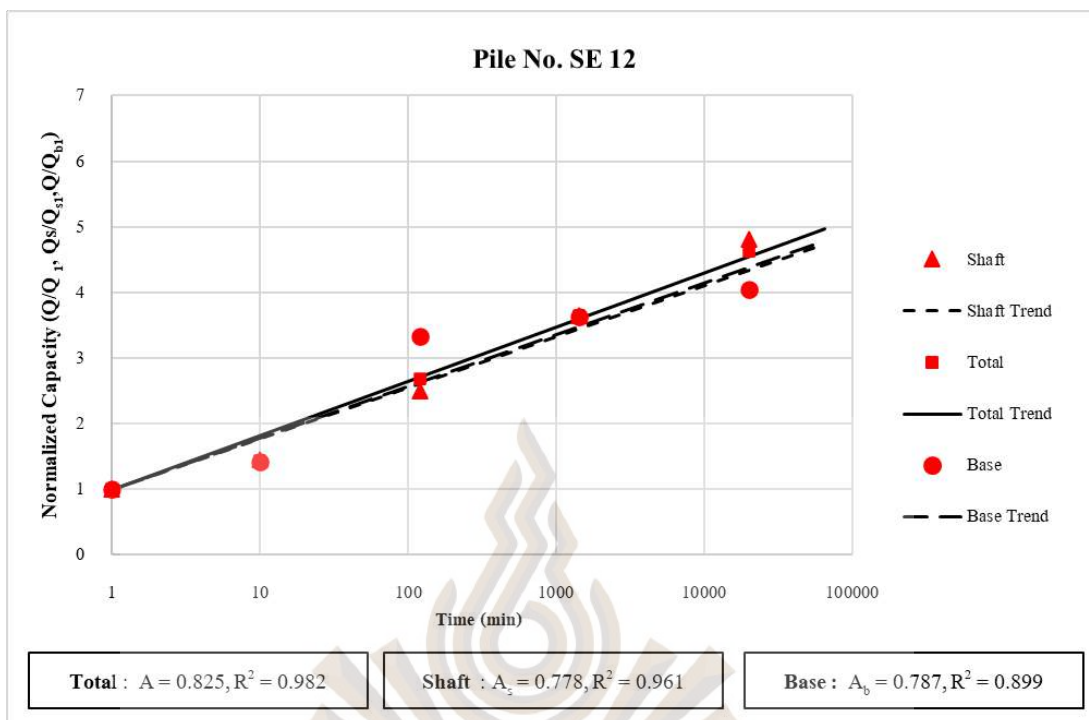


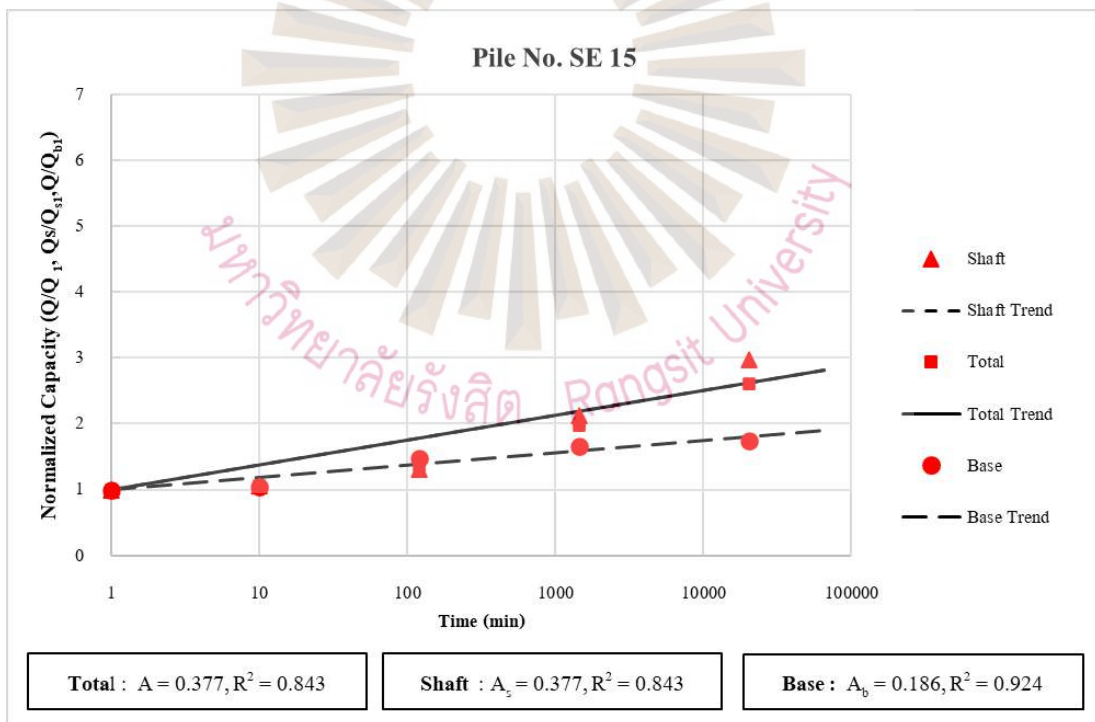
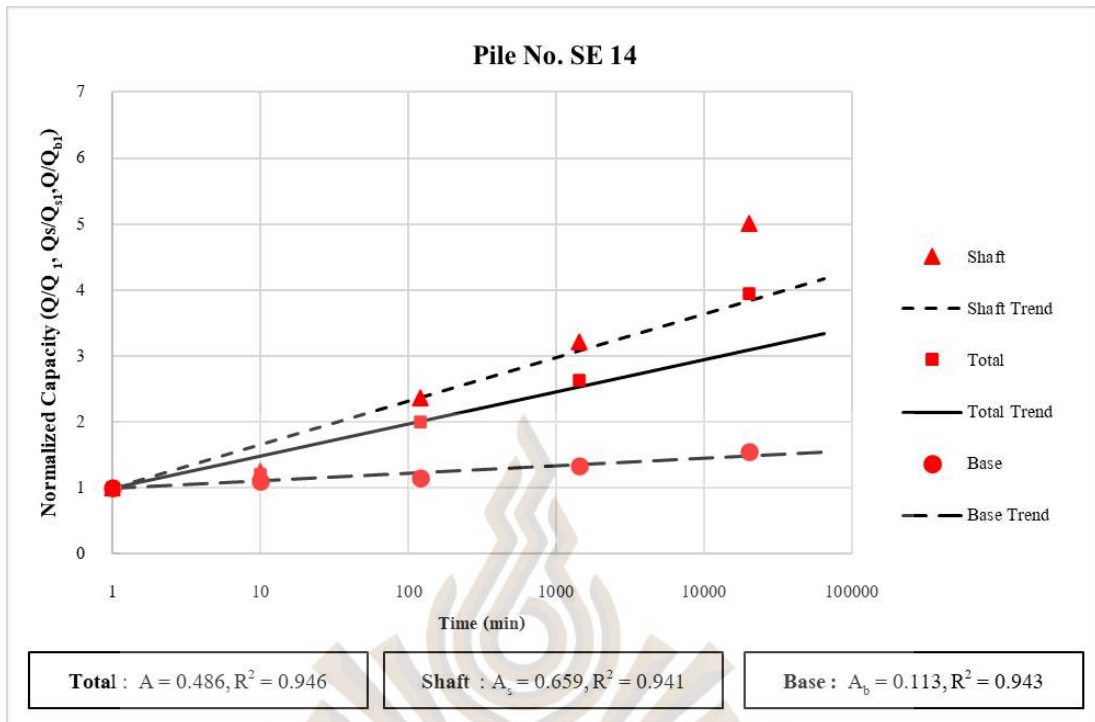


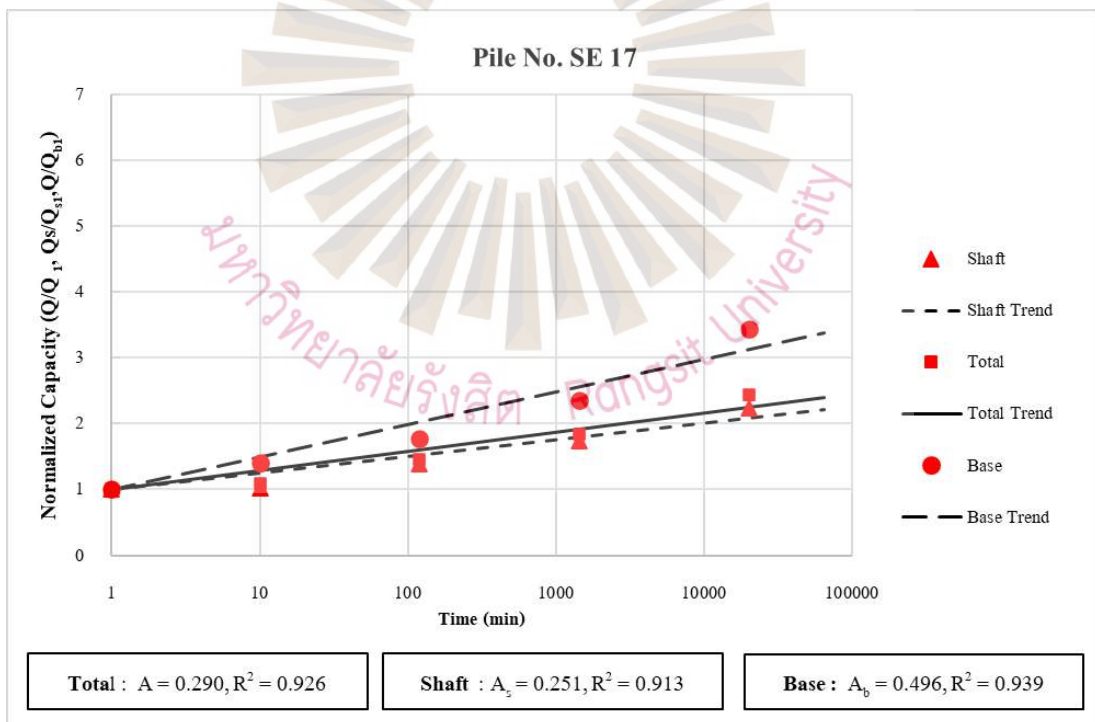
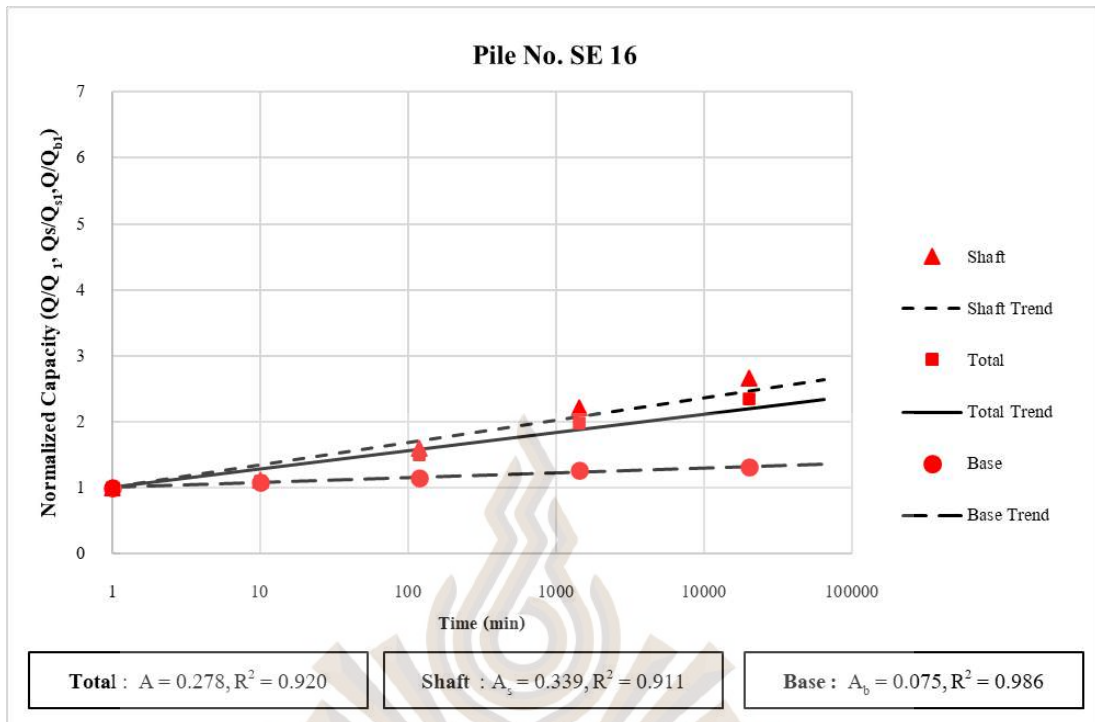


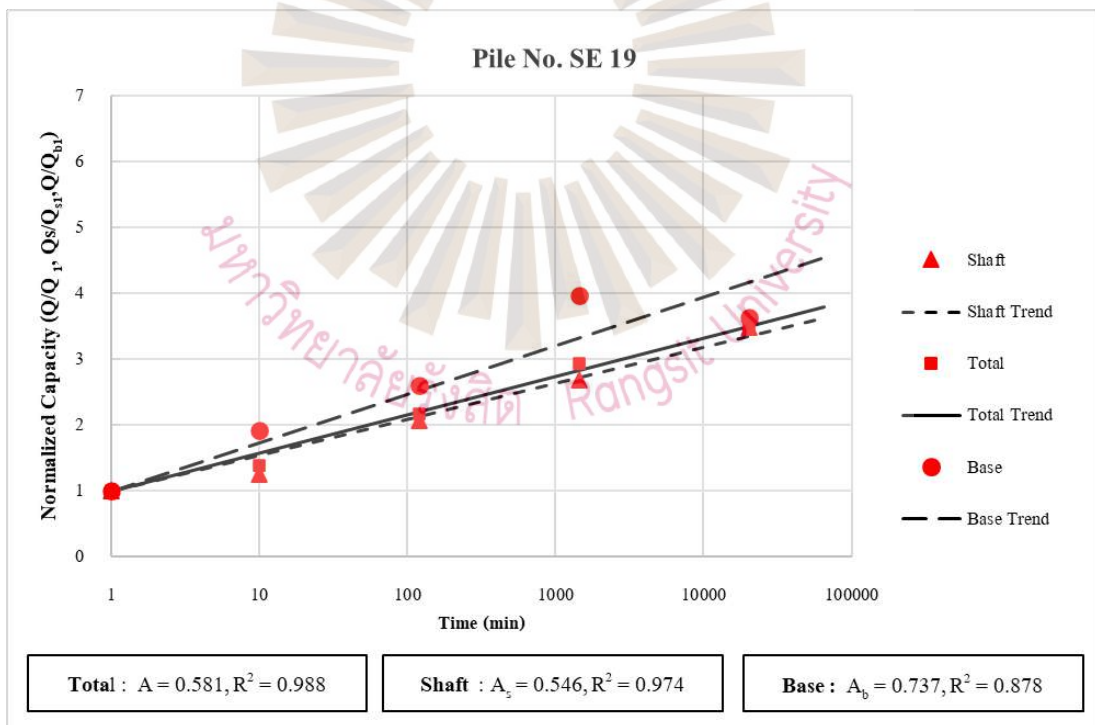
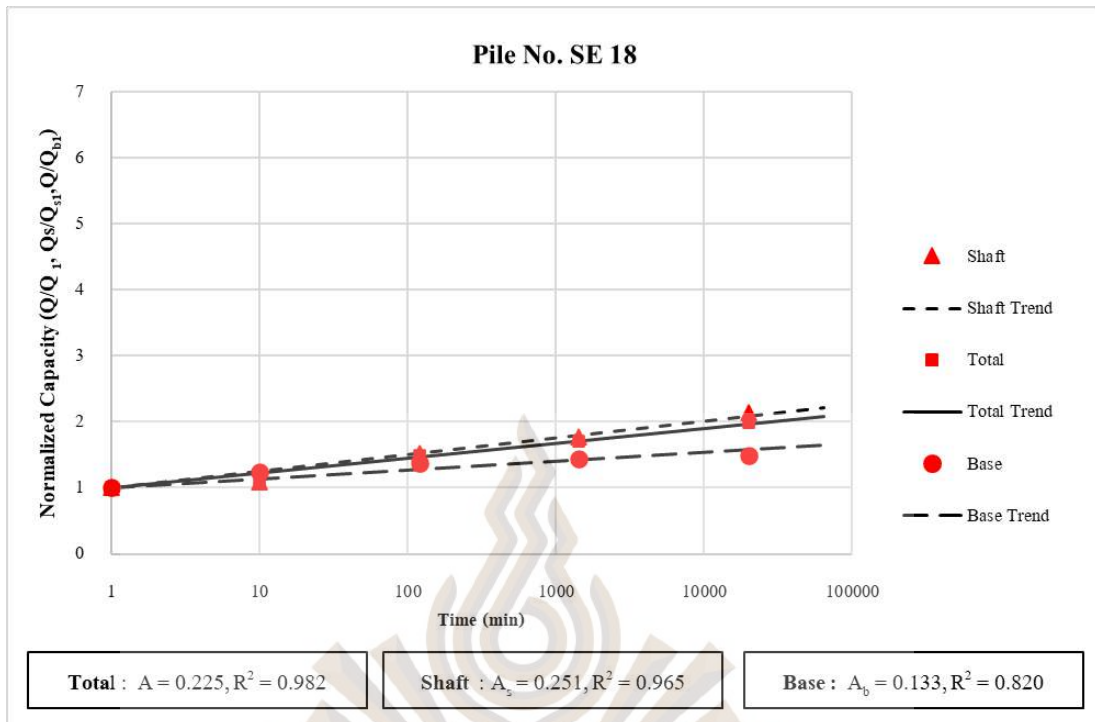


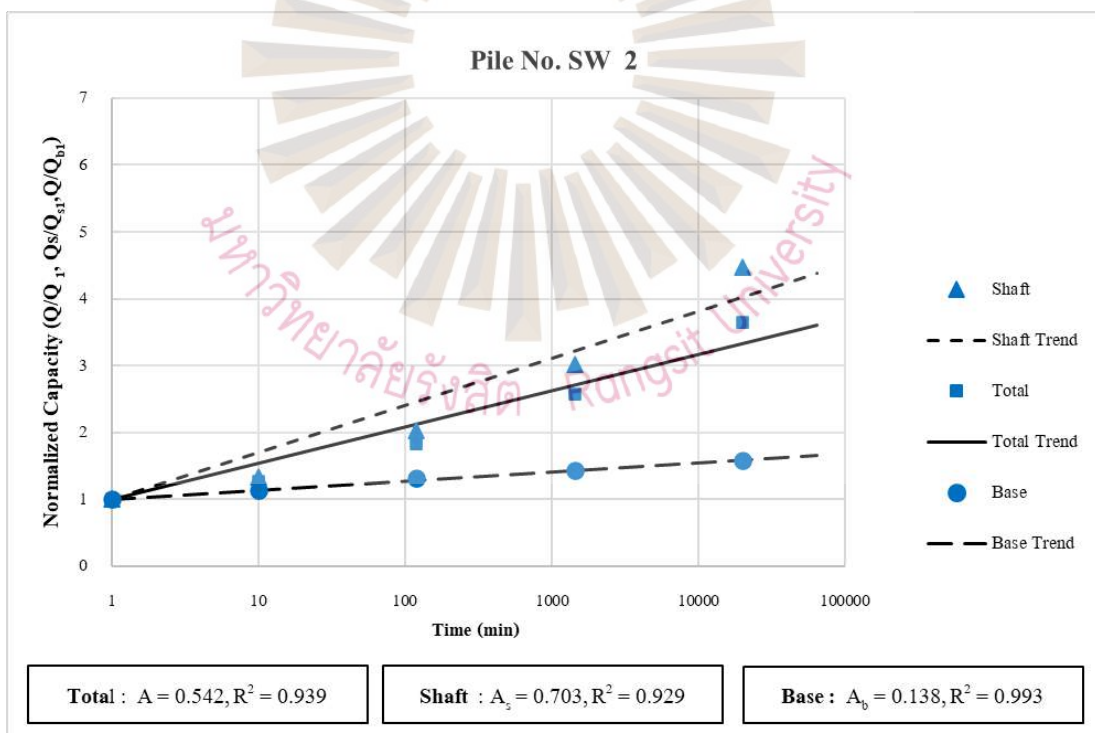
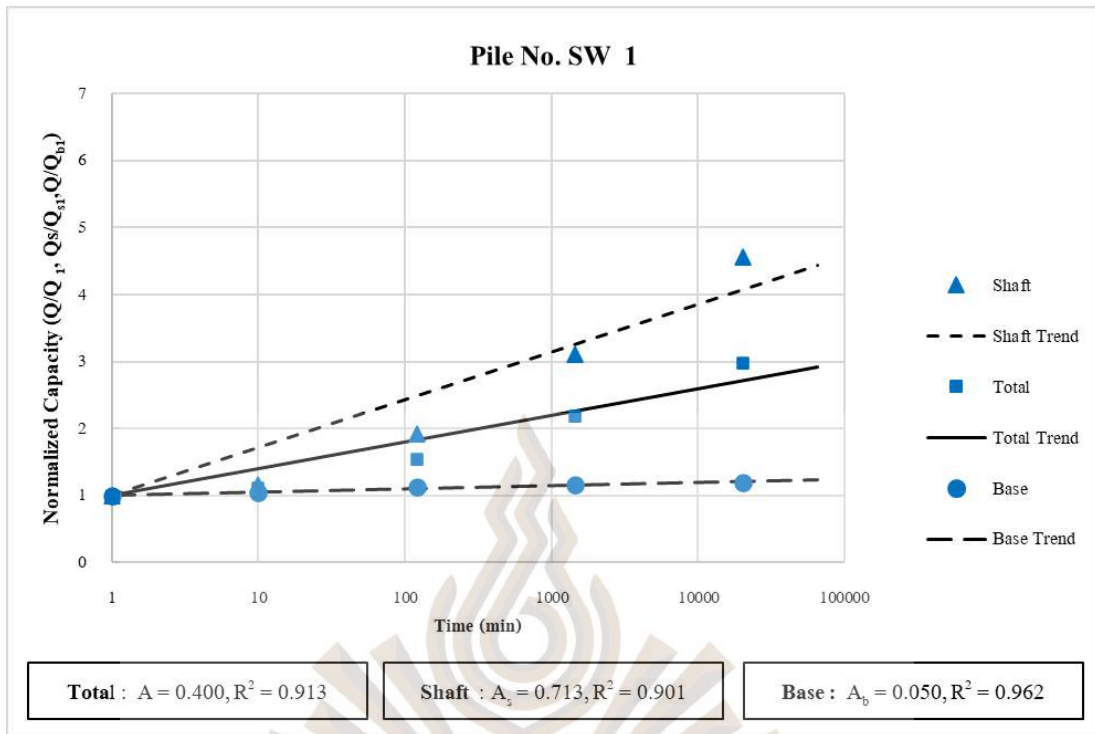


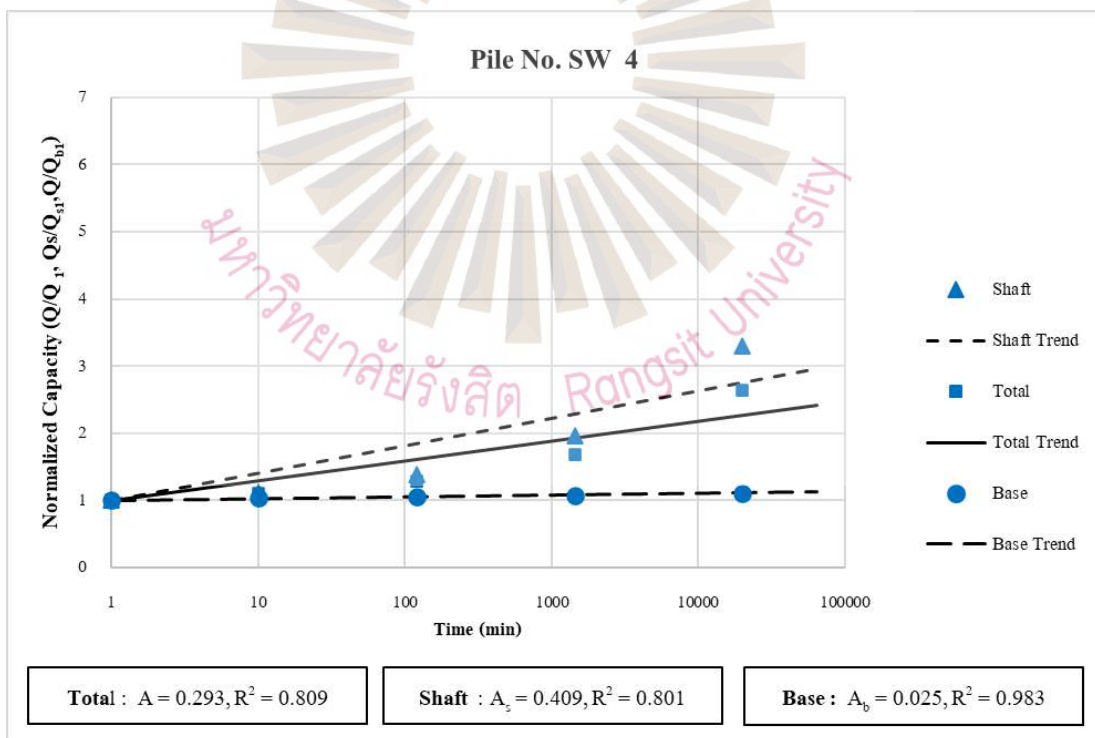
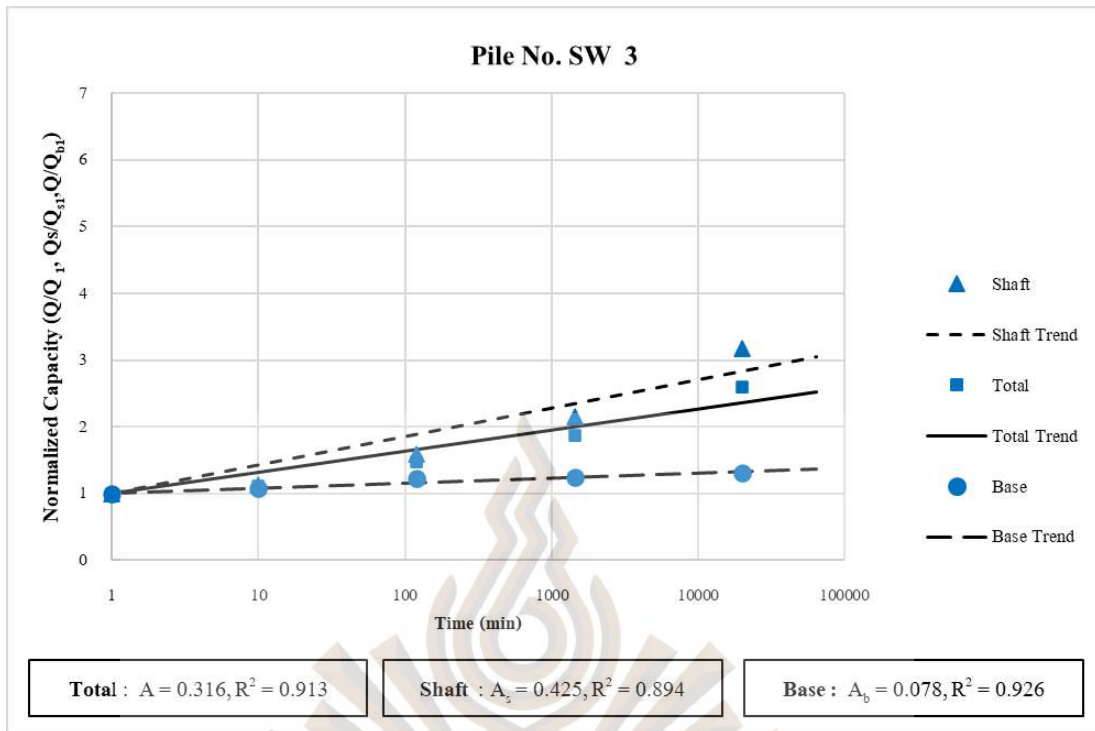


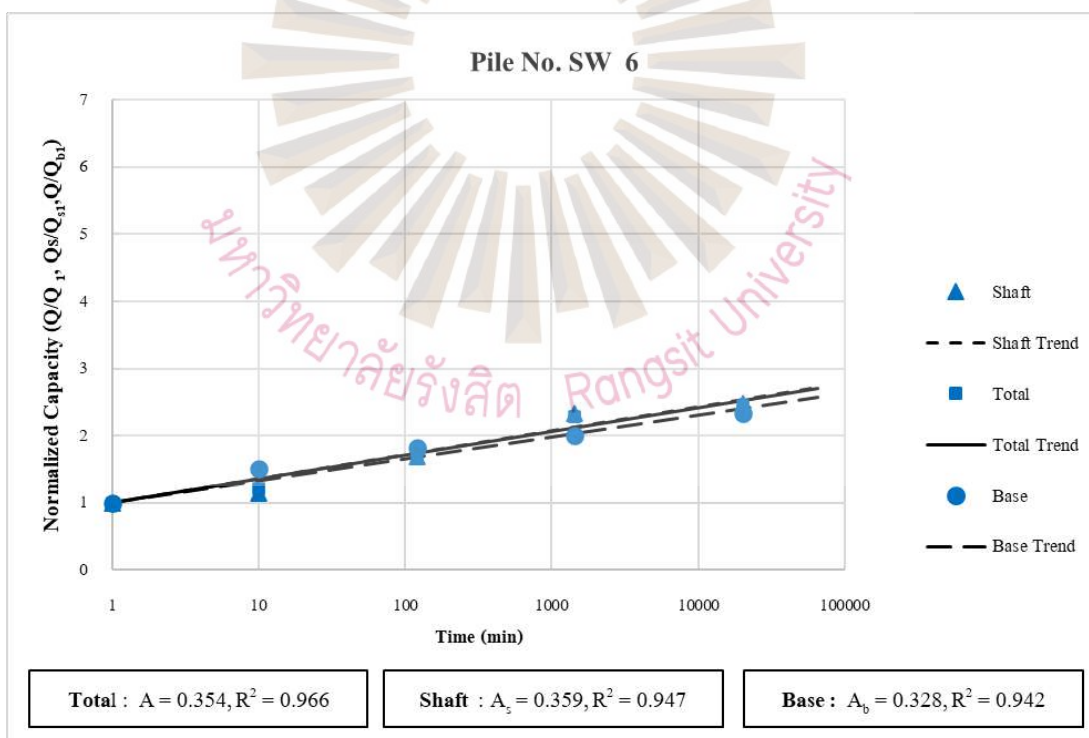
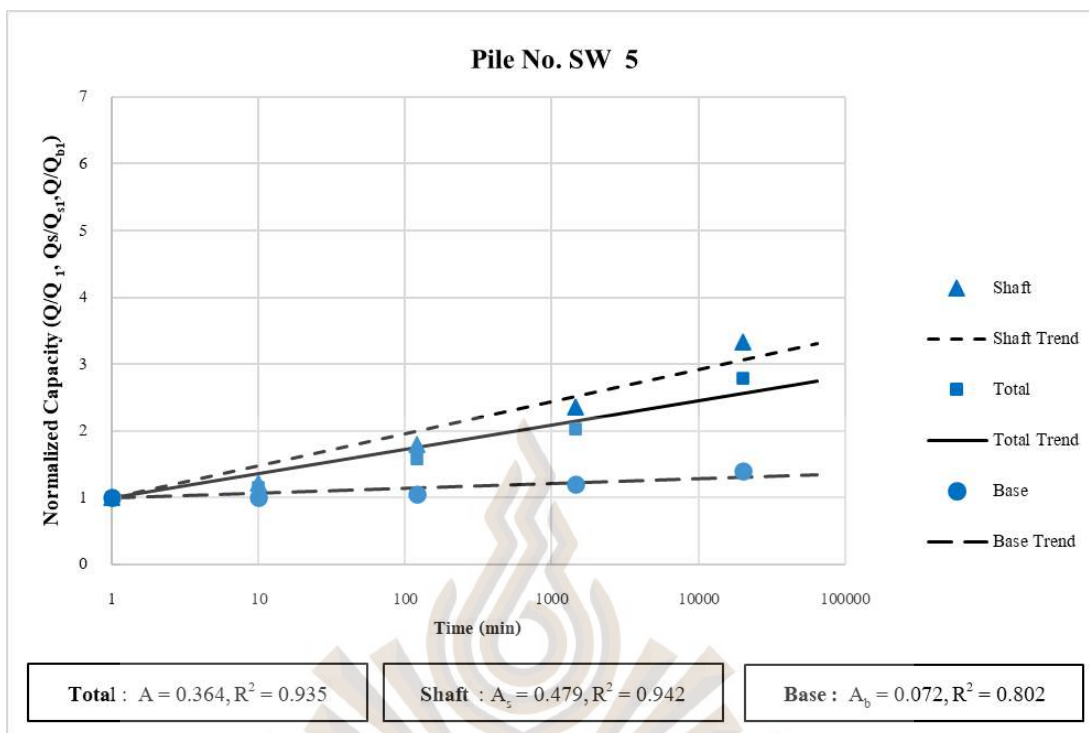


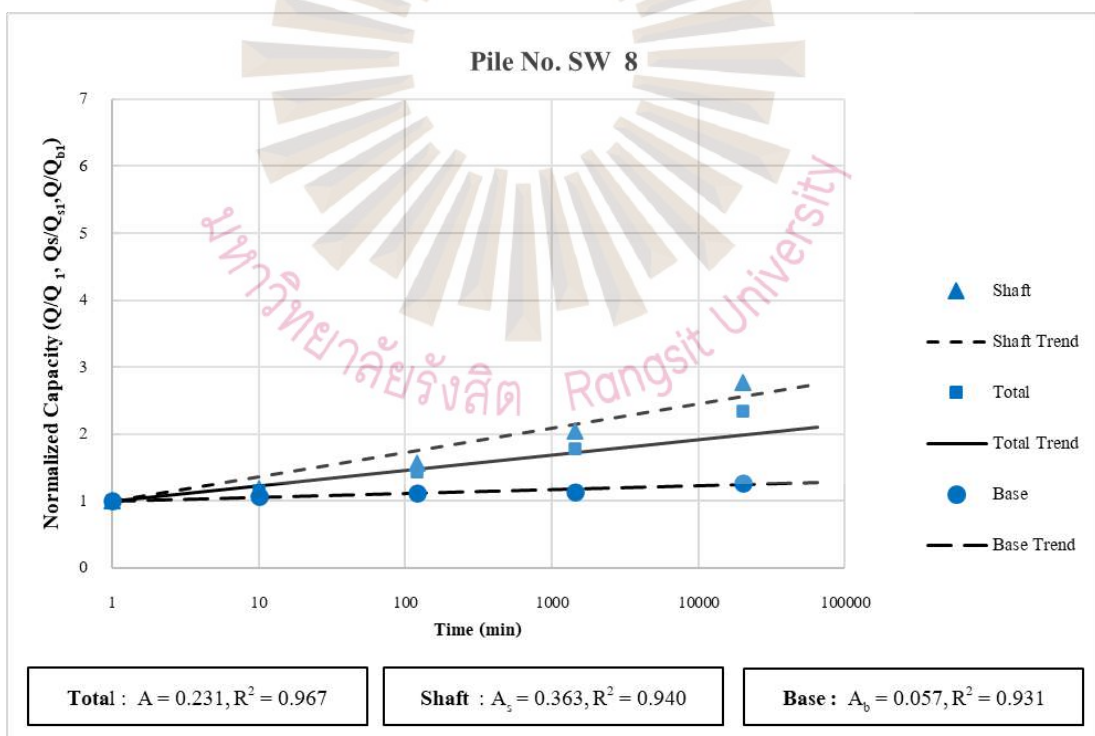
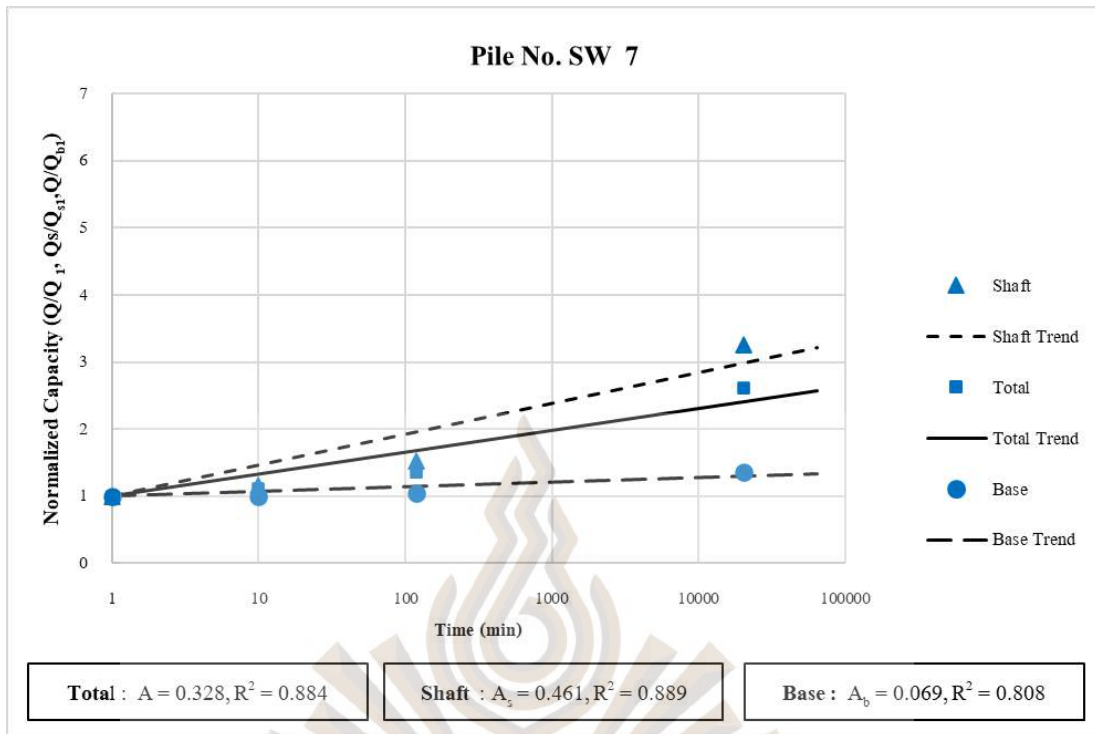


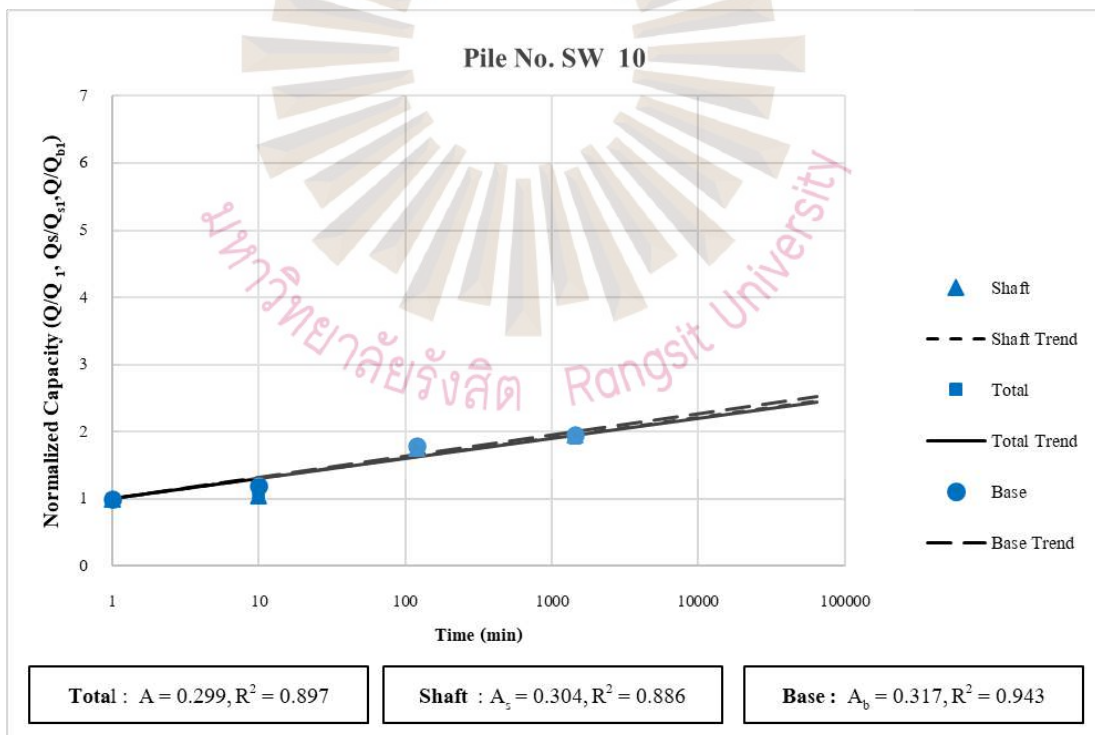
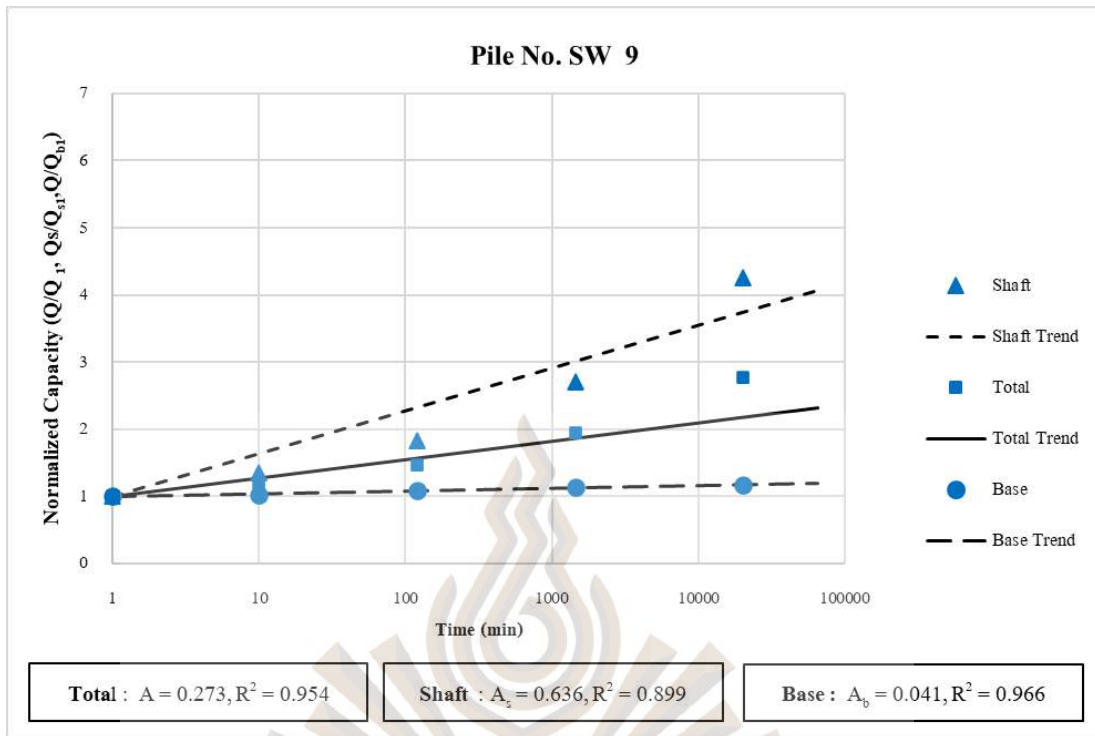


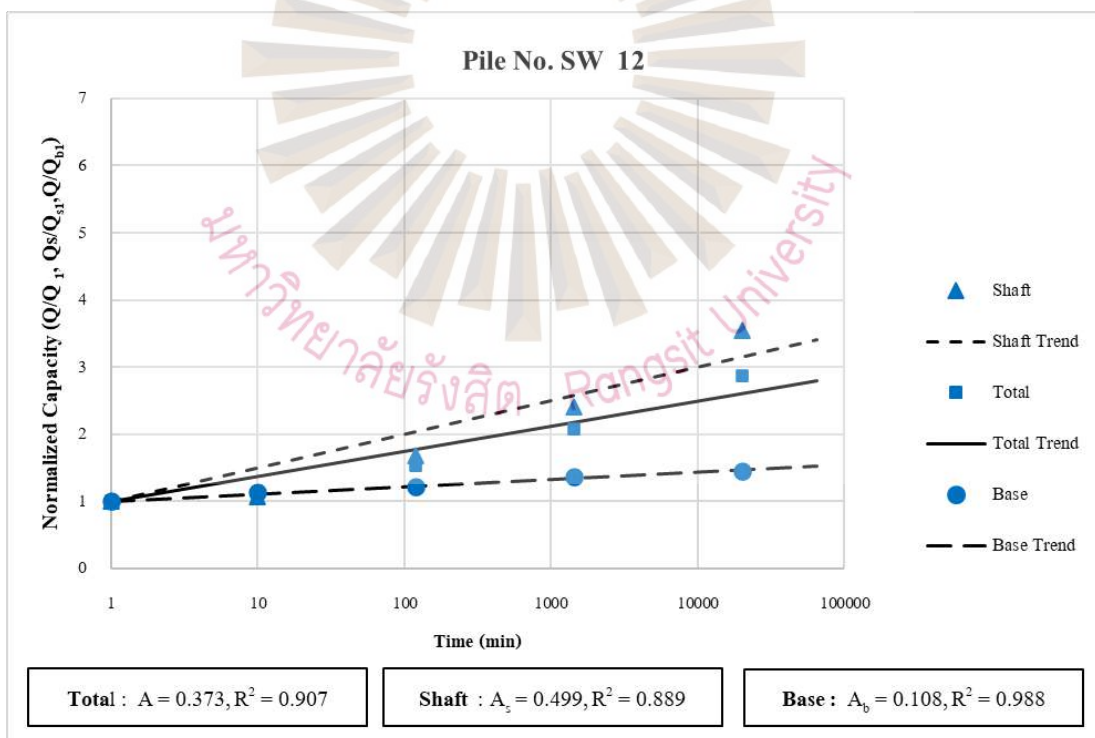
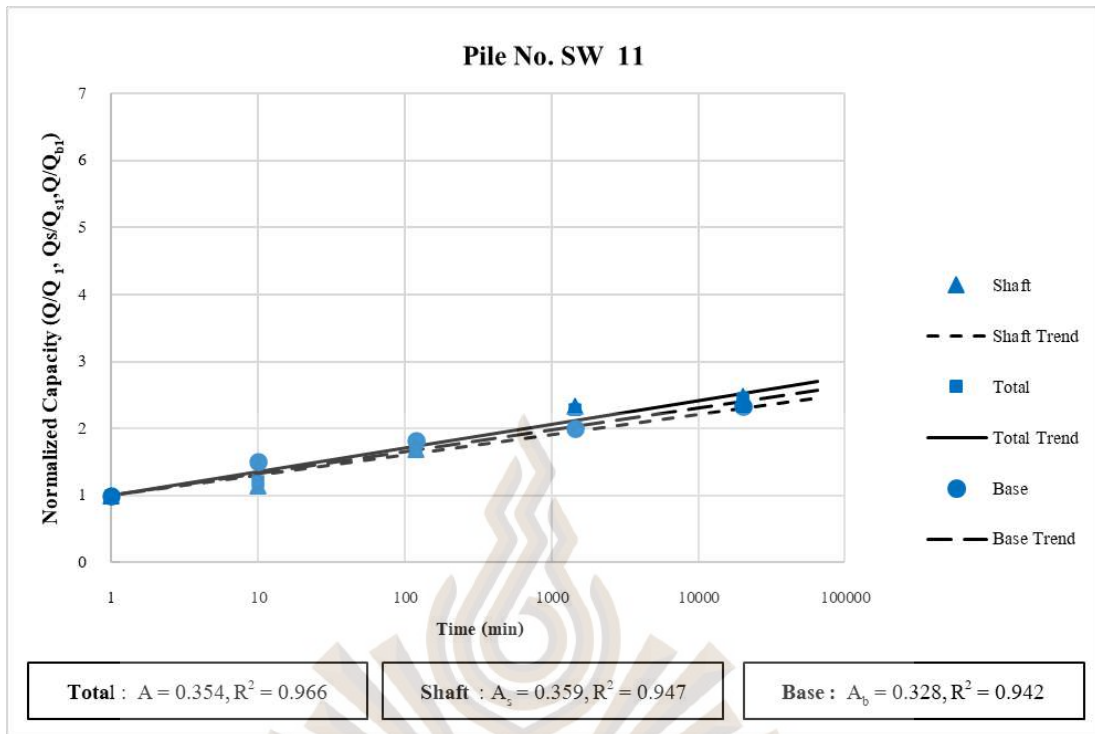


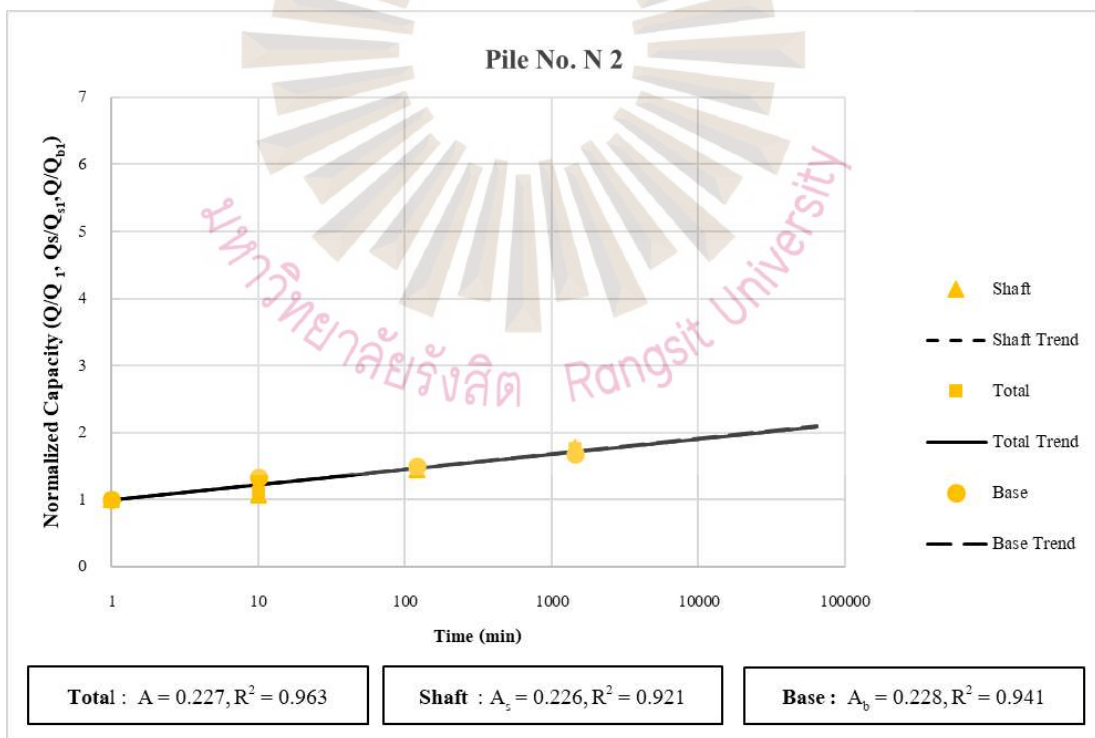
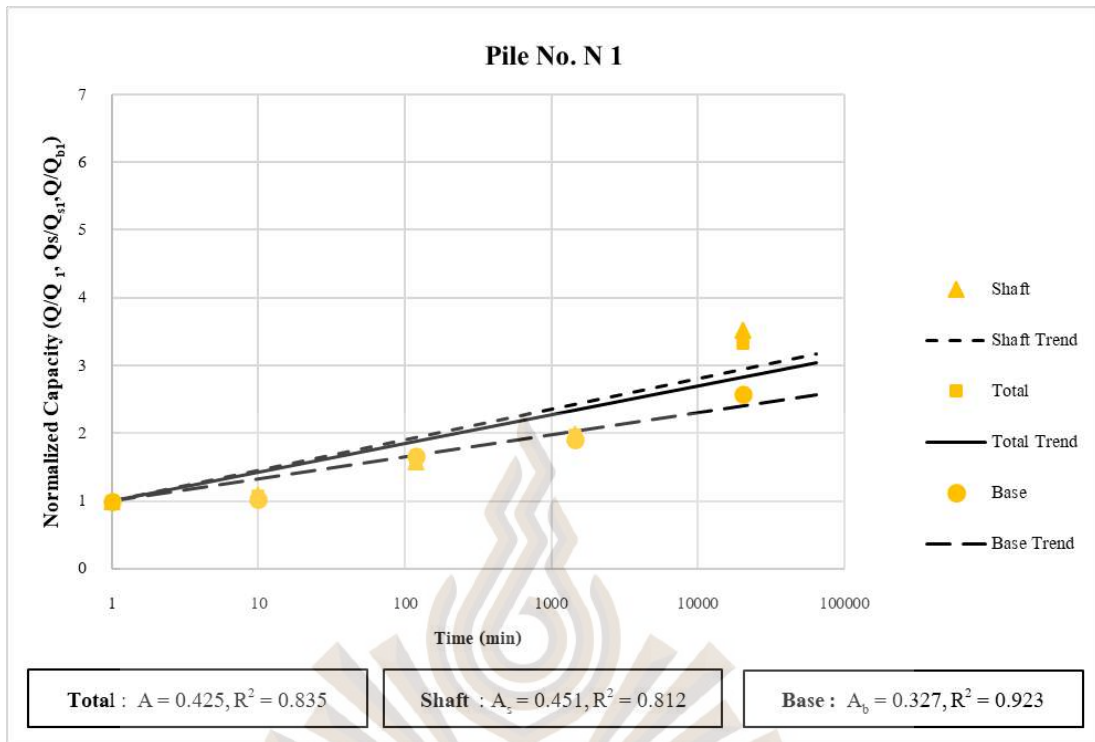


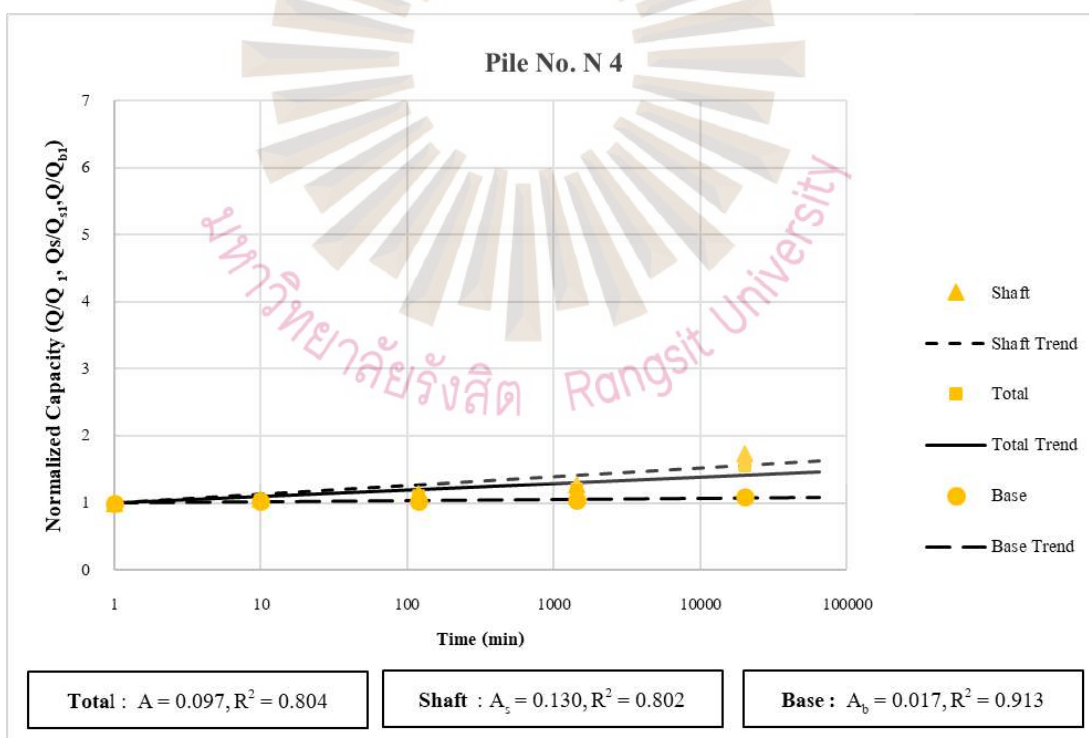
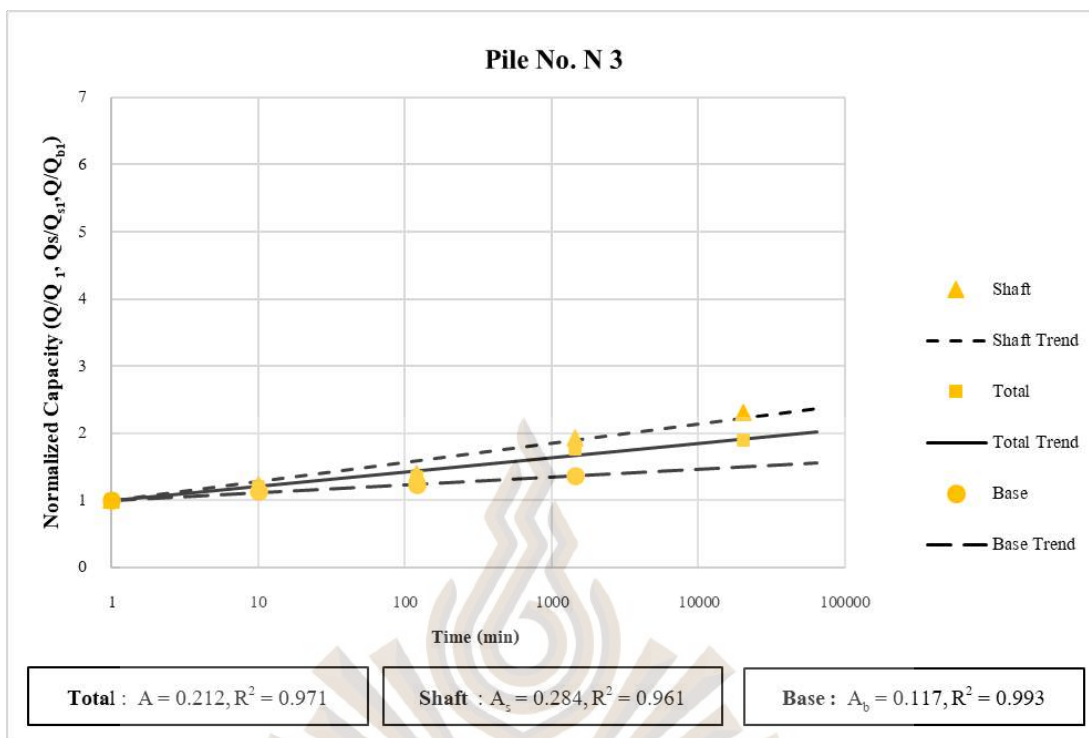


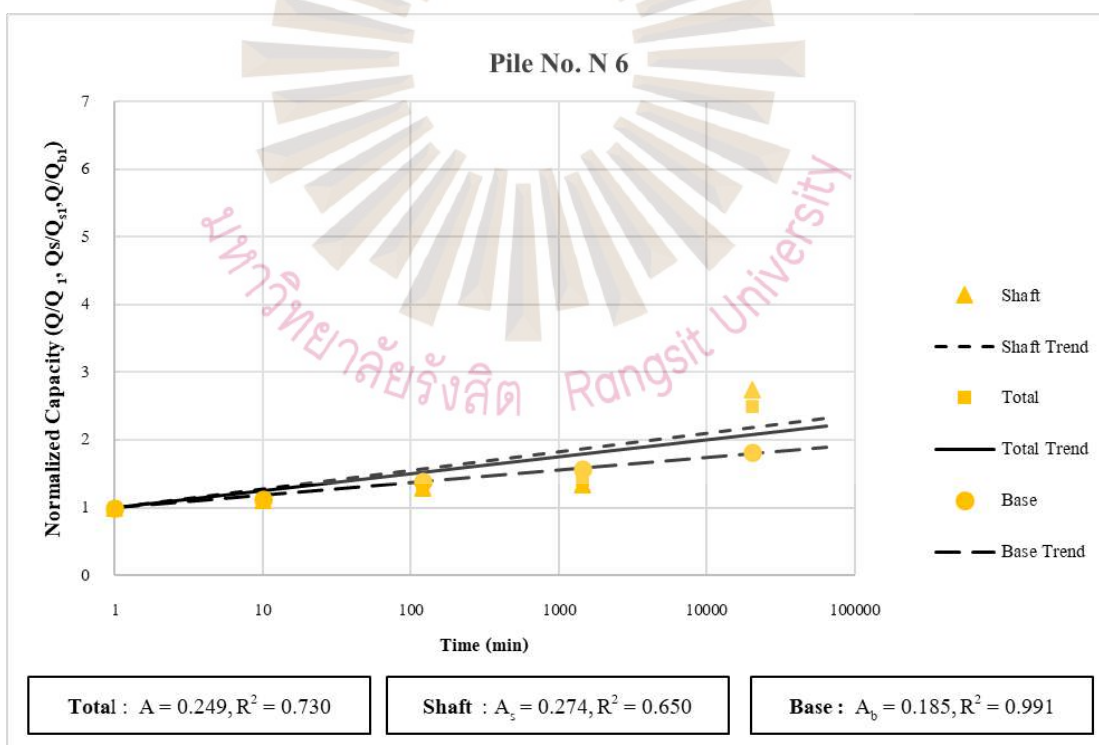
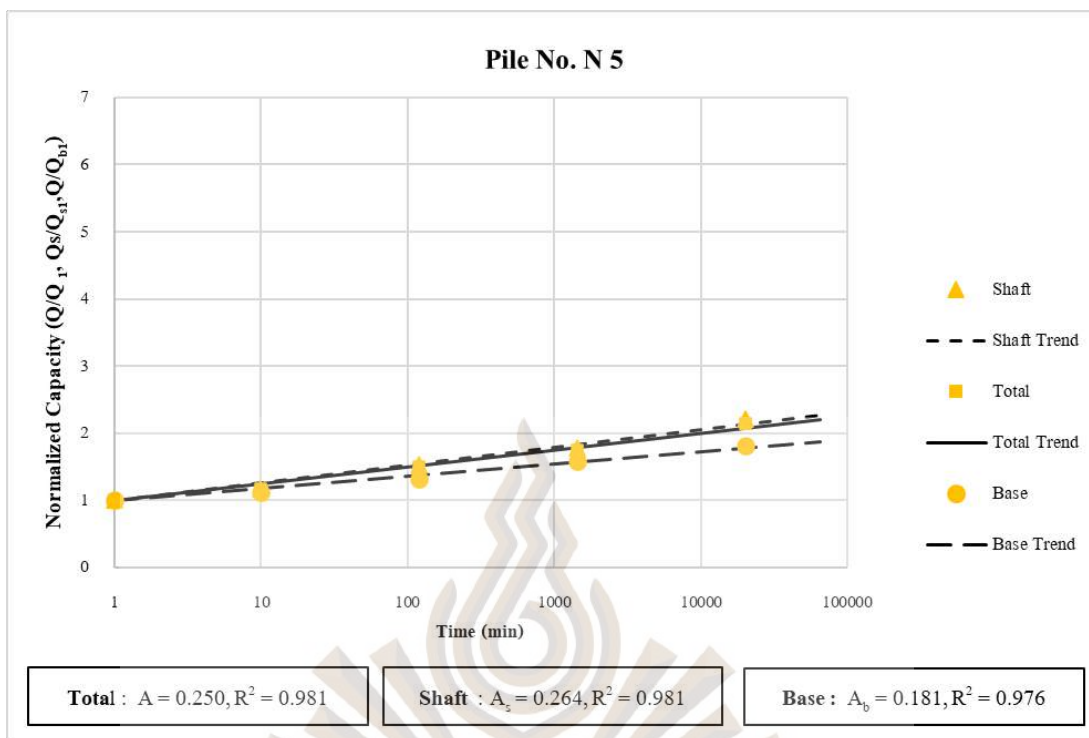


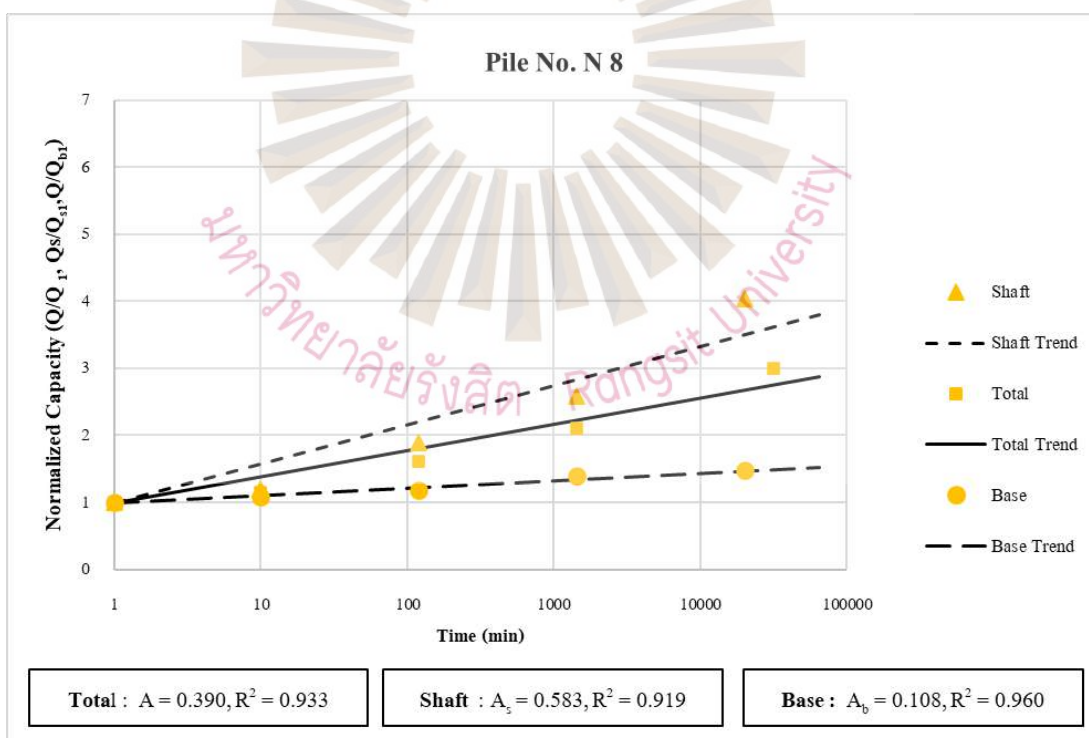
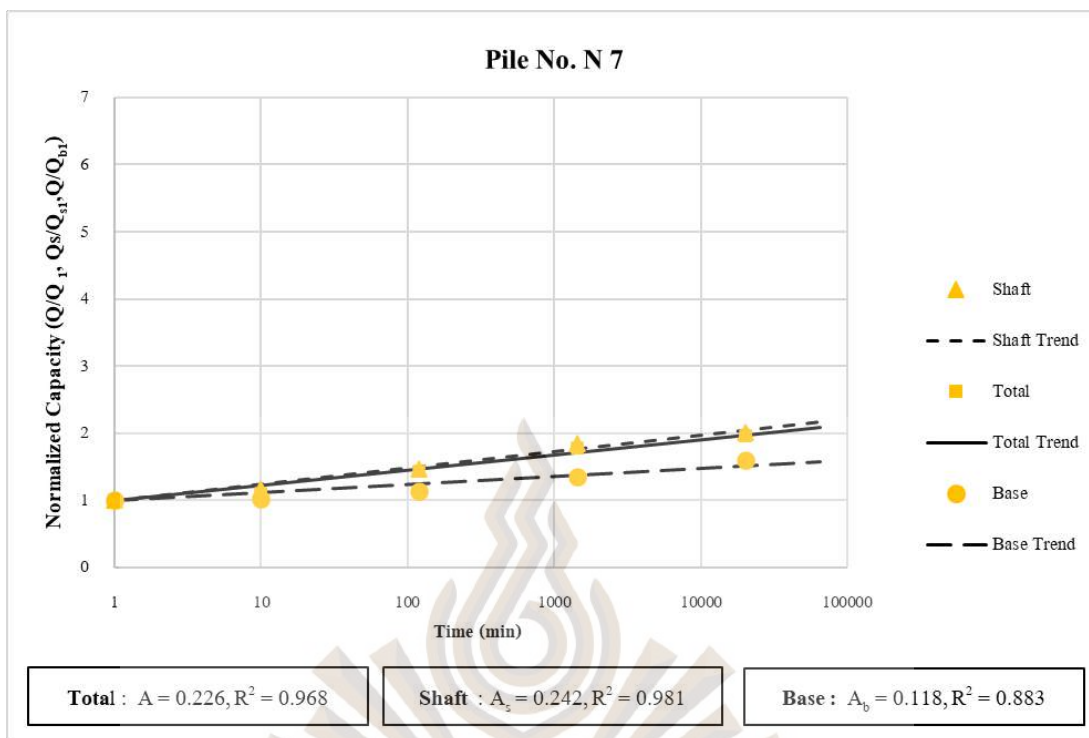


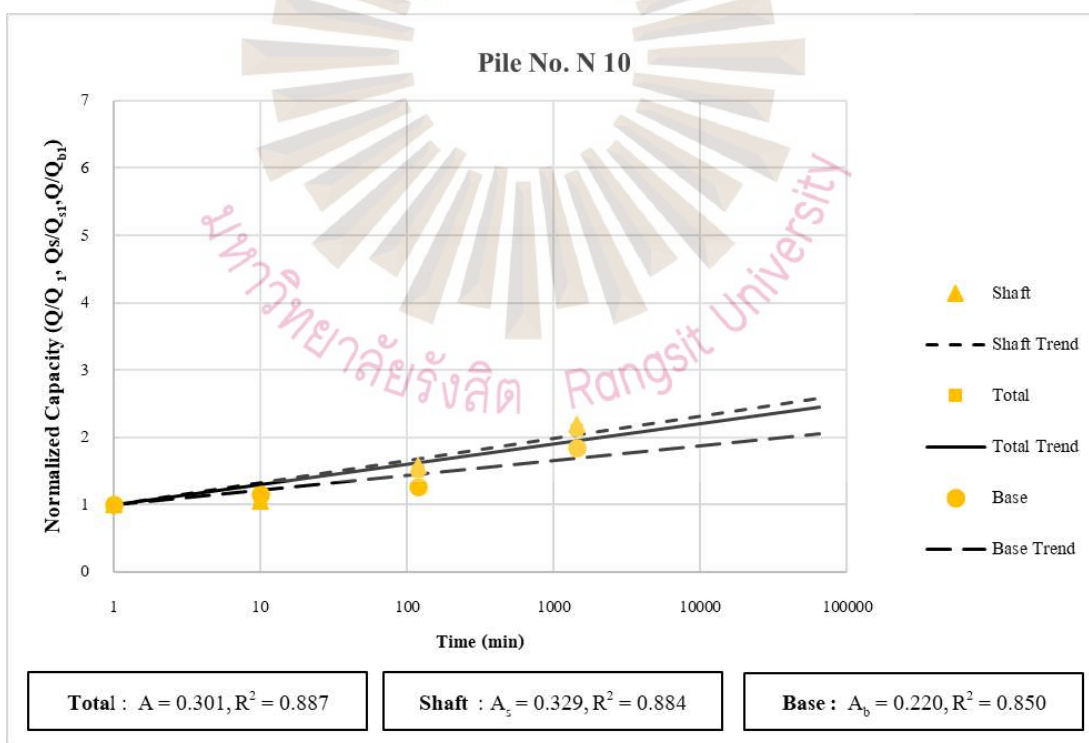
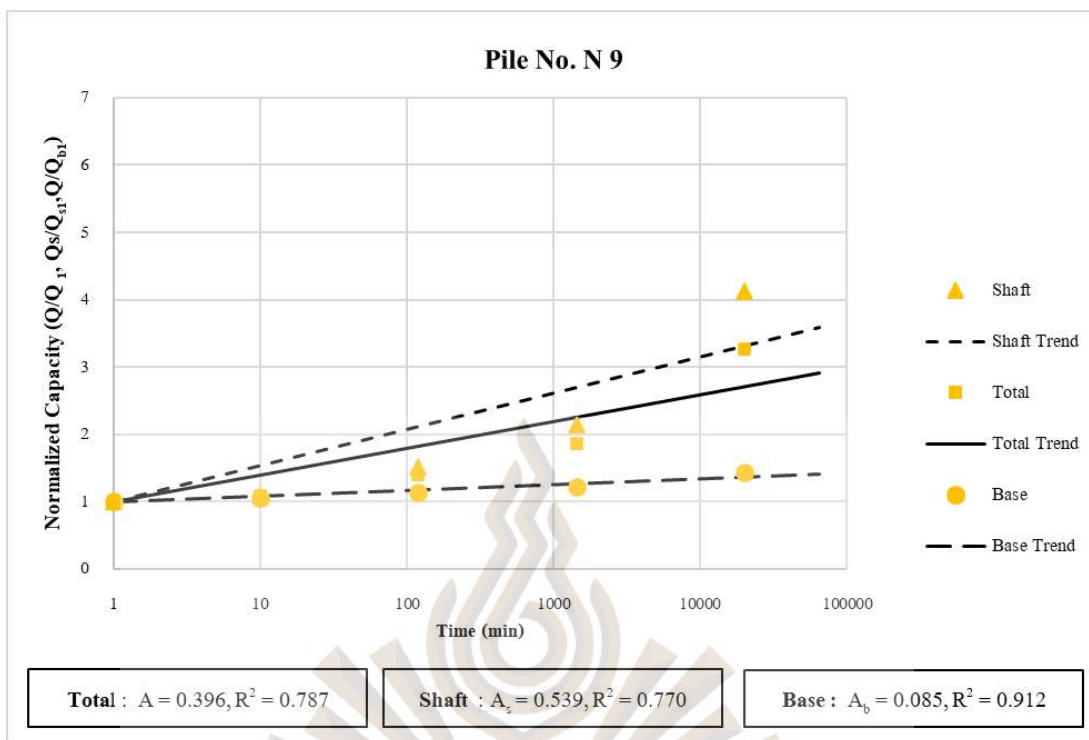


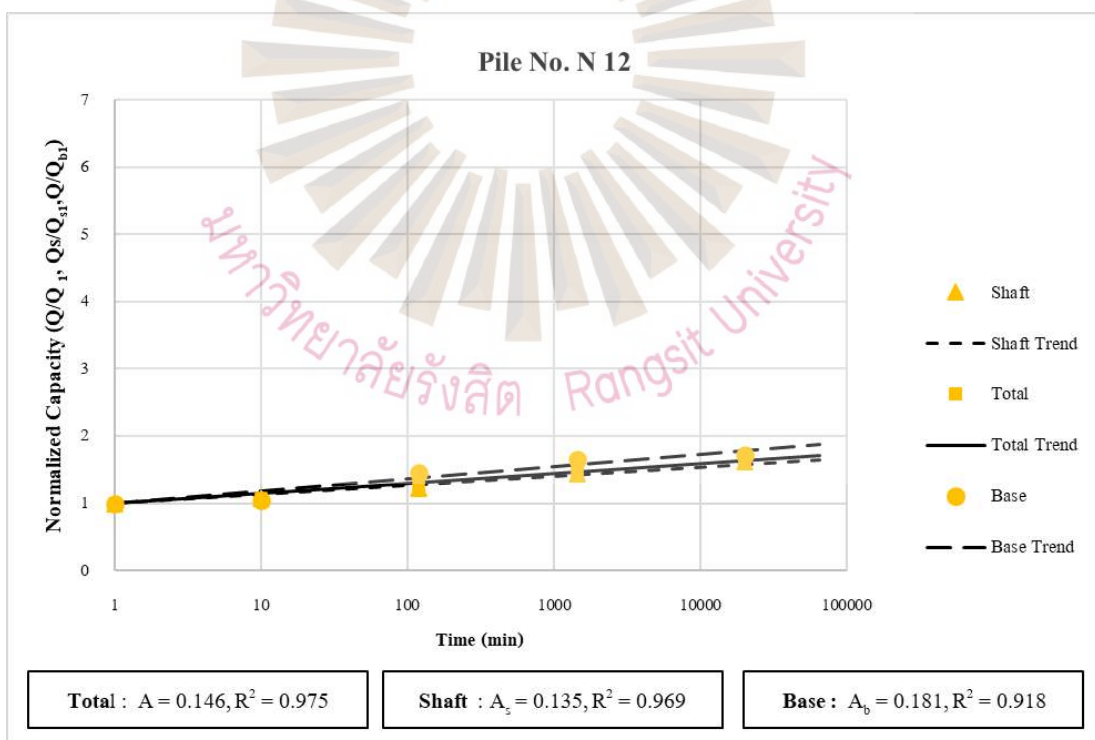
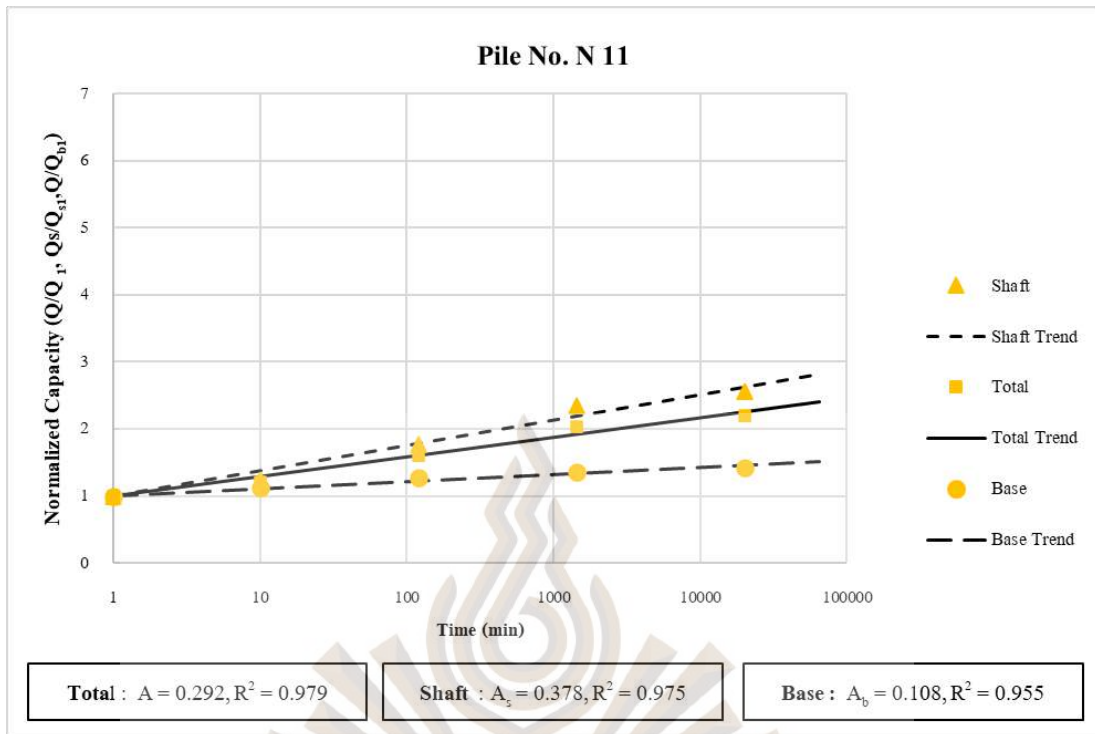


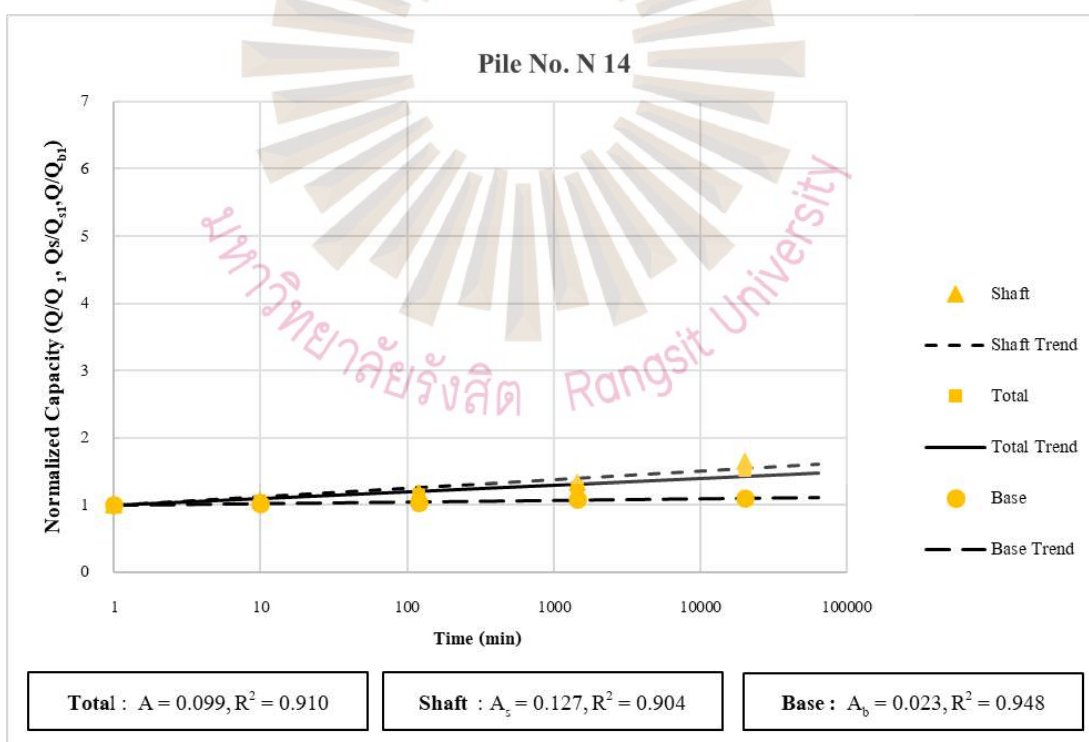
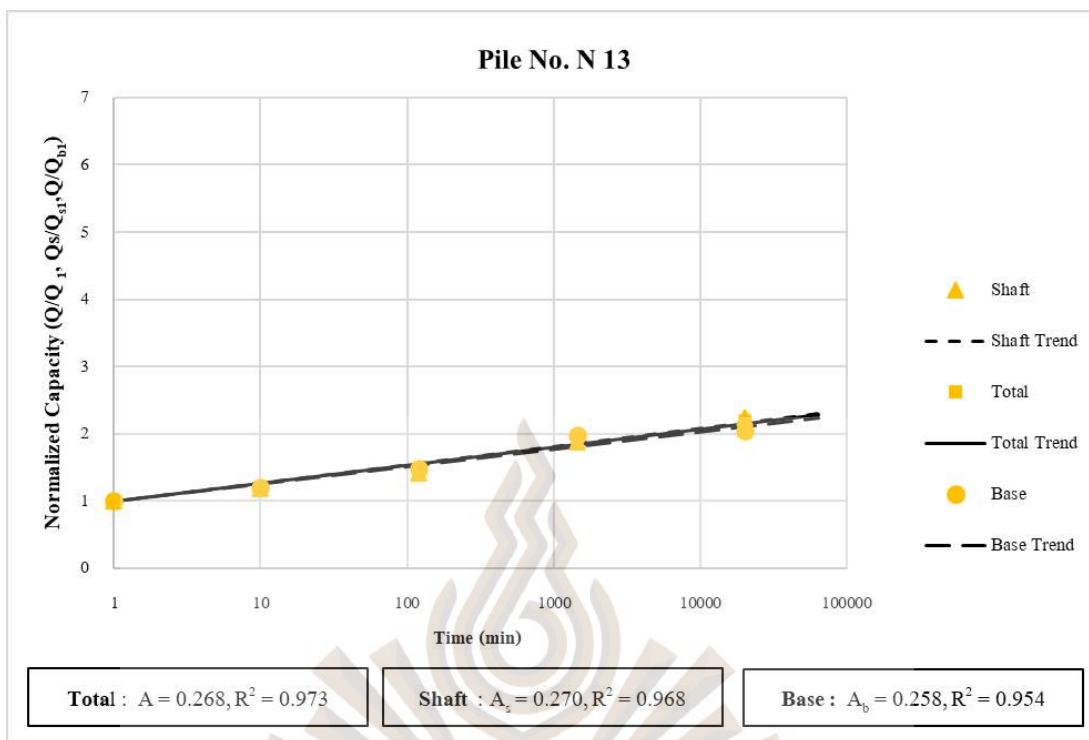


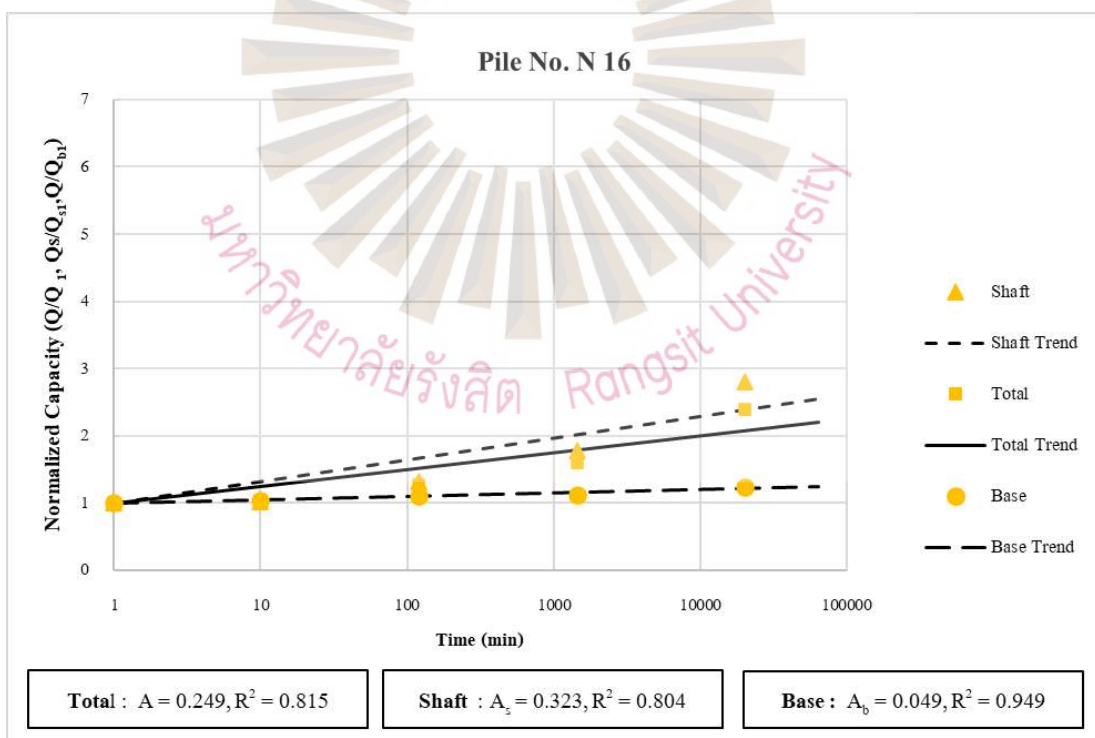
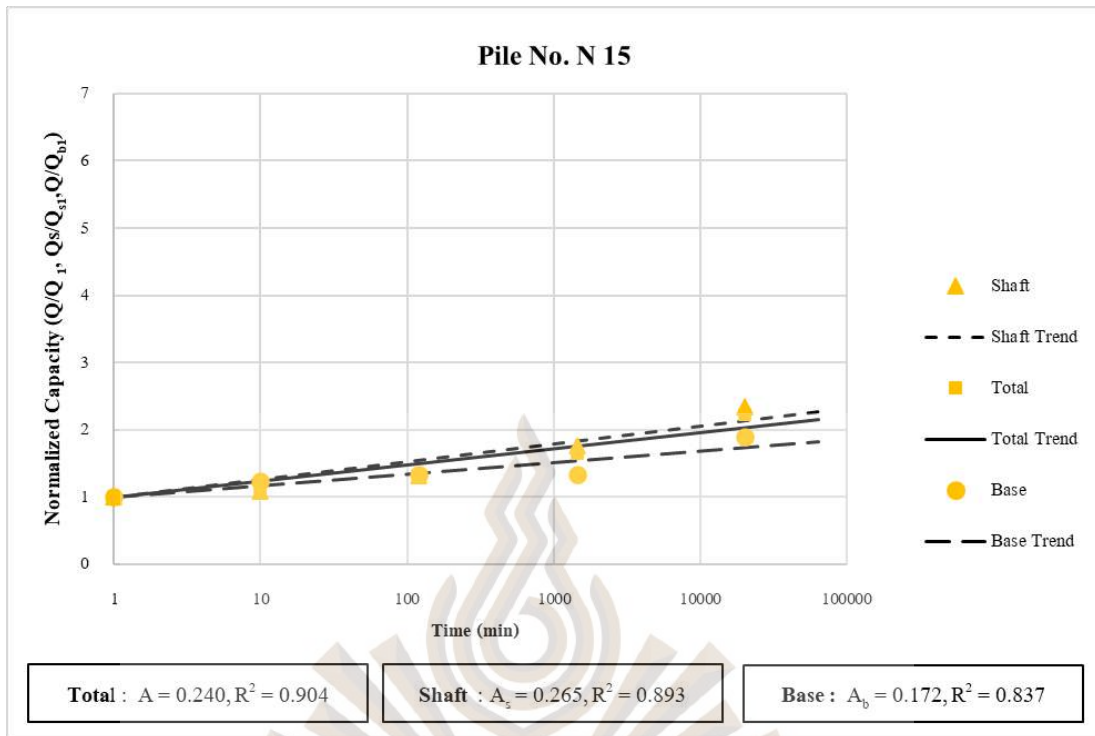


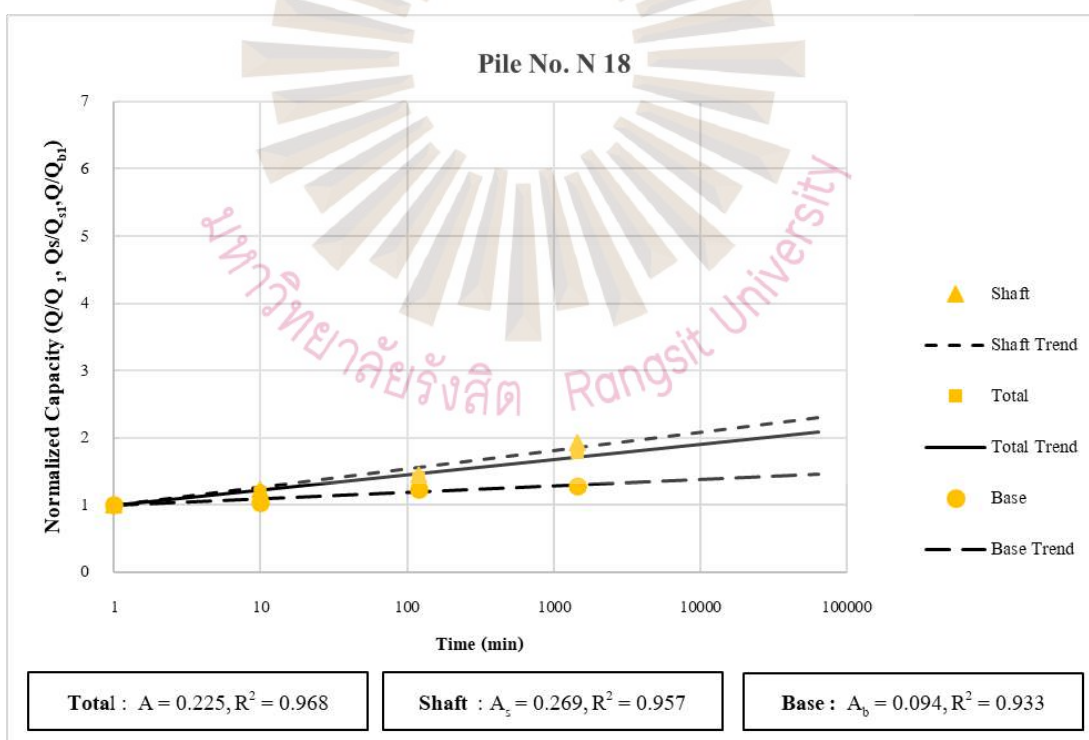
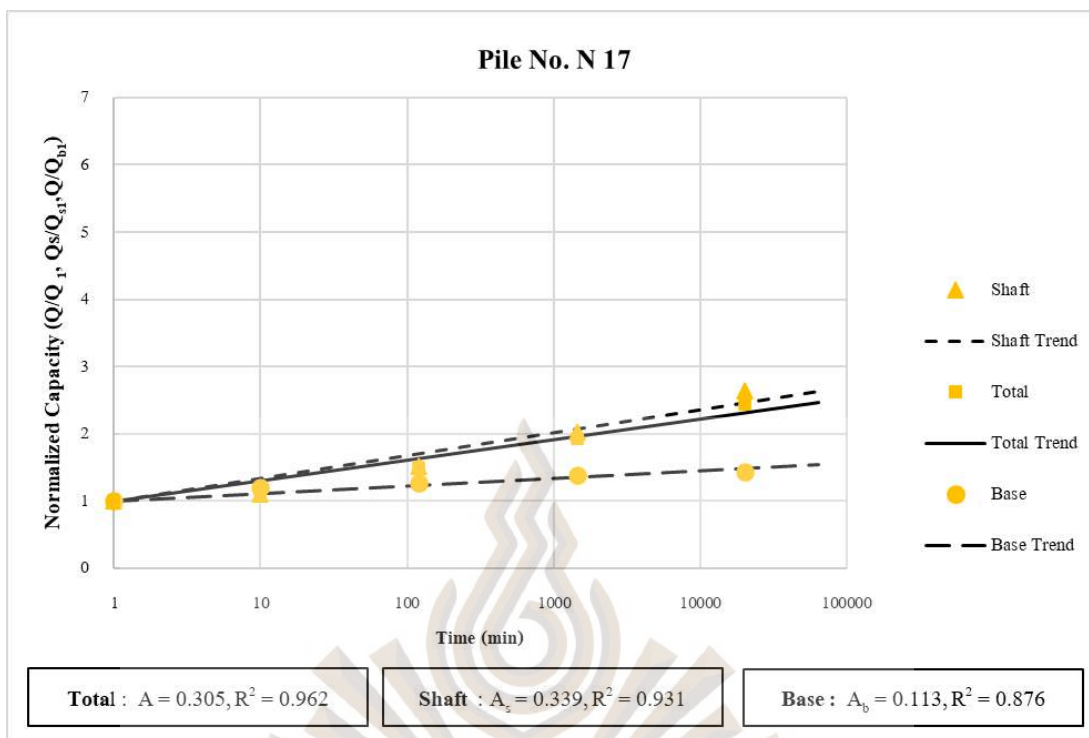


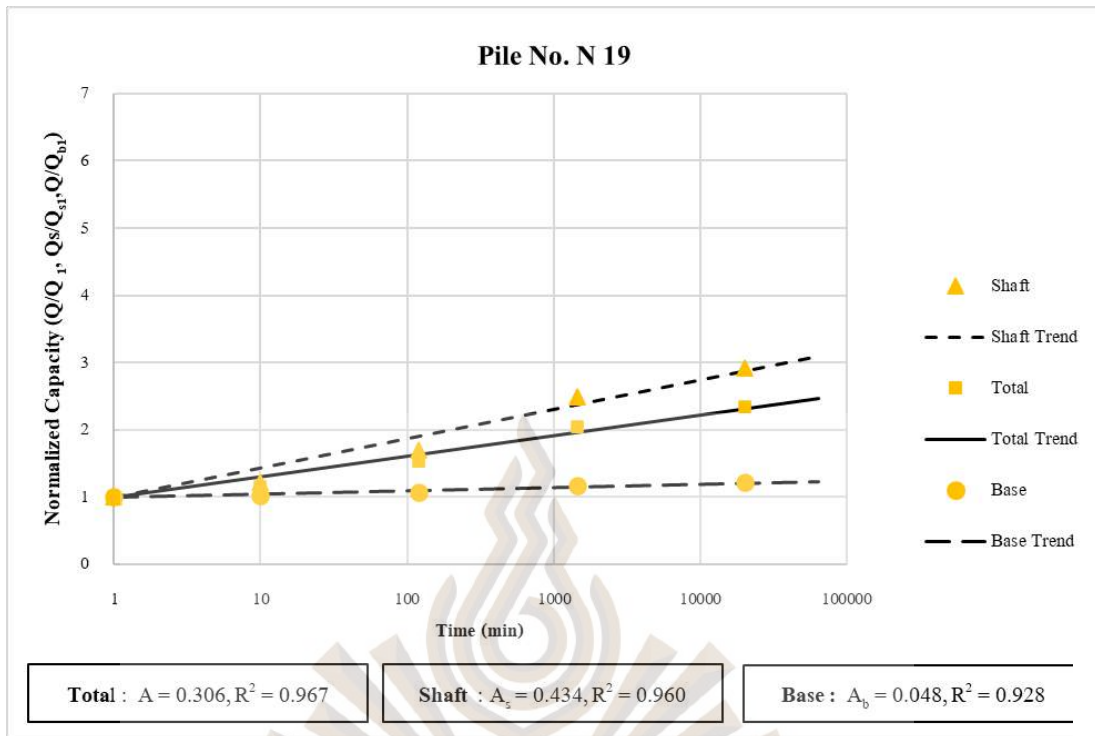








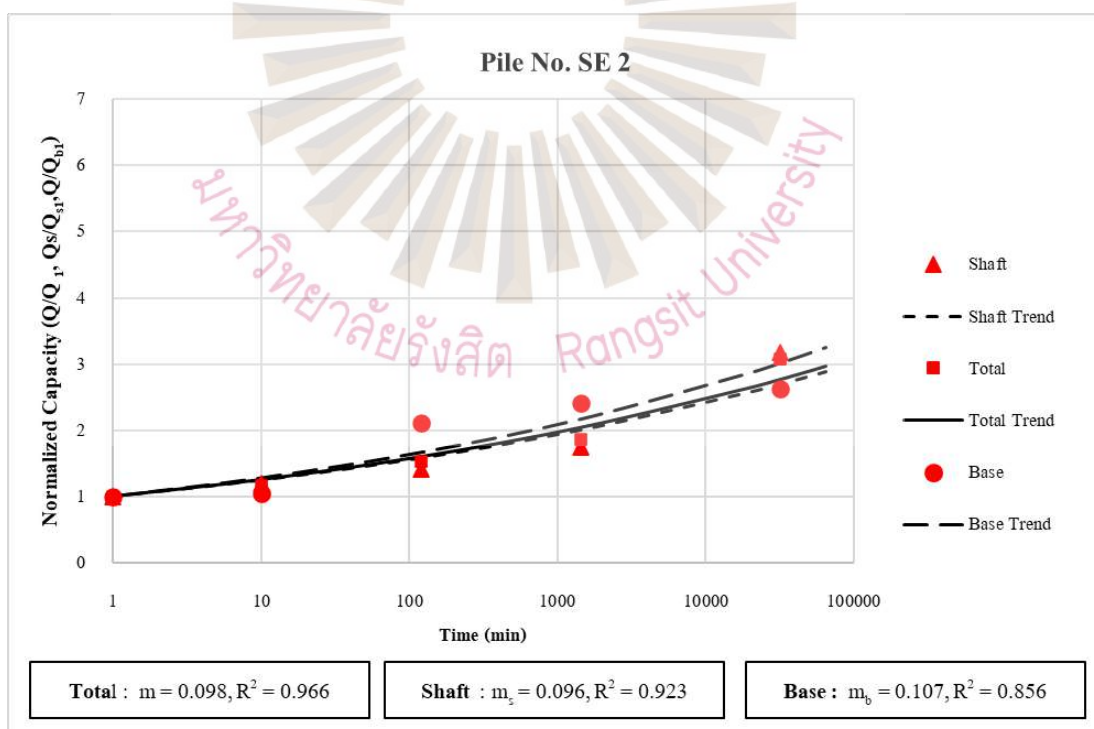
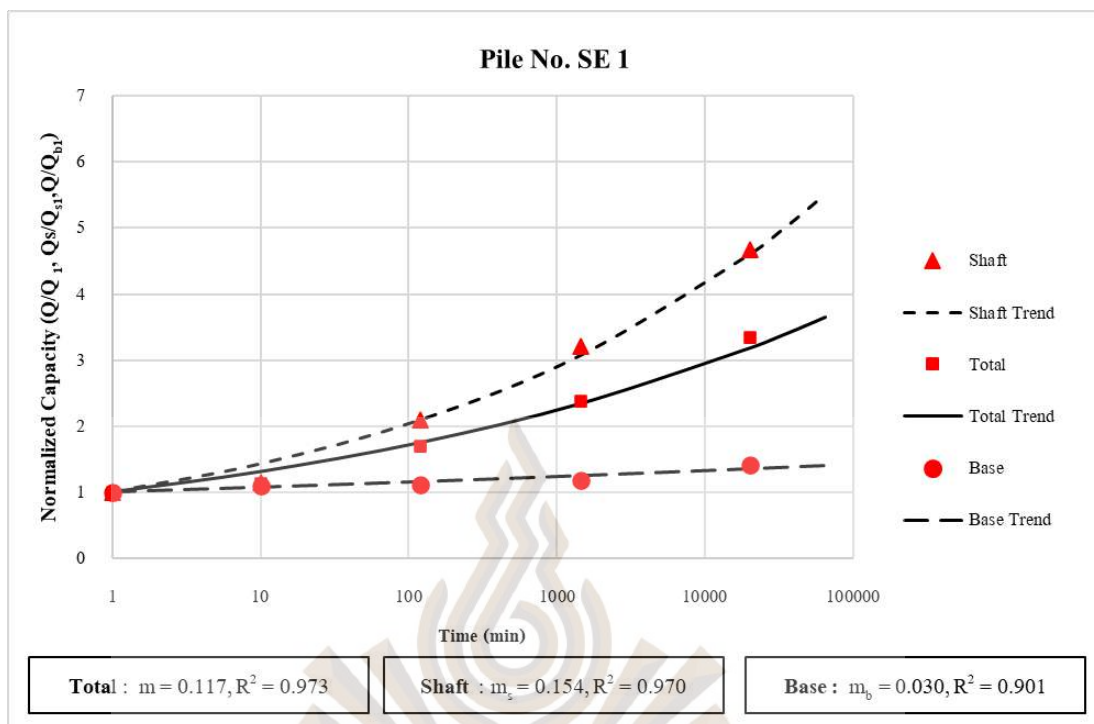


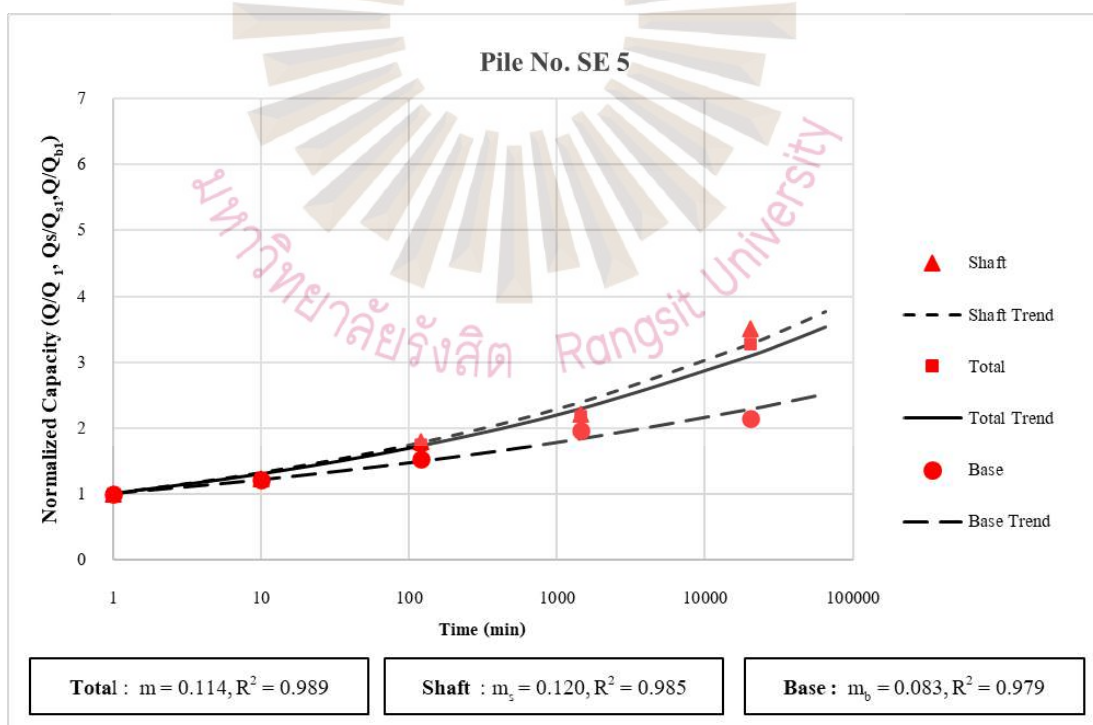
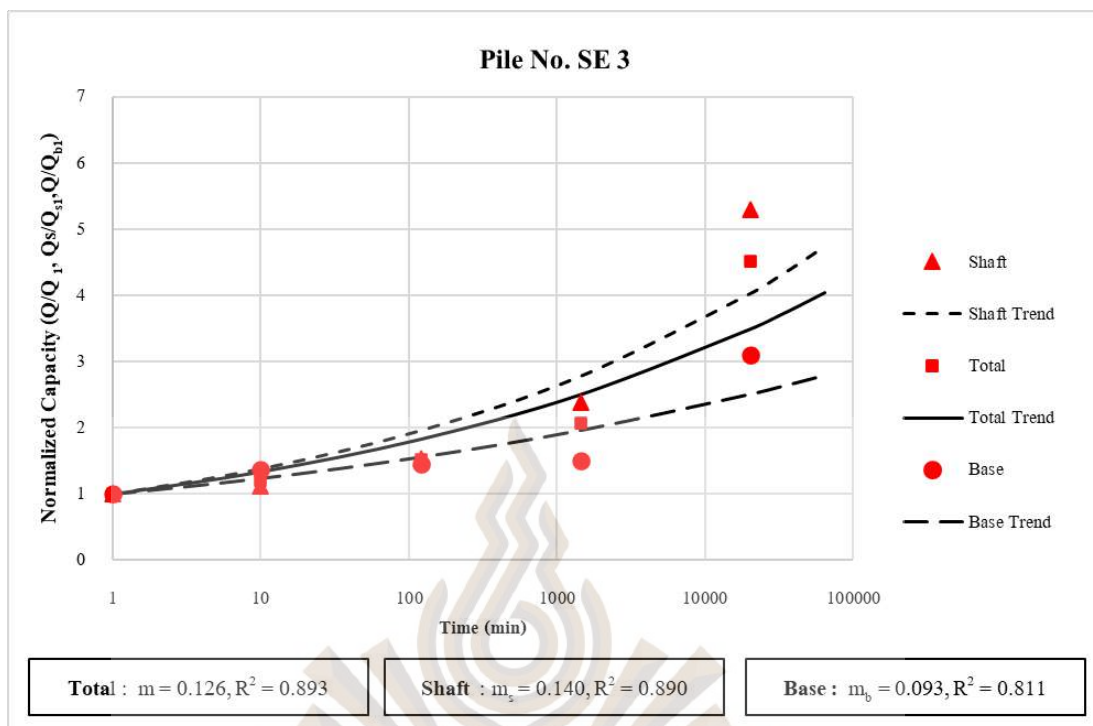


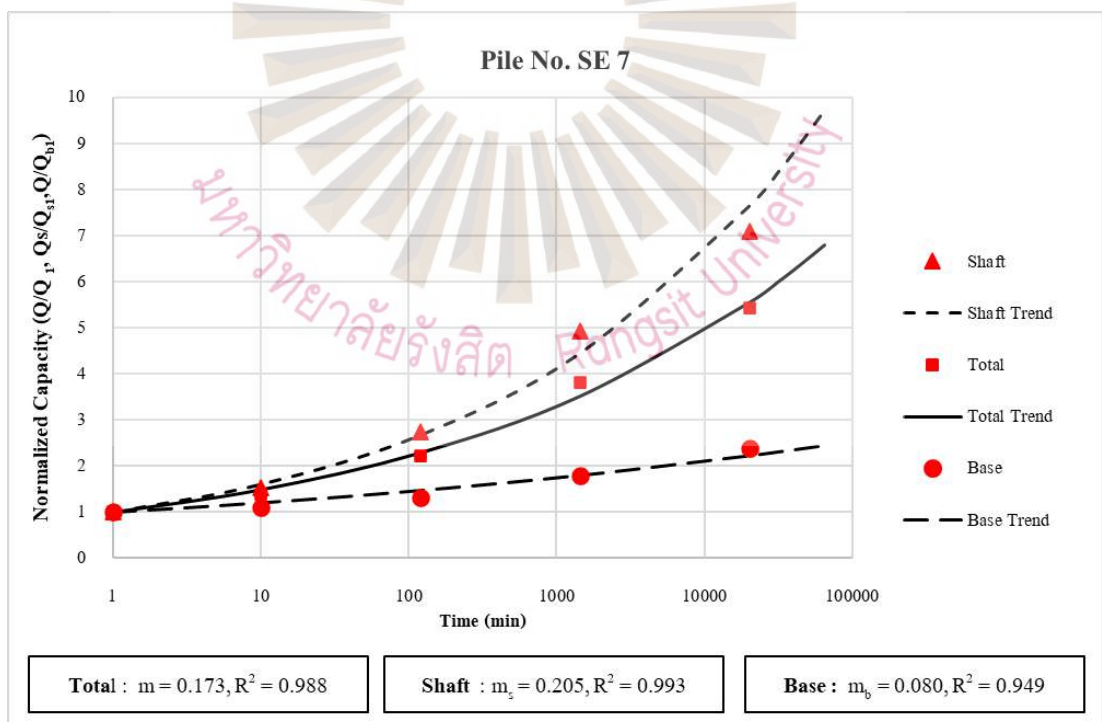
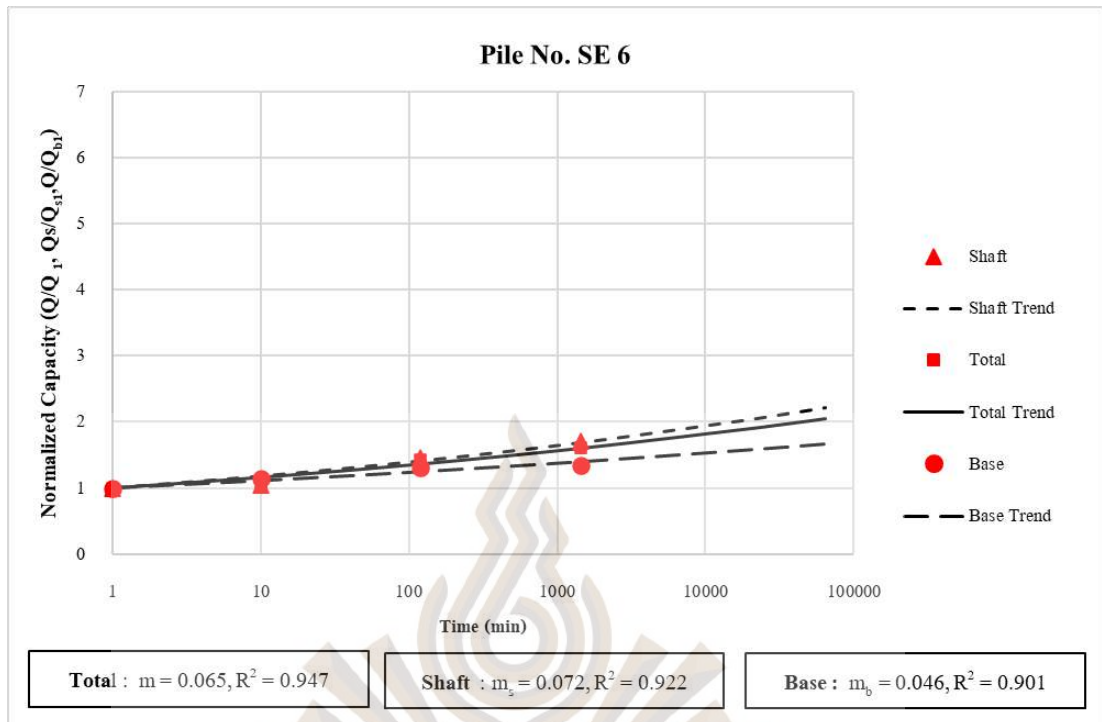
ภาคผนวก ข

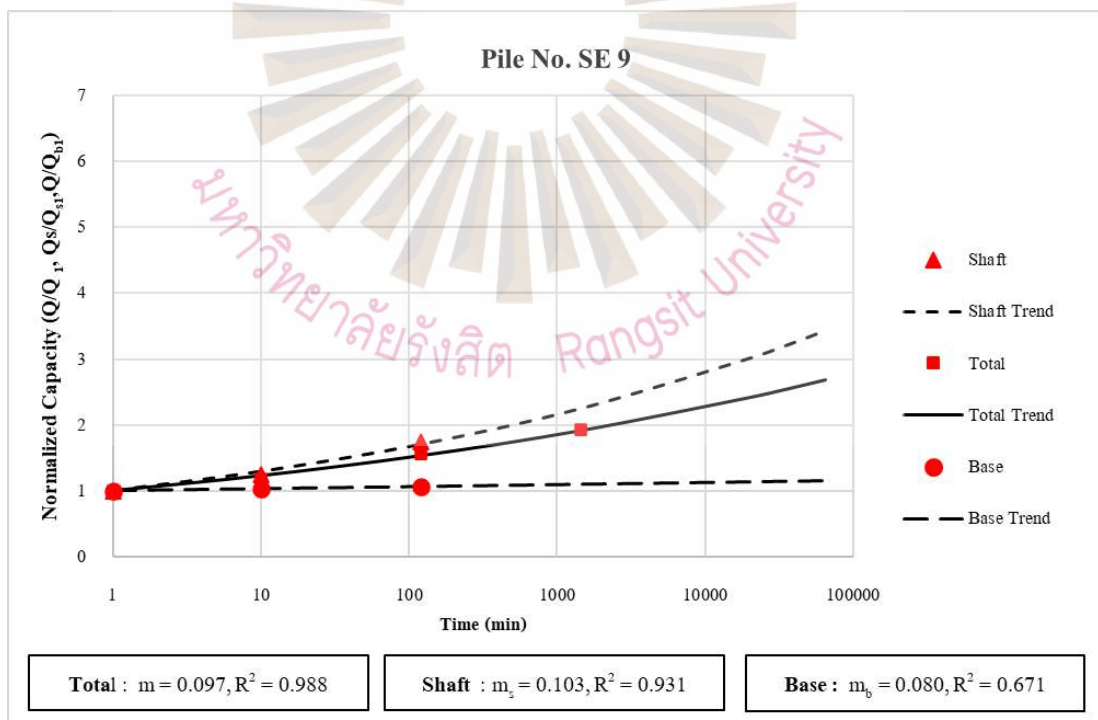
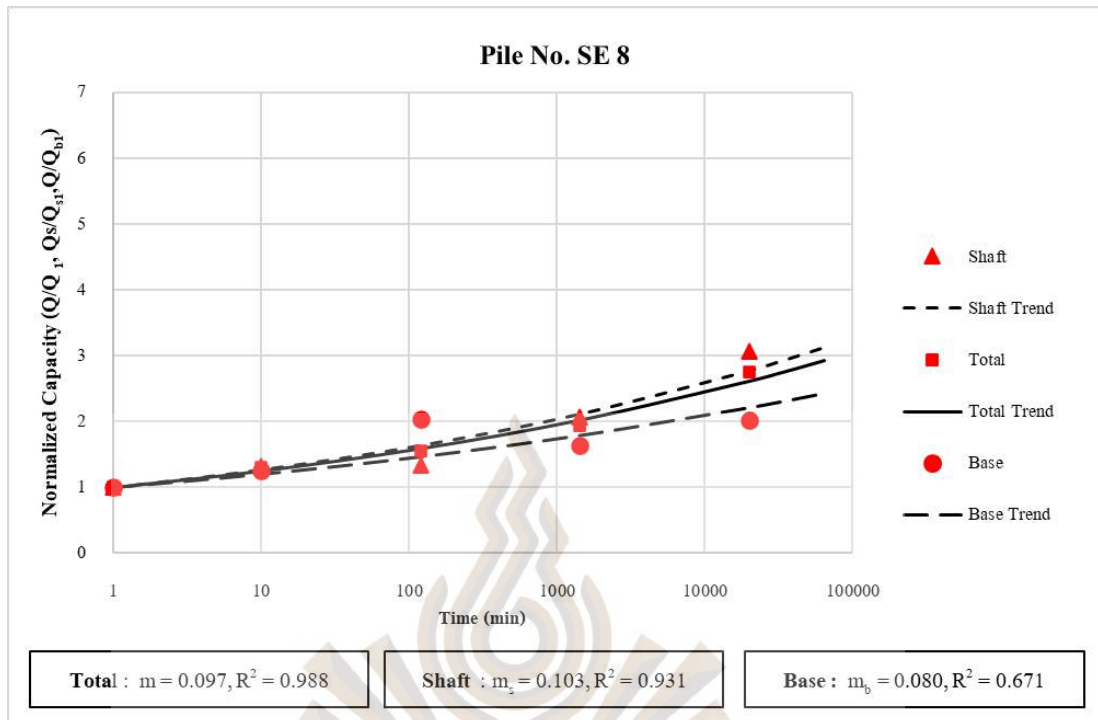
พารามิเตอร์ m สำหรับกำลังรวมของเสาเข็ม

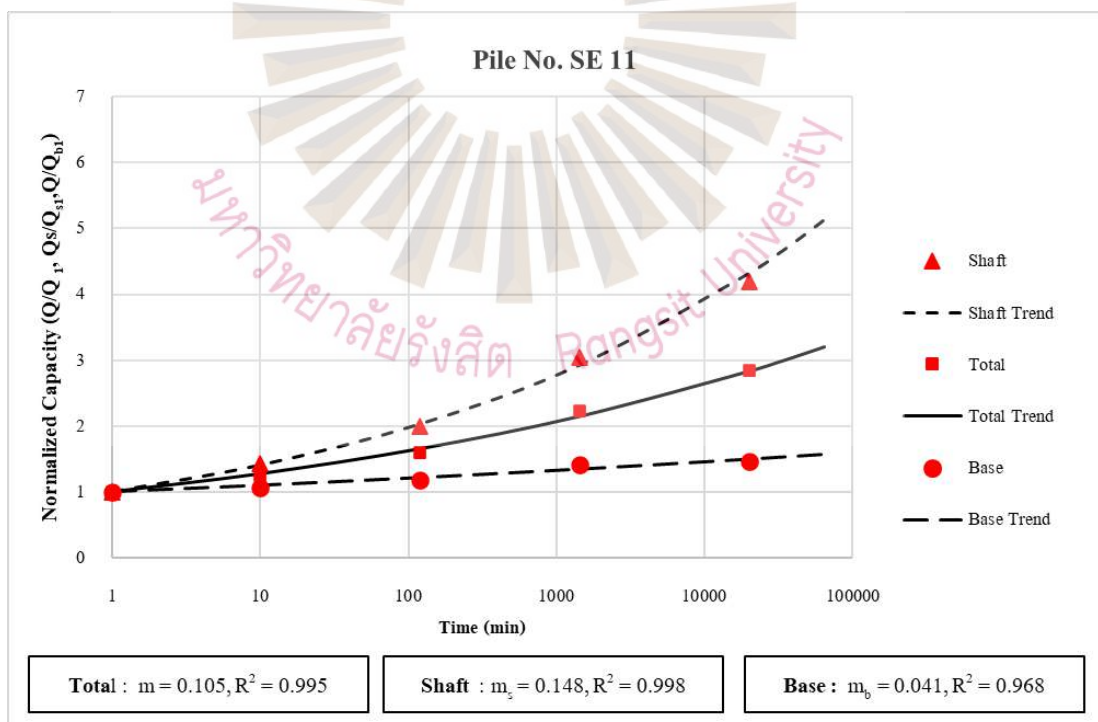
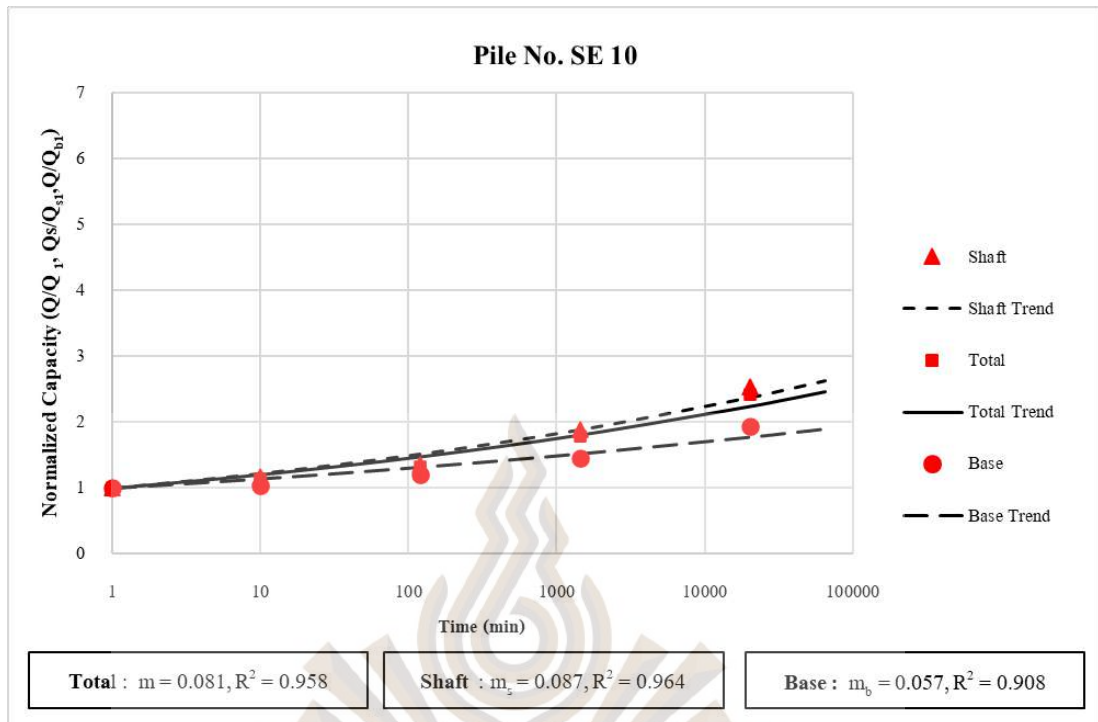


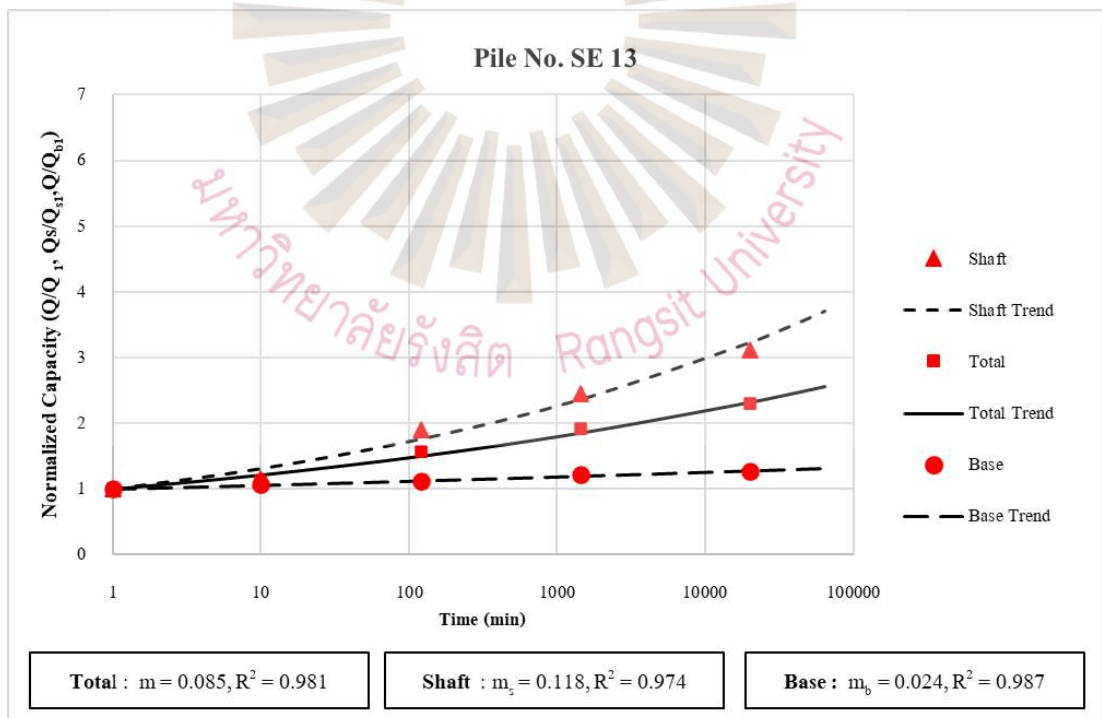
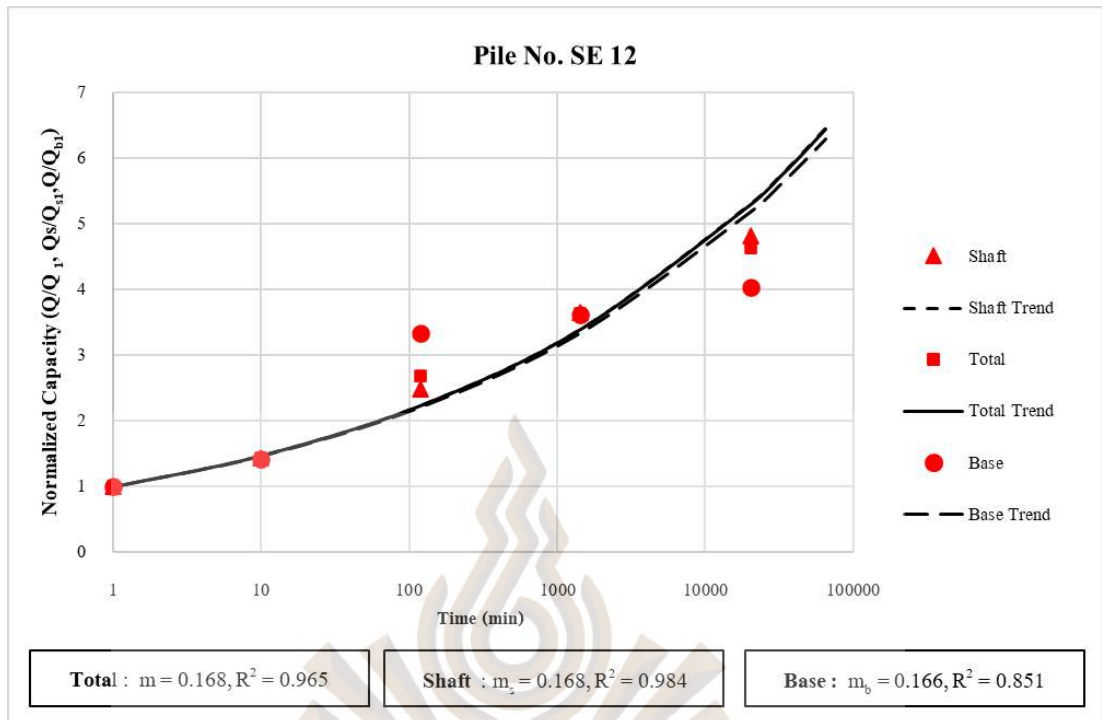


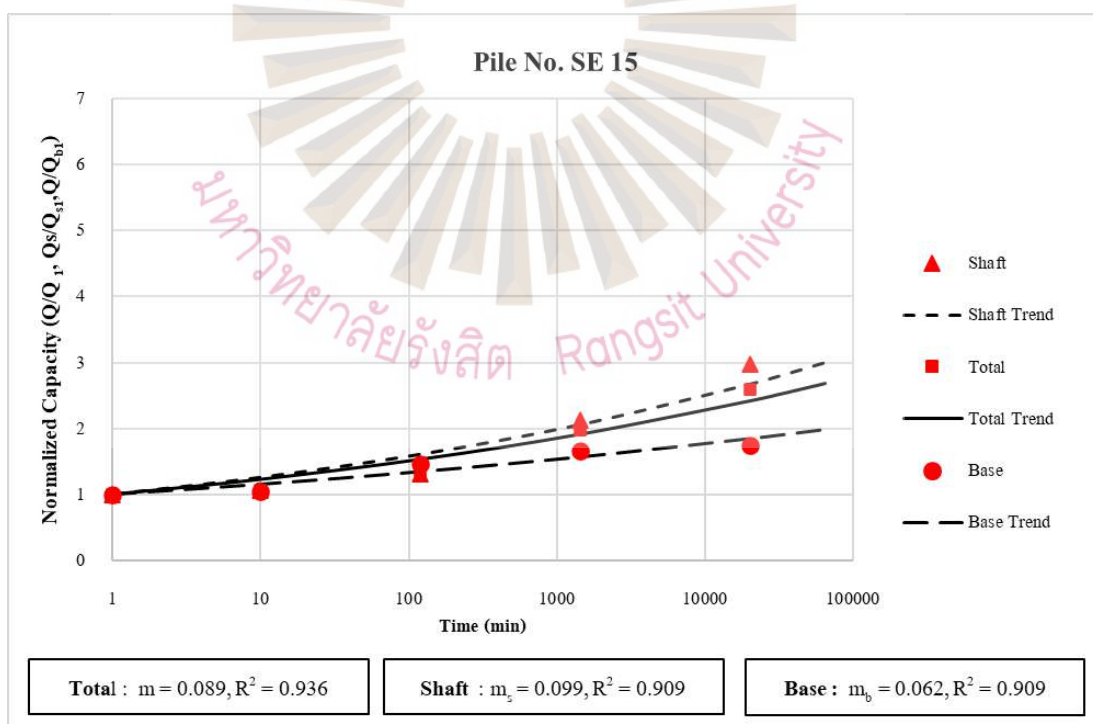
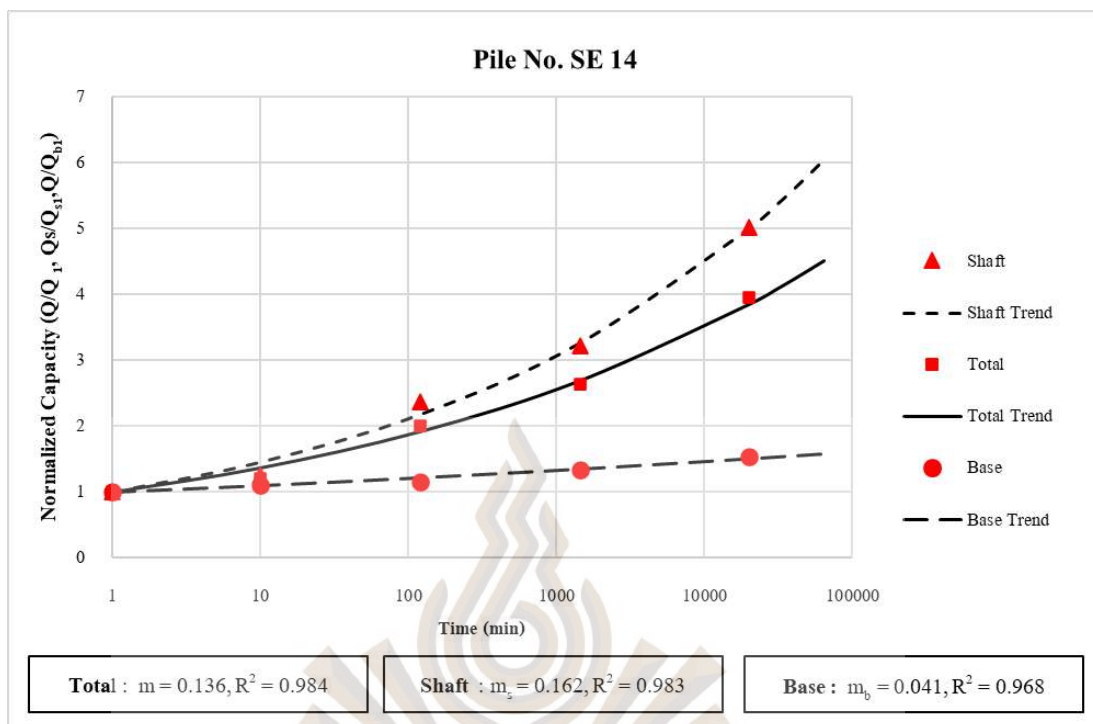


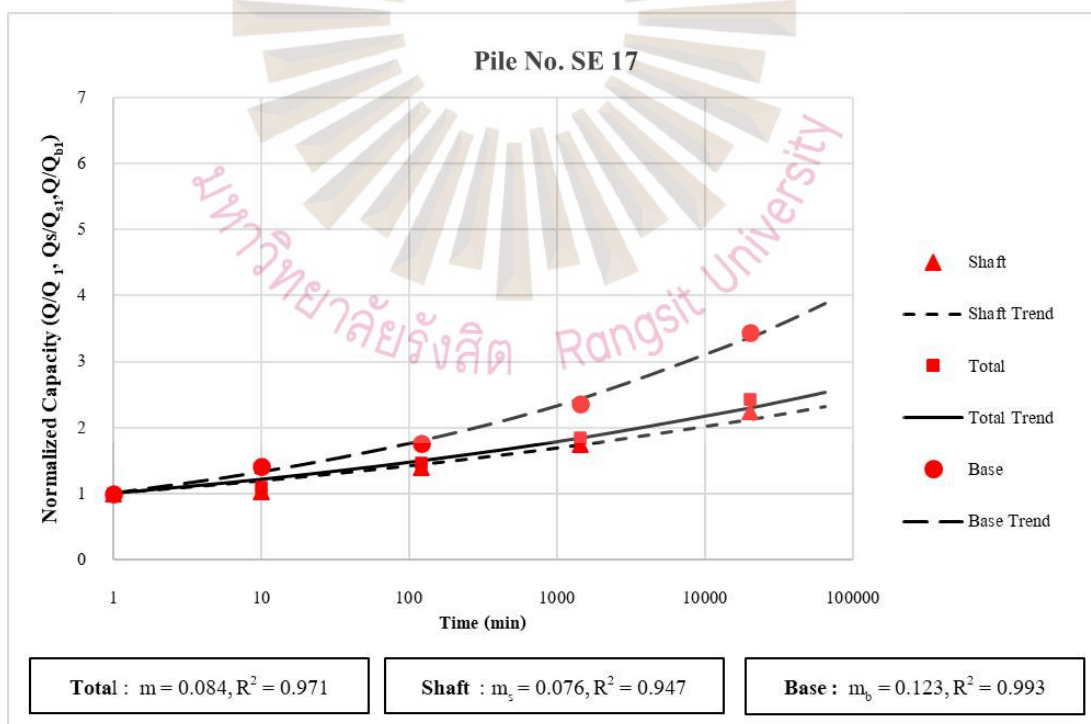
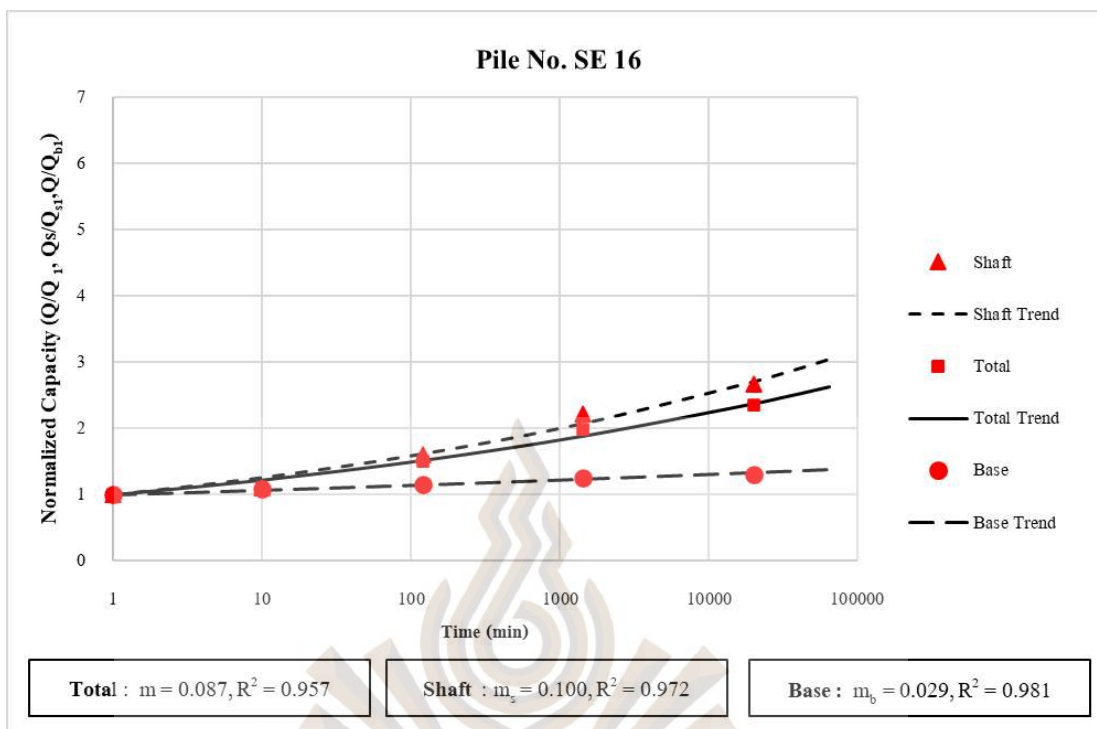


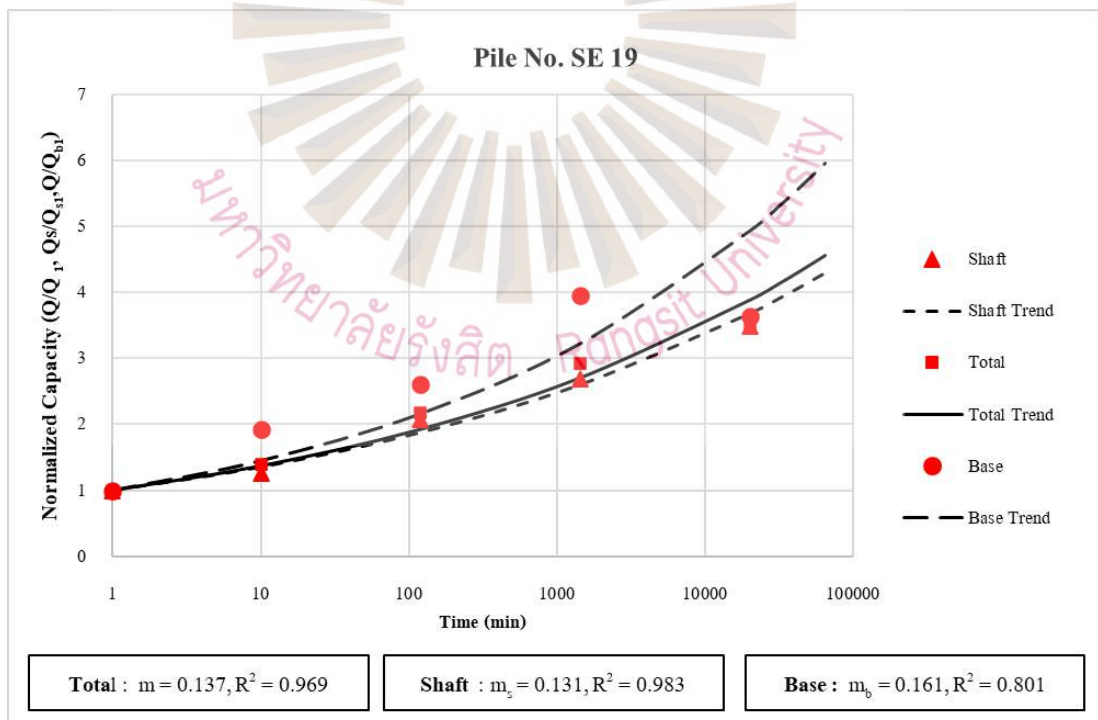
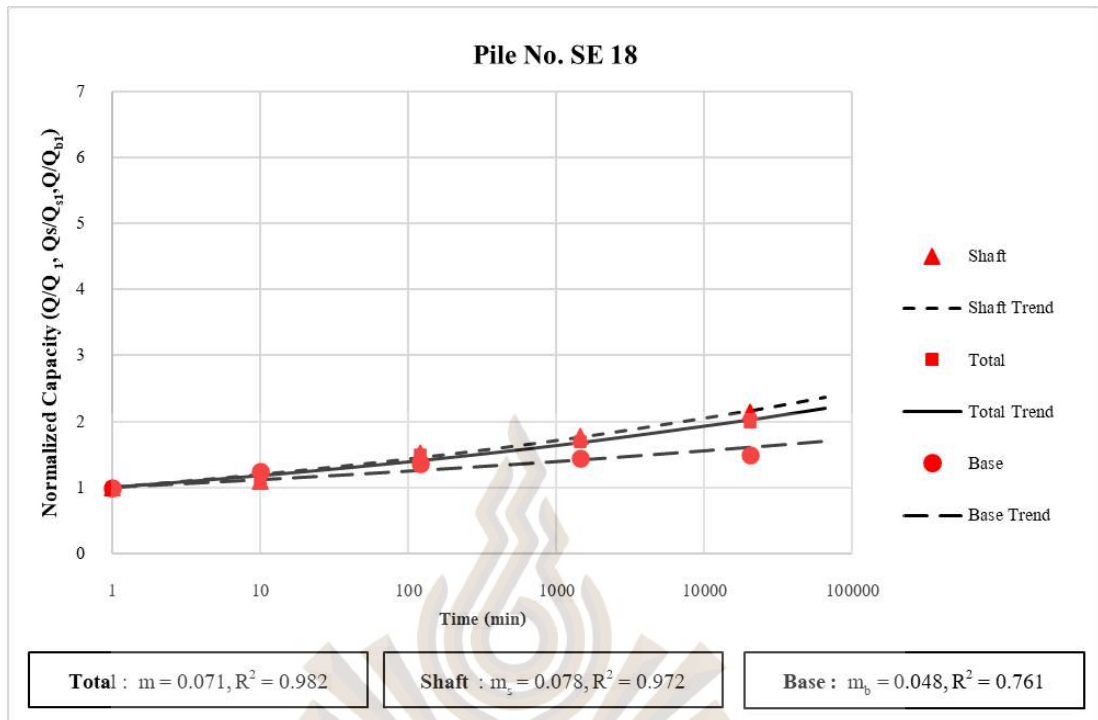


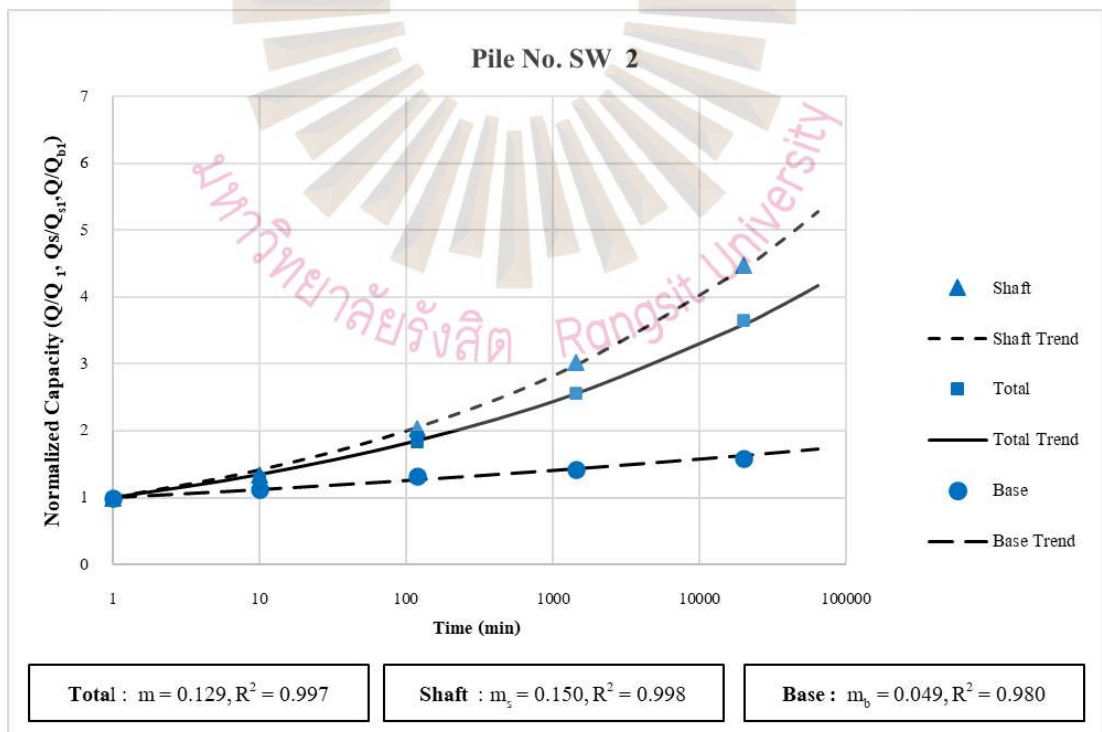
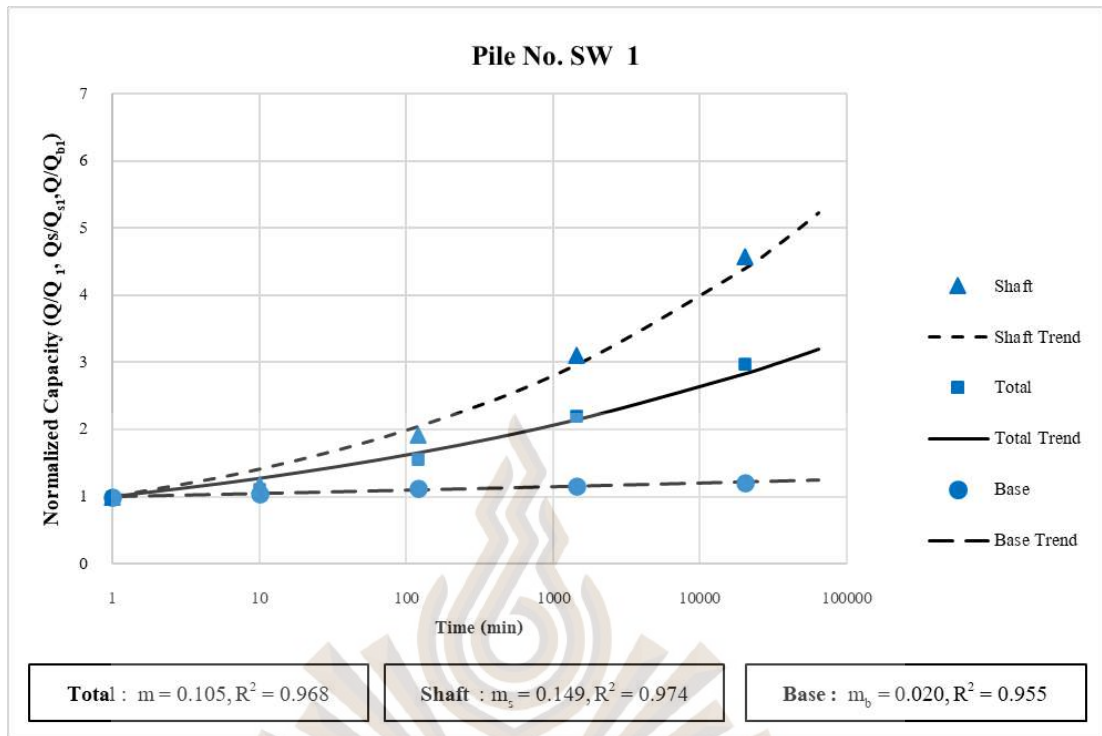


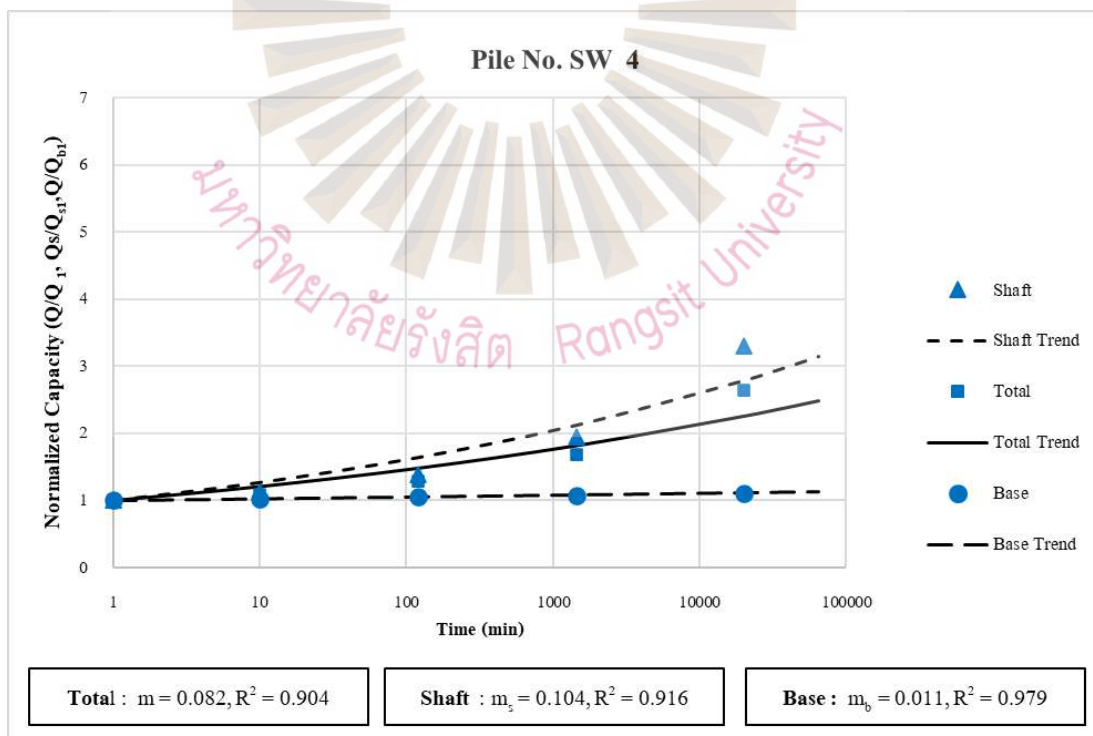
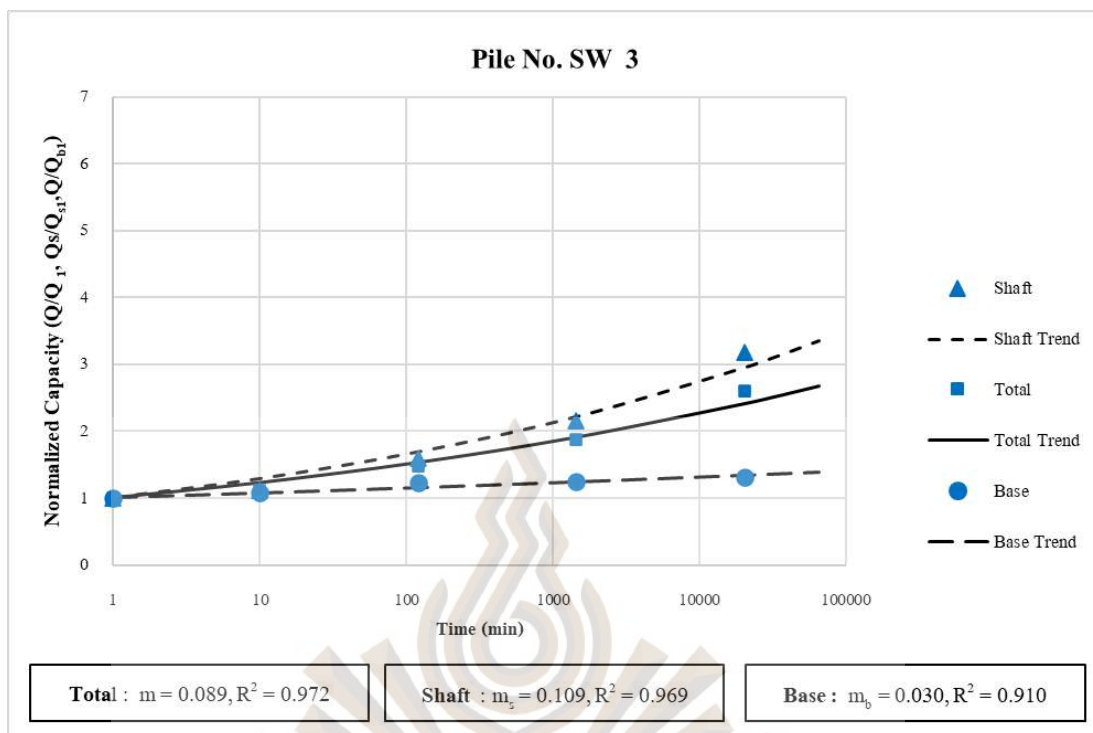


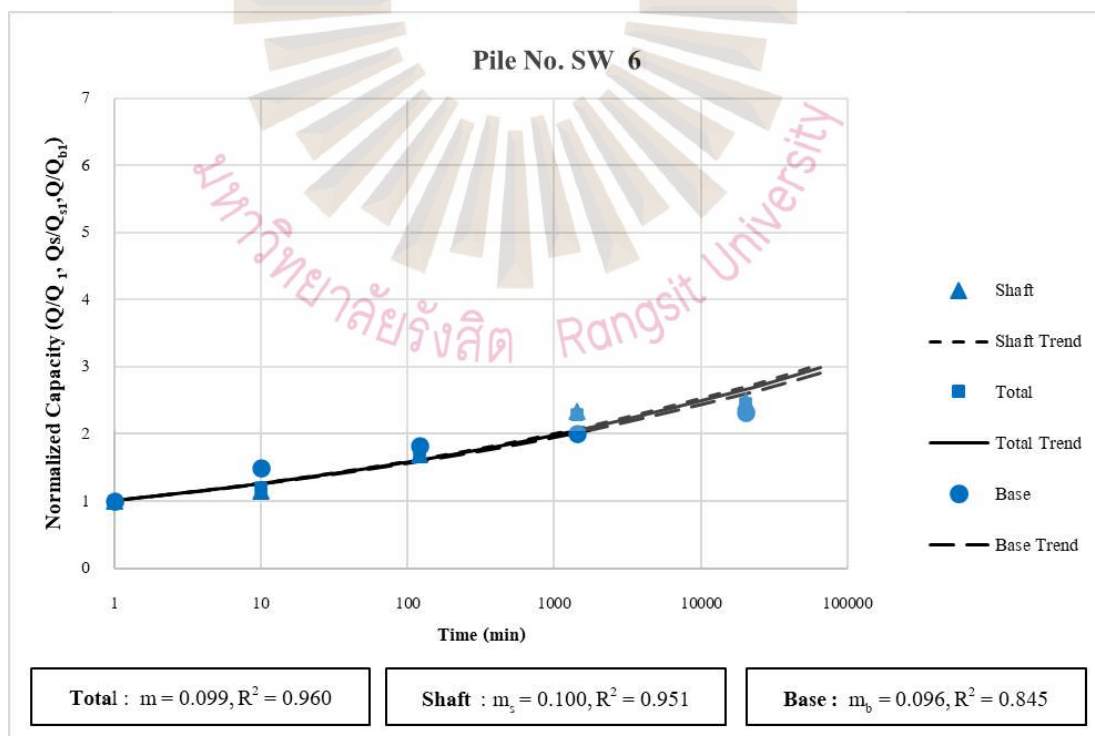
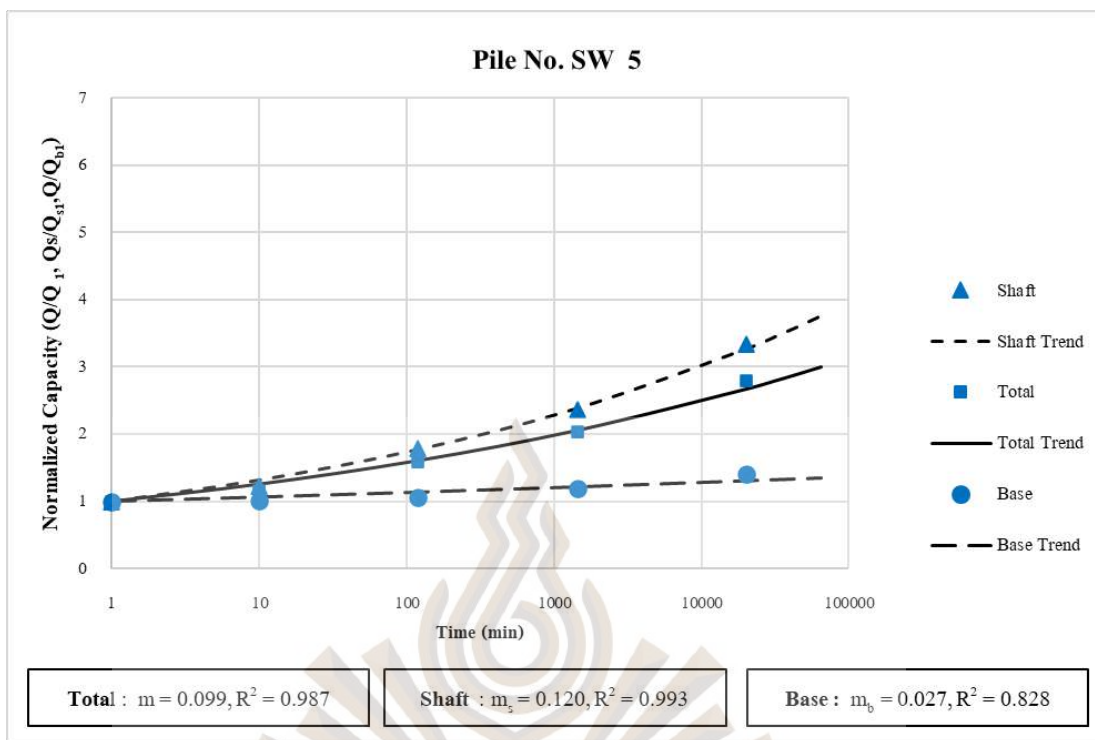


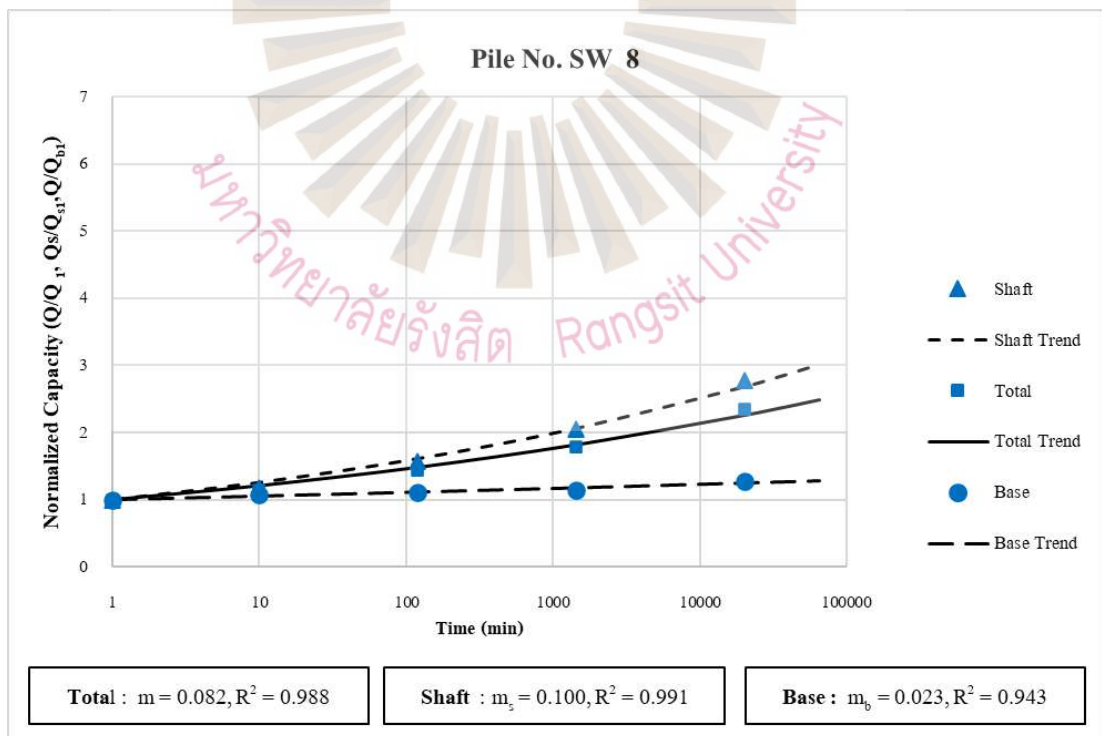
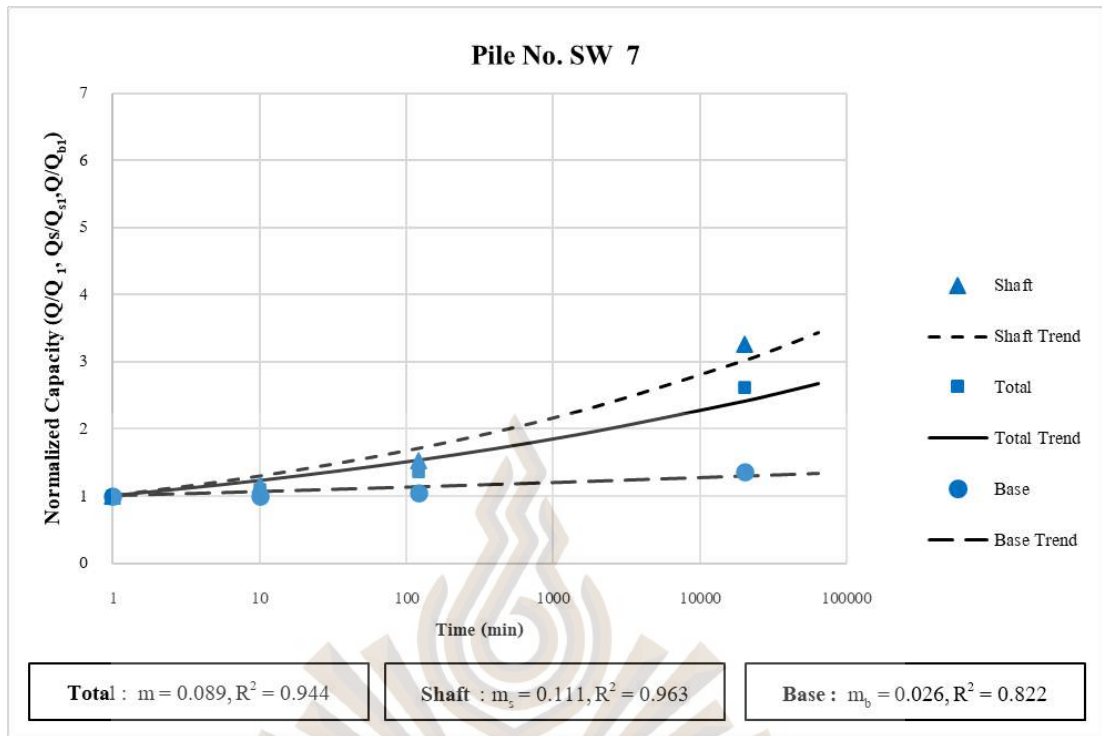


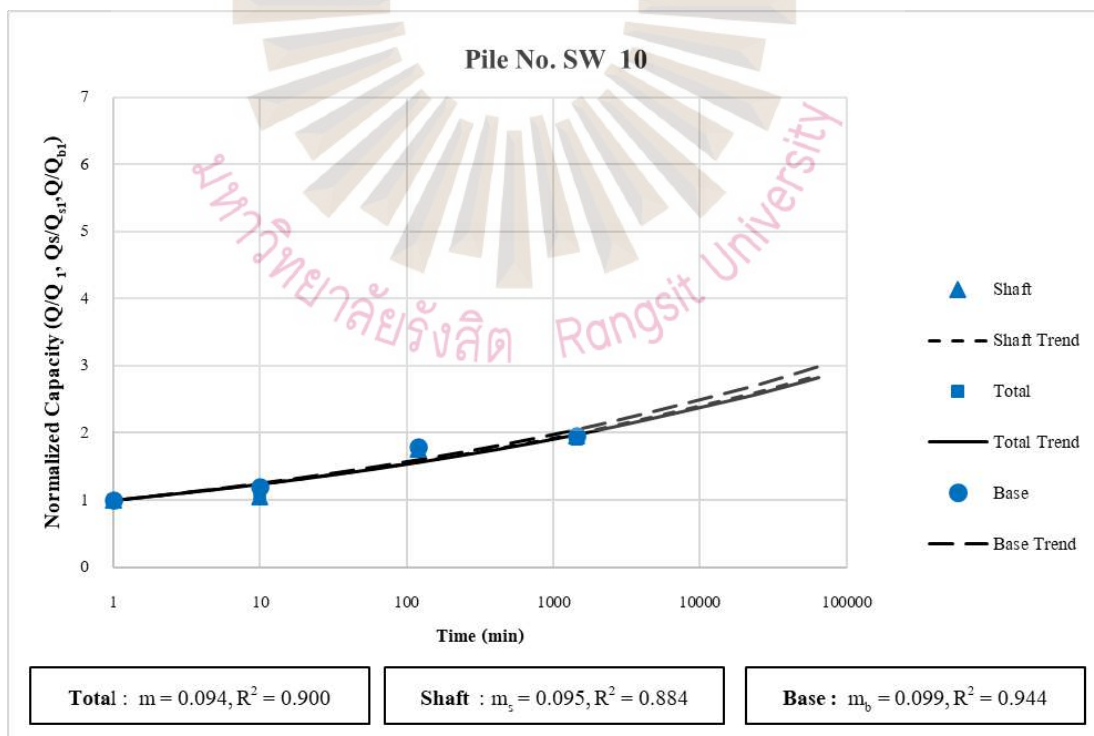
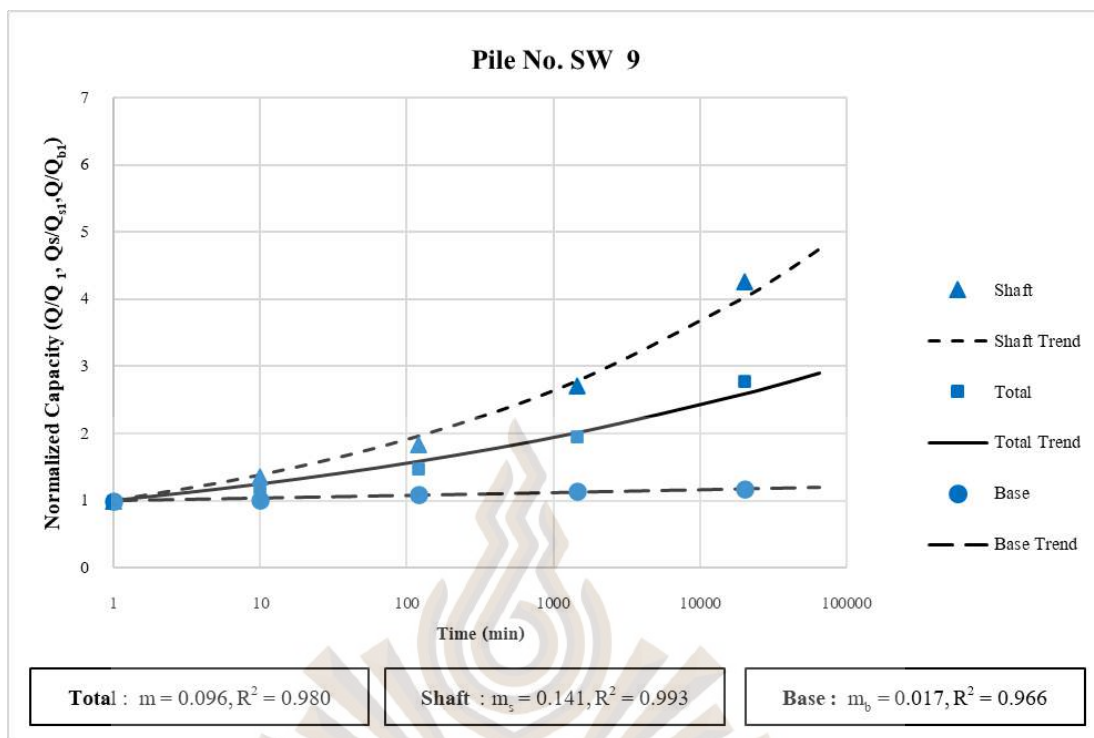


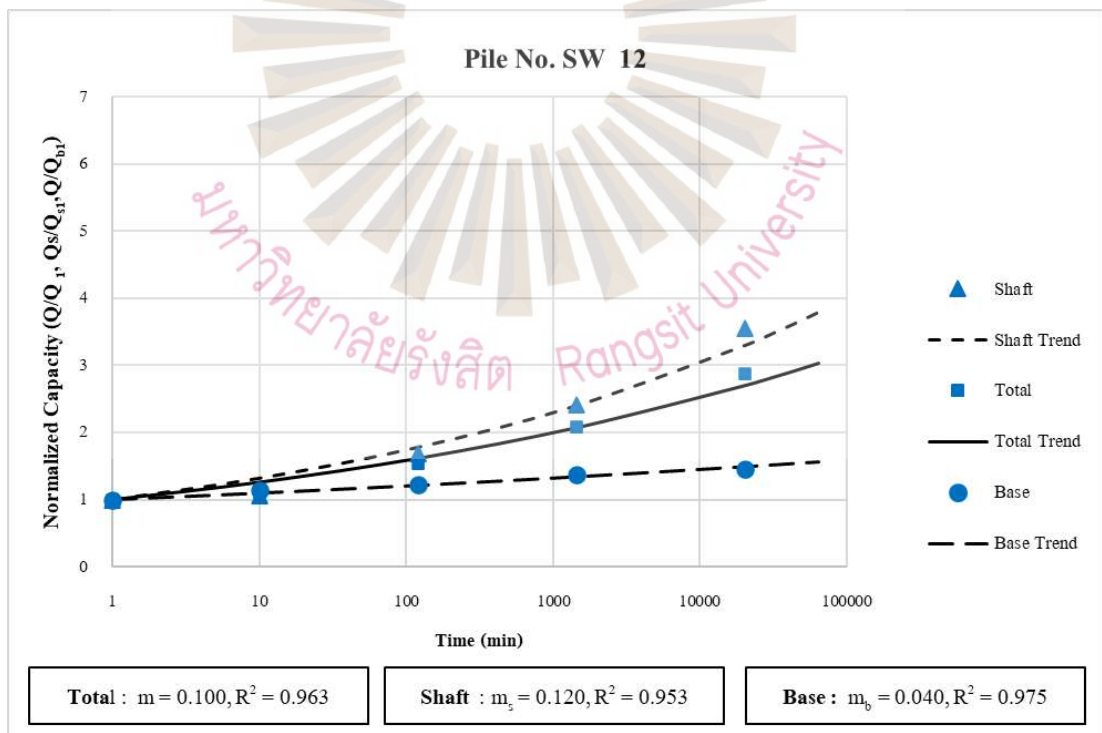
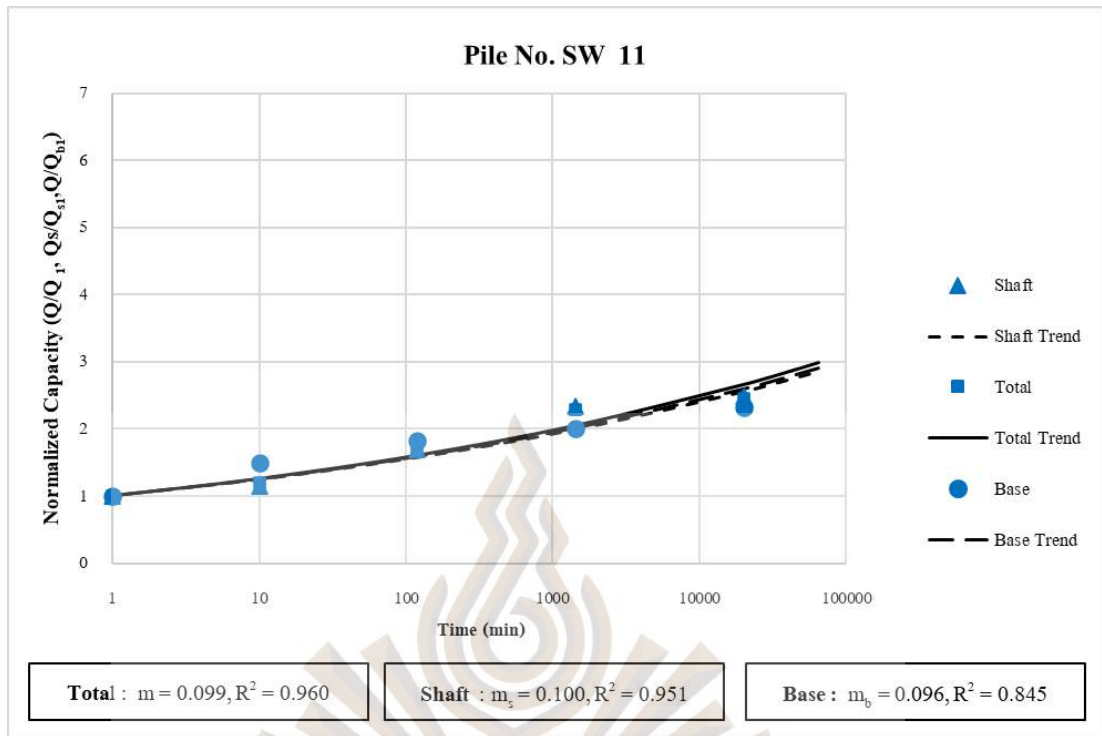


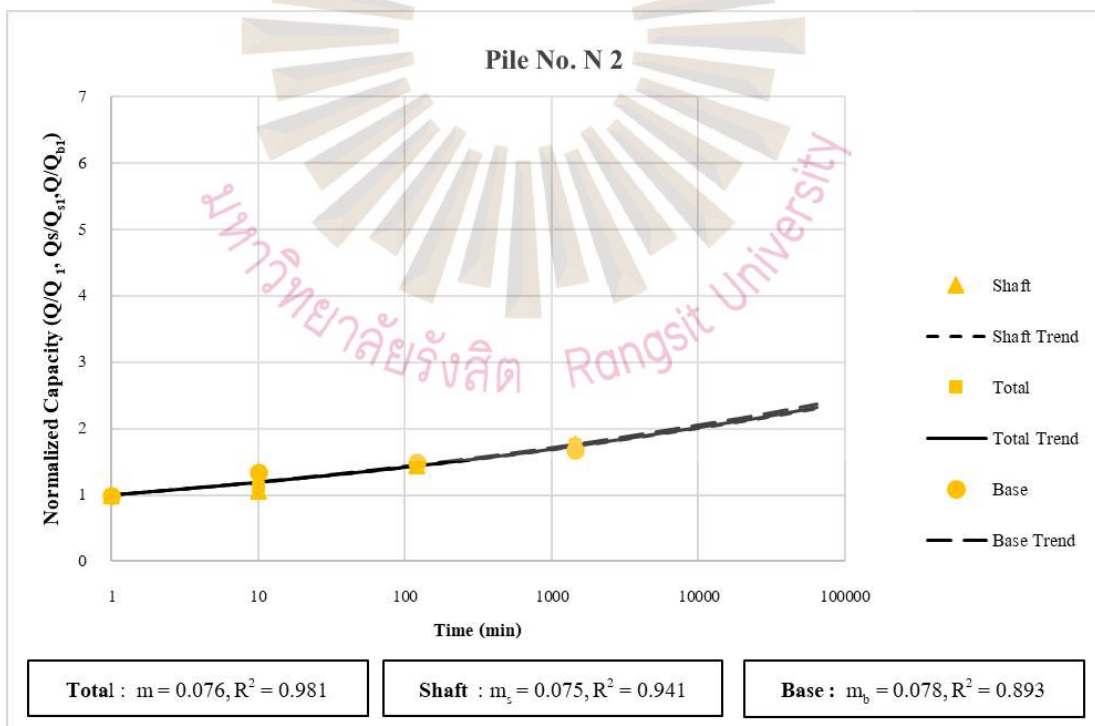
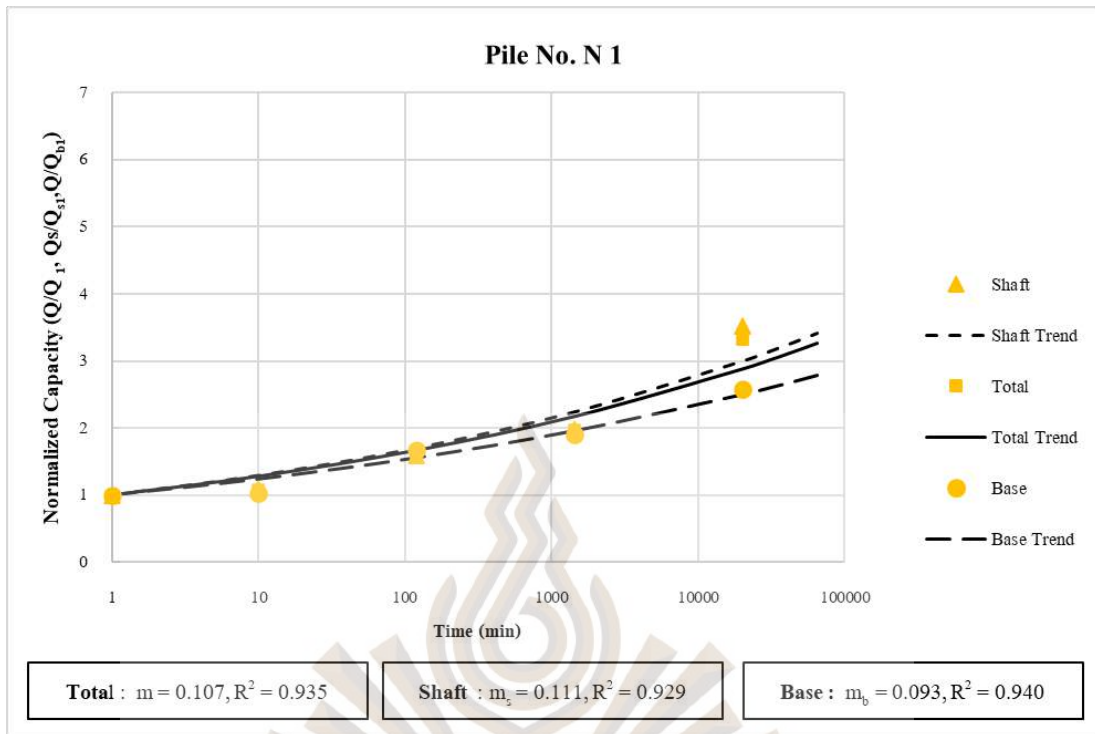


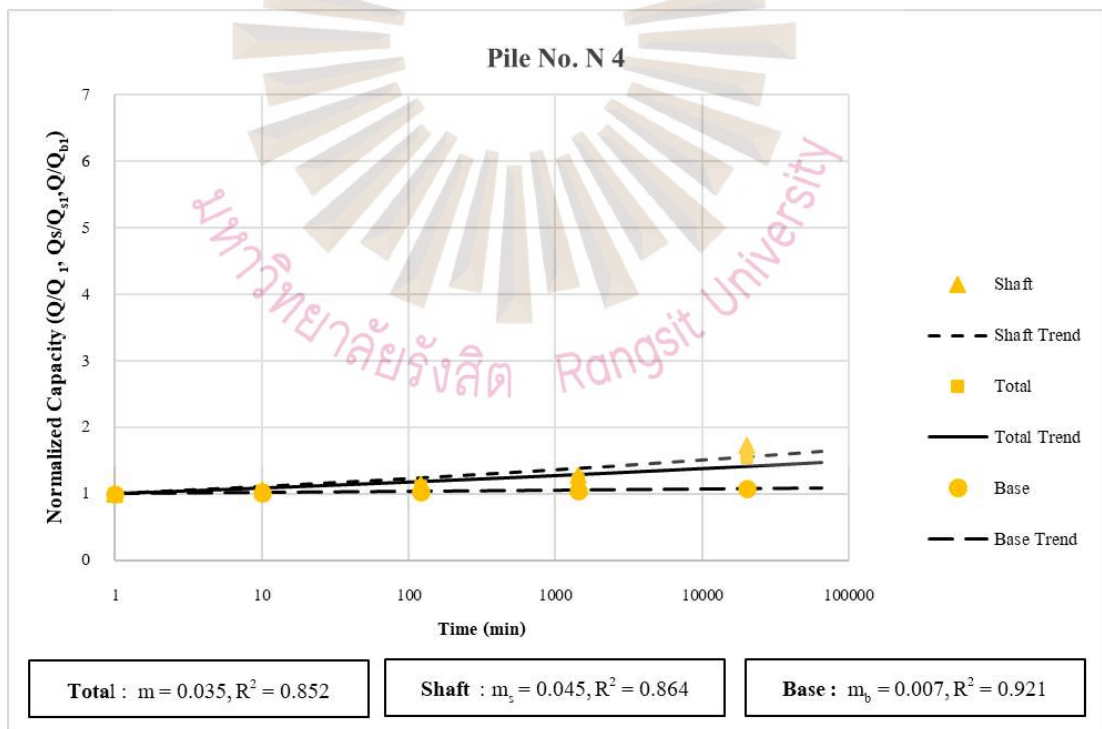
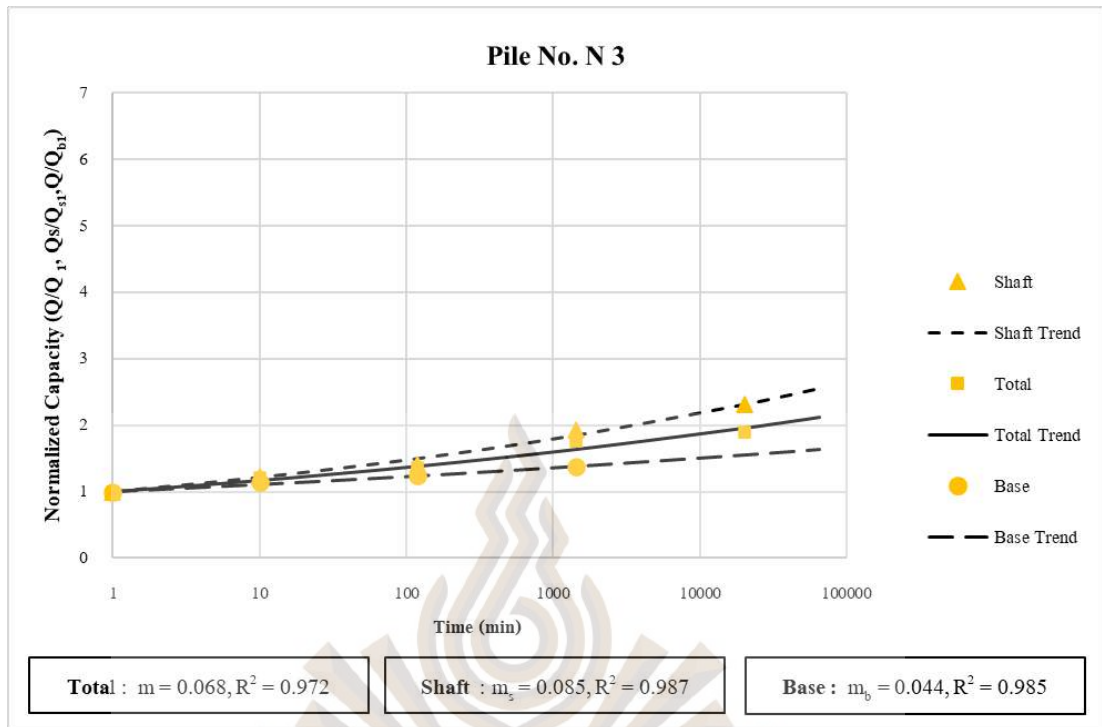


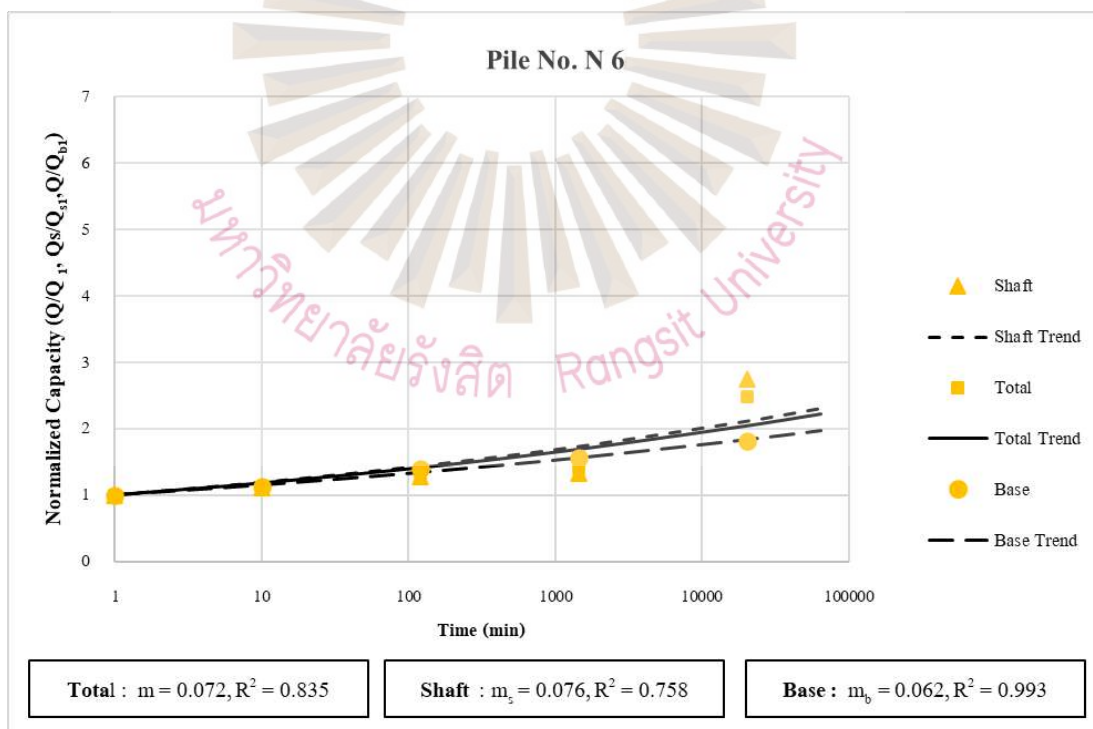
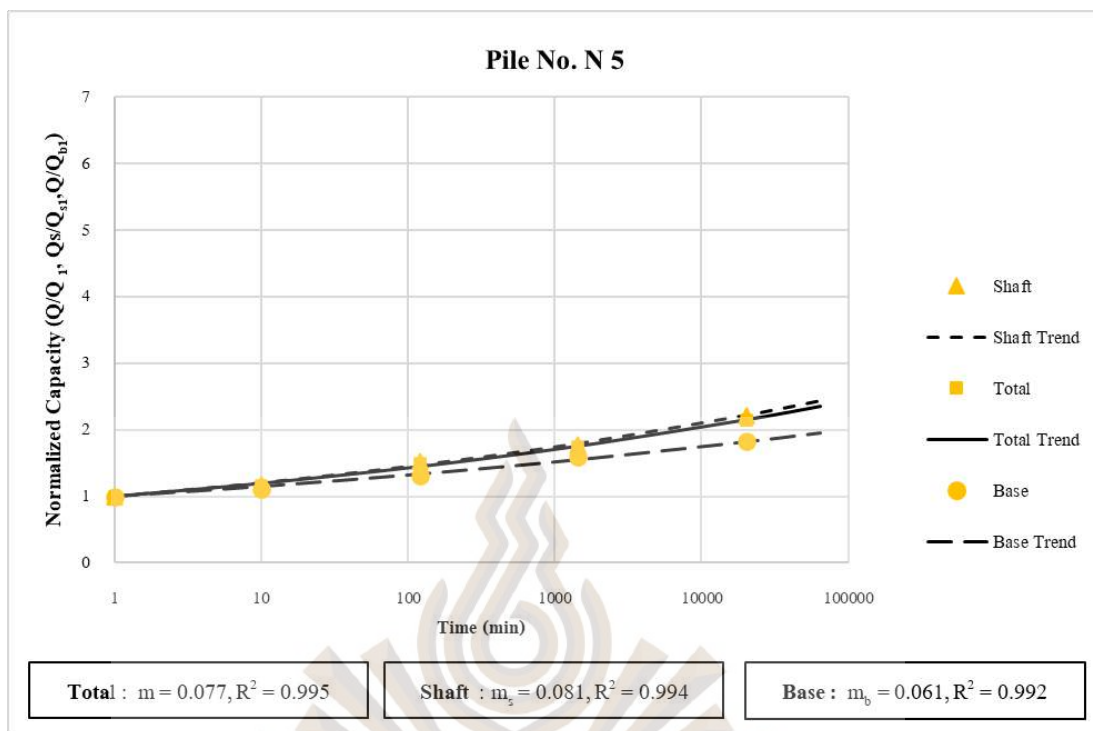


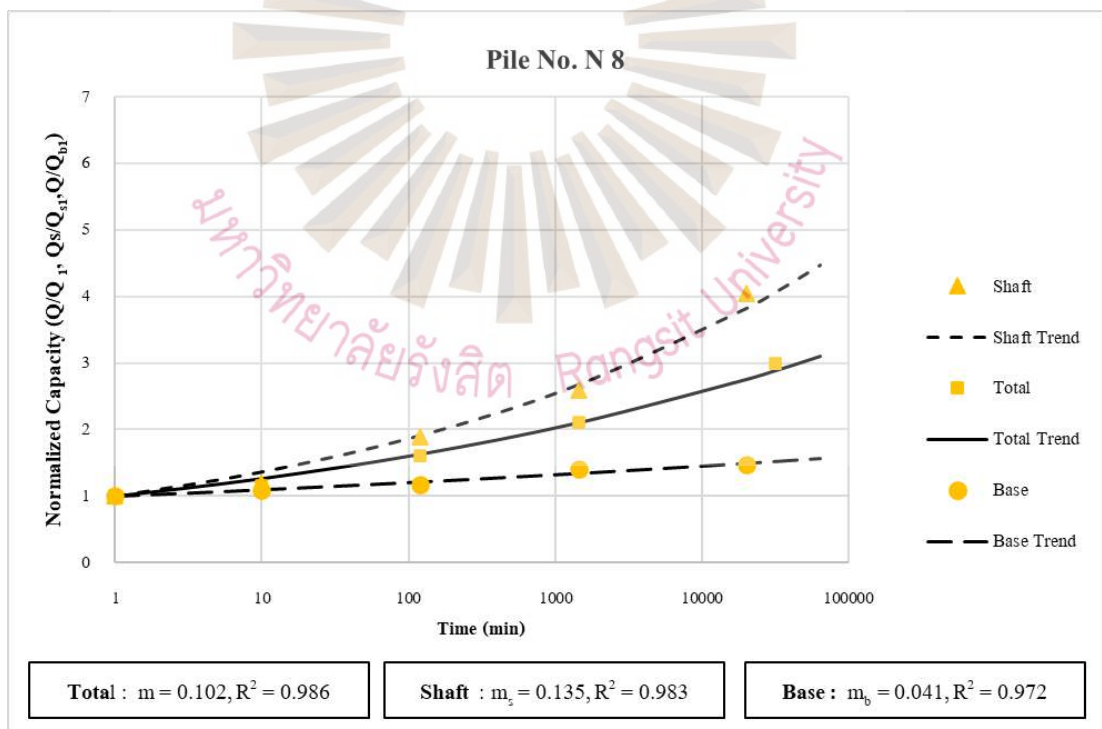
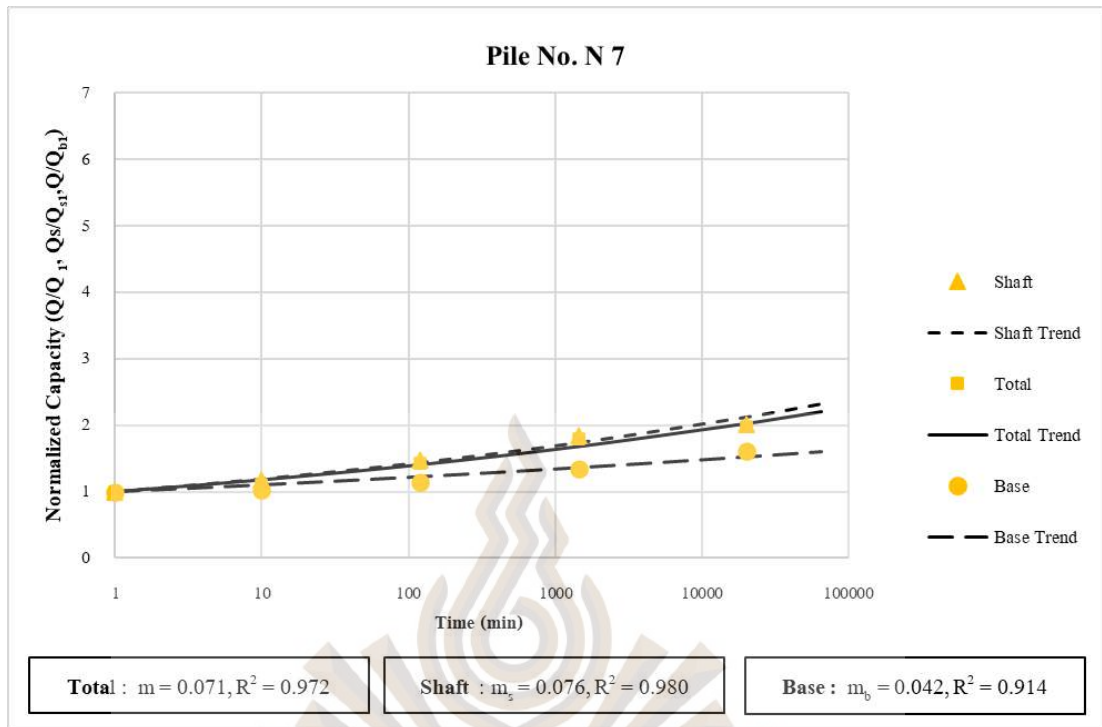


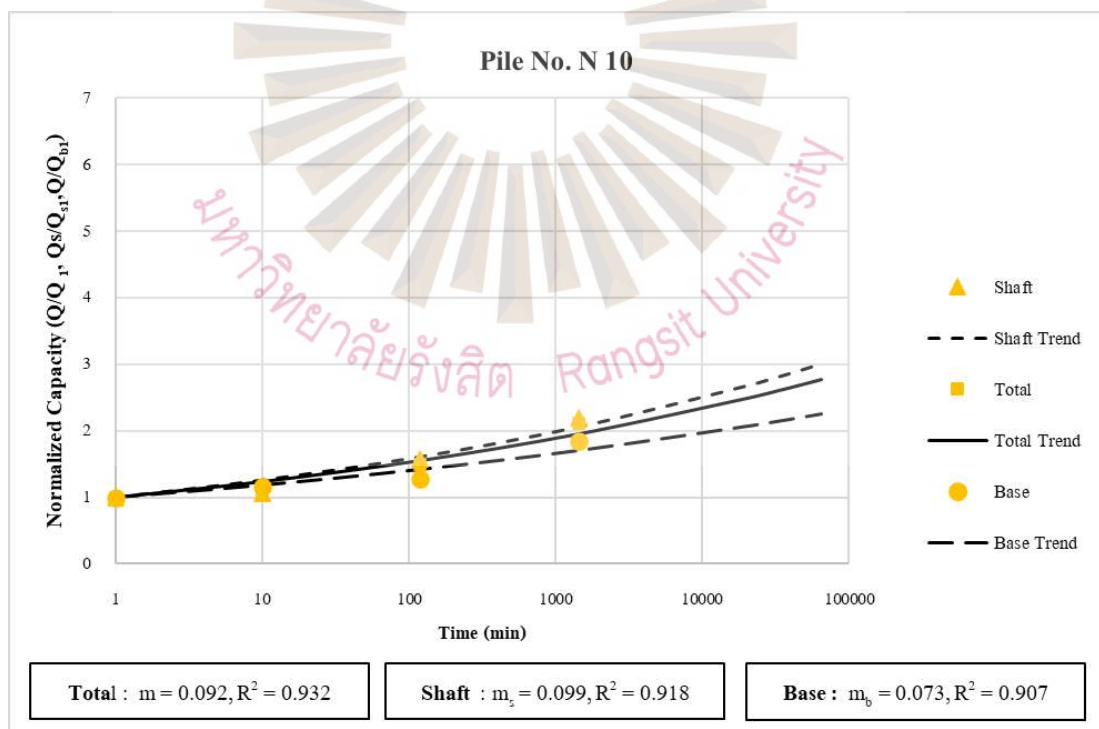
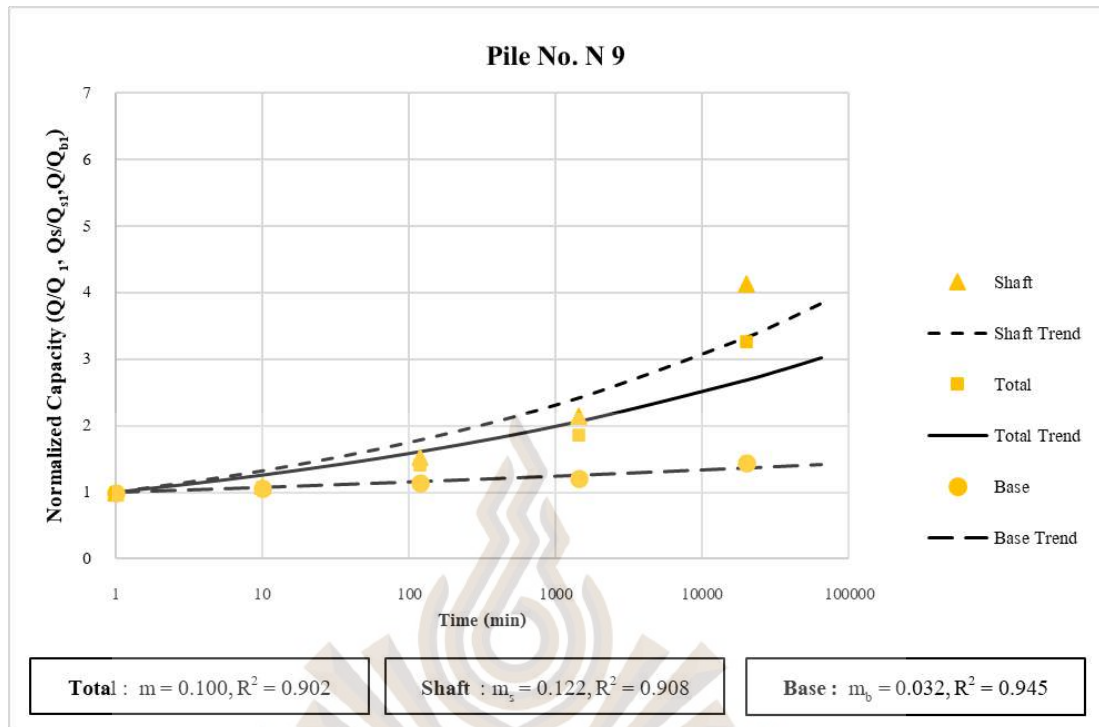


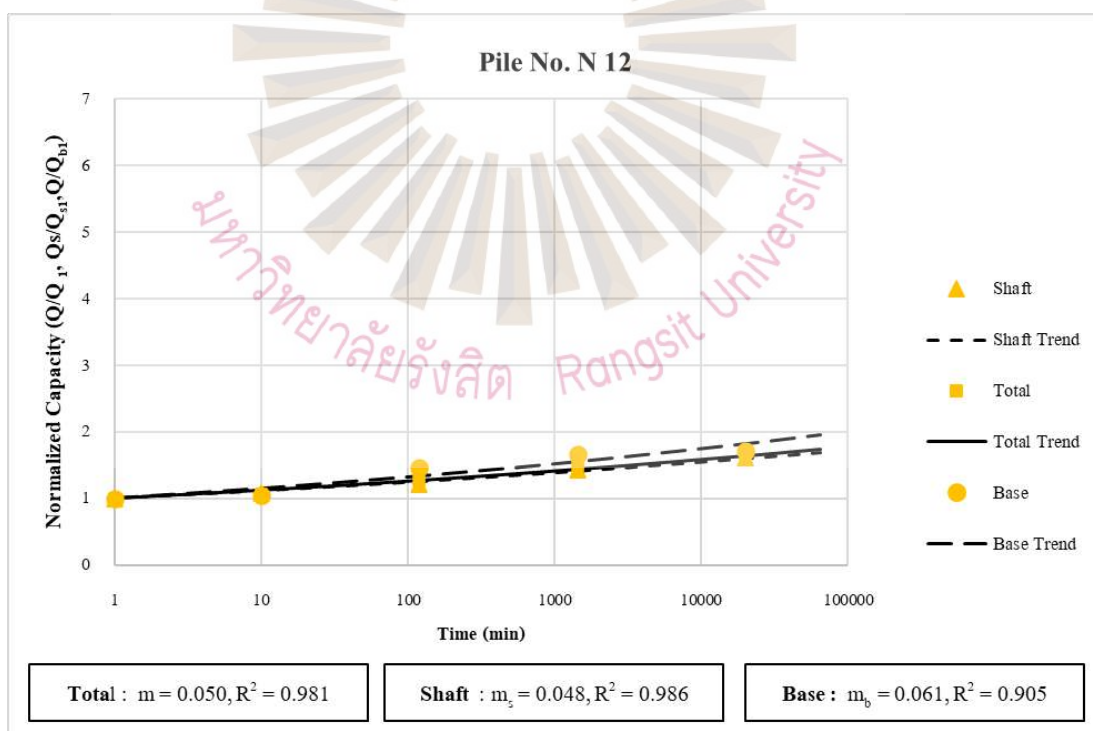
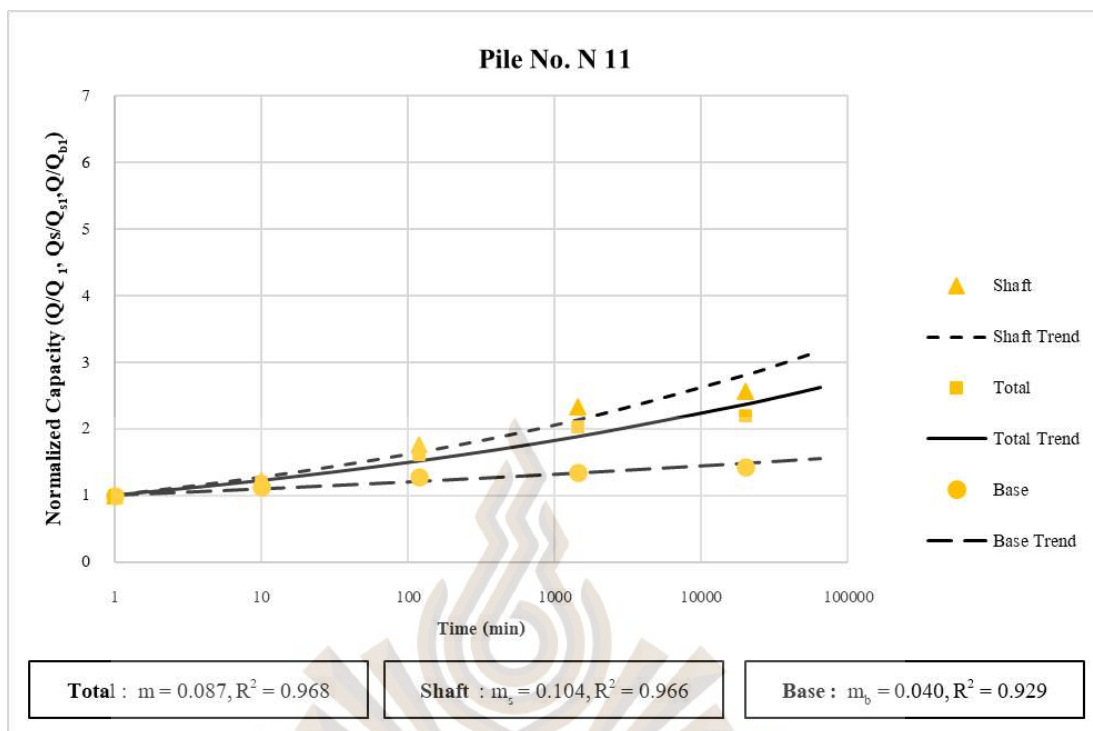


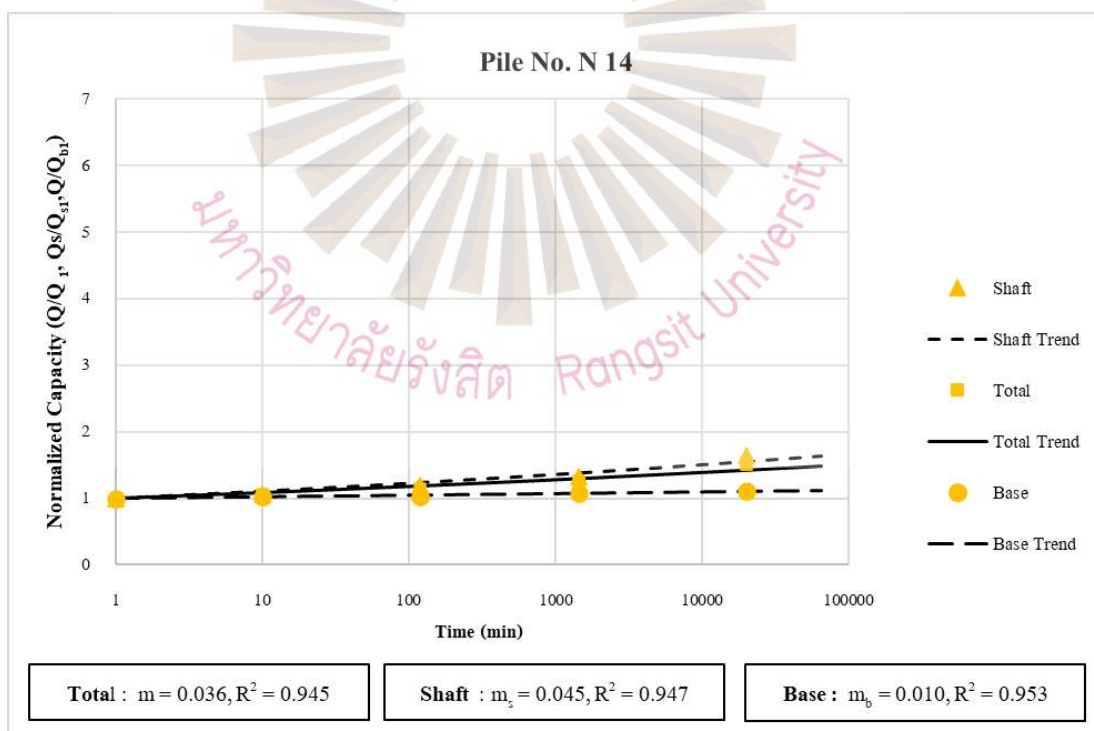
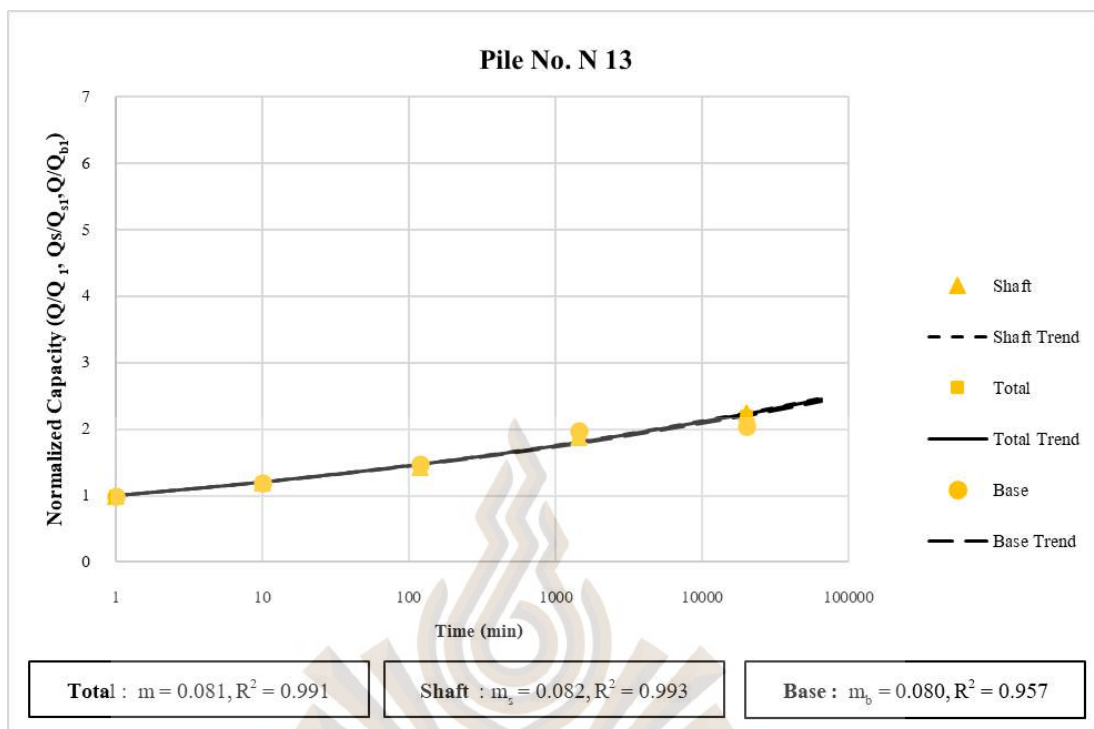


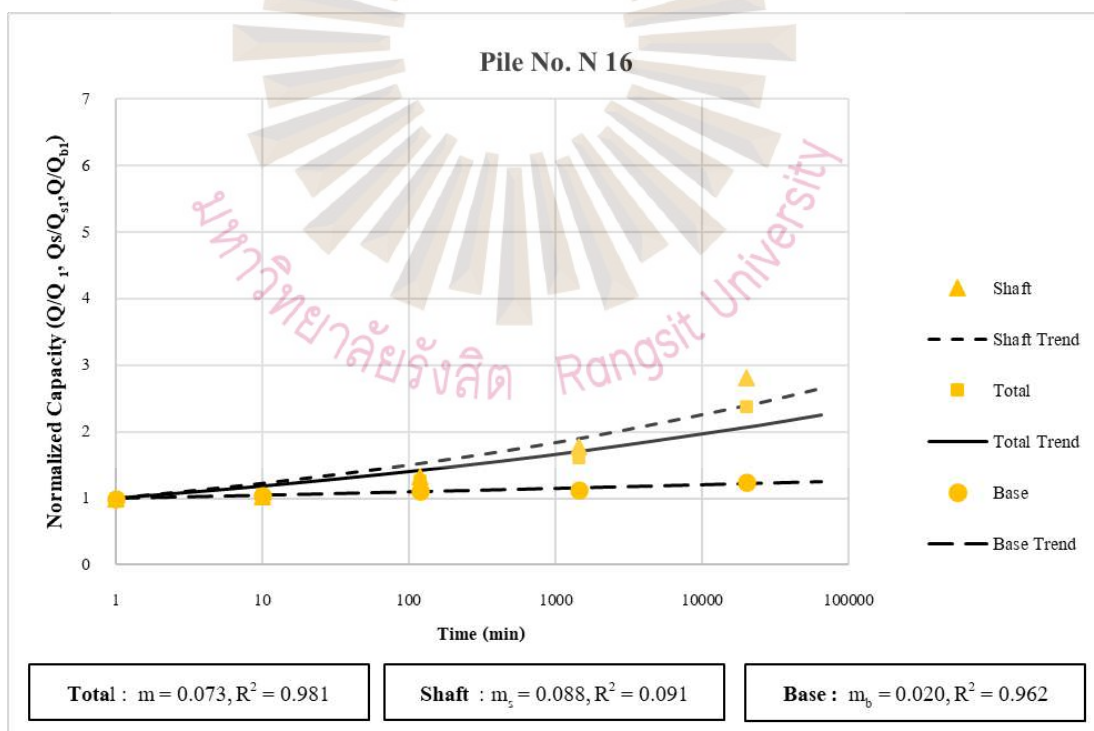
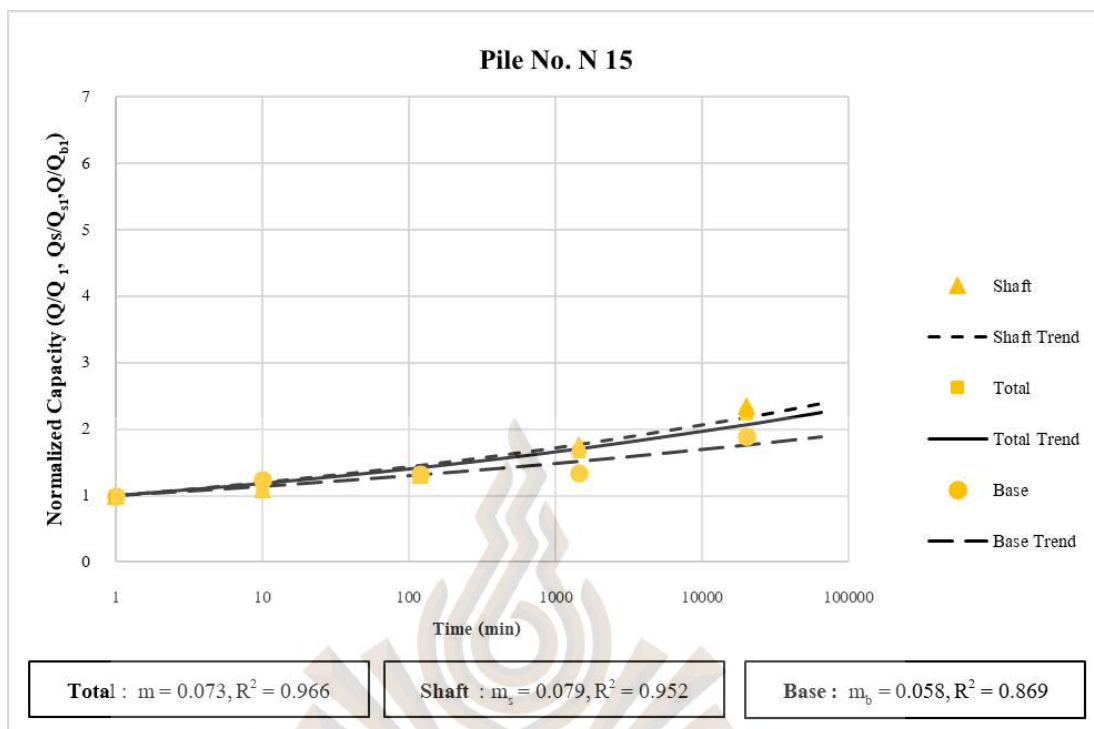


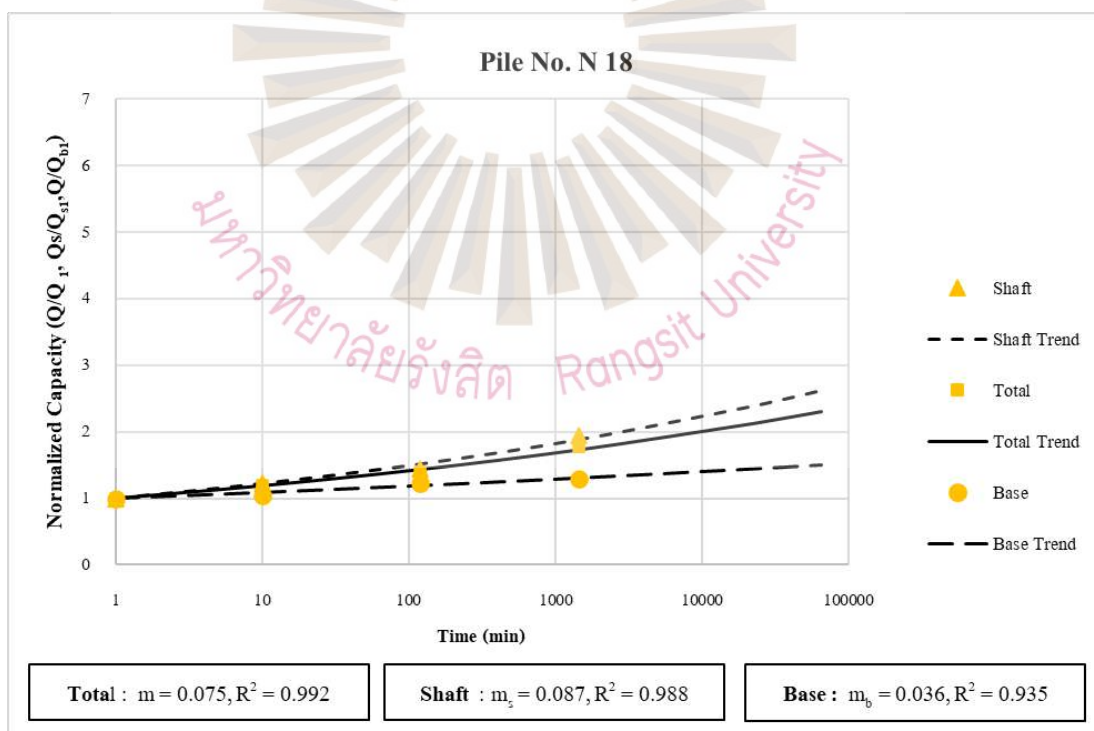
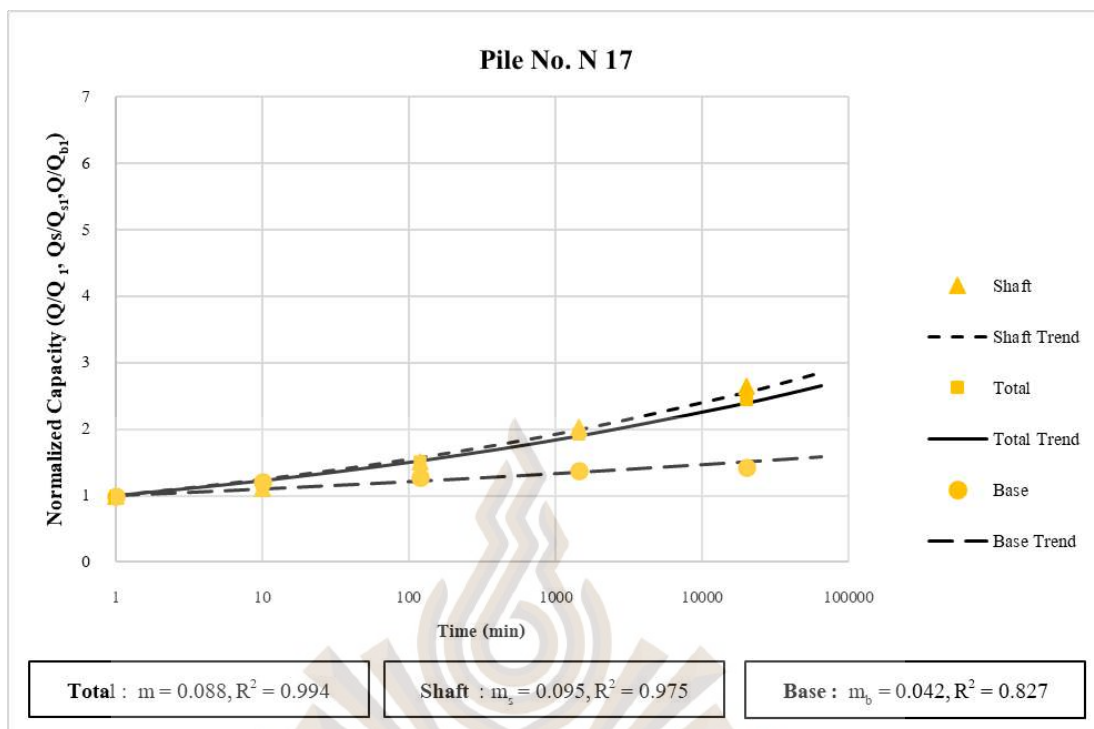


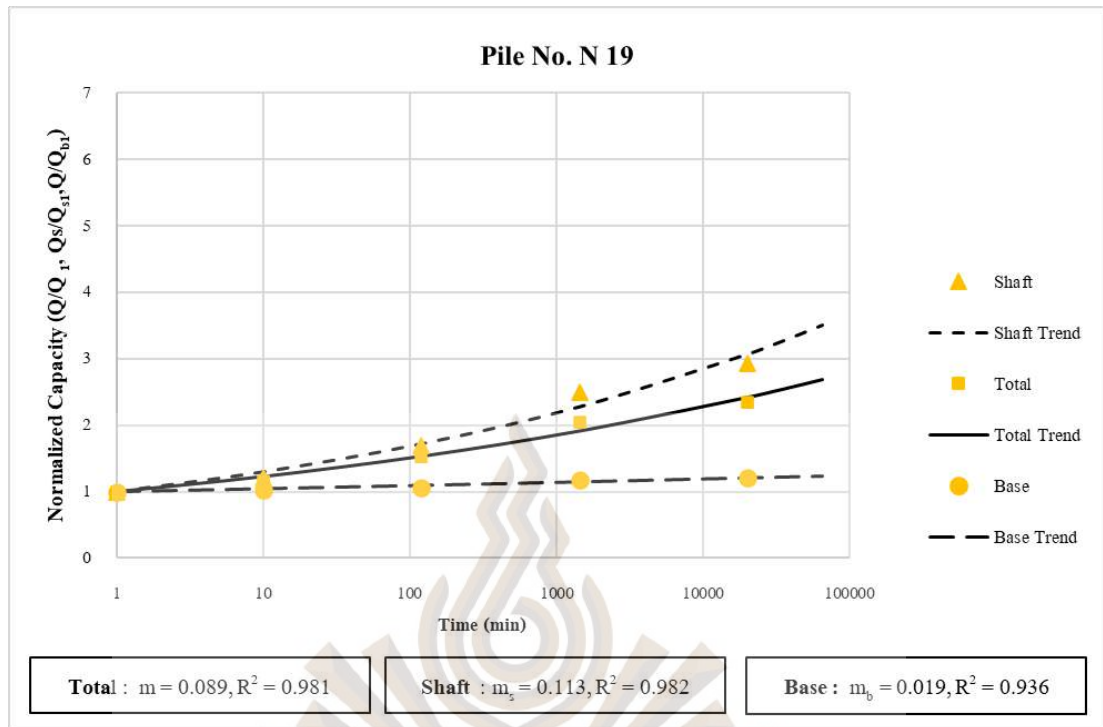












ภาคผนวก ค
การหาค่าเส้นแนวโน้มต่ำสุด



ในการศึกษานี้การหาเส้นกราฟแนวโน้มต่ำสุดที่ความเชื่อมั่นต่างๆ กระทำโดยการหาค่าทางสถิติของข้อมูลโดยใช้คำสั่ง LINEST ของโปรแกรม Microsoft Excel.

คำสั่ง LINEST จะคำนวณสถิติของเส้นโดยใช้วิธี "Least Squares" เพื่อคำนวณแนวโน้มเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดกับข้อมูลชุดข้อมูล X และ Y แล้วแสดงข้อมูลทางสถิติที่อธิบายเส้นตรงนั้น คำสั่ง LINEST ยังสามารถใช้ร่วมกับฟังก์ชันอื่นๆ เช่น ลอการิทึม เอ็กซ์โพเนนเชียล และ Power Series โดยการแปลงค่า ข้อมูล X หรือ Y ด้วยฟังก์ชันที่ต้องการ และ ใช้คำสั่ง LINEST กับชุดข้อมูลที่แปลงค่าแล้ว

ข้อมูลทางสถิติที่อธิบายเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดที่แสดงโดยคำสั่ง LINEST ประกอบด้วย ข้อมูลที่แสดงในตารางที่ ก-1 ซึ่งประกอบด้วย ค่าความชันของเส้นกราฟ (m), ค่าจุดตัดบนแกน Y (b), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าความชัน(SEm), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของจุดตัดบนแกน (SEb), ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่า Y (SEy), ค่าสถิติ F, ระดับความเป็นอิสระ (DOF), ค่า Regression sum of squares (SSreg), Residual sum of squares(SSres)

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลทางสถิติของเส้นแนวโน้มที่คำนวณโดยคำสั่ง LINEST

Slope m	Intercept b
SEm	SEb
R^2	SEy
F	DOF
SSreg	SSres

เส้นกราฟแนวโน้มต่ำสุดที่ความเชื่อมั่นต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$y_{LB} = y_0 - \text{TINV}(\alpha, \text{DOF}) \sqrt{\left(\frac{\text{SEy}^2}{n} + \text{SEm}^2(x_0 - x_{\text{avg}})^2\right)} \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ y_{LB} คือค่า y ต่ำสุดสำหรับค่า x_0 ที่ความเชื่อมั่นเท่ากับ α

y_0 คือค่า y ที่คำนวณจาก $m x_0 + b$

$TINV(\alpha, DOF)$ คือค่า t-Statistics ที่ความเชื่อมั่น α และ ระดับความเป็นอิสระ (DOF)

x_0 คือค่า x ใดๆ ที่ต้องการคำนวณ ค่า y_{LB}



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	อสมภรณ์ ทองดี
วัน เดือน ปีเกิด	14 มีนาคม 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา , 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	73 หมู่ 5 ตำบลขามป้อม อำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น
สถานที่ทำงาน	บริษัท เอพซิลอน จำกัด
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรสำนักงาน ประจำโครงการฯ

