

การทดสอบการโก่งของพินชุด

Experimental of deflection in tillage tools

นายเดโช ทาอินทร์
นายทรงวุฒิ คิ้วมหาสอน
นายมานนท์ คำเข้ม

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2542

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

การทดสอบการโค้งงอของฟันชุด

นาย เดโช ทาอินทร์

นาย ทรงวุฒิ ค้างมหาสอน

นาย มานนท์ คำเข้ม

วิศวกรรมเครื่องกล

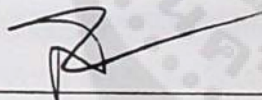
อาจารย์ตำรวจ กระระนันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์



(อาจารย์ตำรวจ กระระนันท์)

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต บัวแก้ว)

กรรมการ

(อาจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ)

กรรมการ

การทดสอบการโก่งของพินชุด

ปีการศึกษา 2542

โดย

นายเดโช ทาอินทร์

นายทรงวุฒิ ค้วงมหาสอน

นายมานนท์ คำเข้ม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สำรวย กระระนันท์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต กล่าวถึงวิธีการทดสอบพินชุดซึ่งมีใช้ในประเทศไทย โดยเลือกมาทำการทดสอบทั้งหมด 3 ชนิด โดยในการทดสอบได้ตั้งเงื่อนไขใน การทดสอบที่ ความชื้นของดิน ความหนาแน่นของดิน ความลึกของพินชุดในการใช้งาน และความเร็วเดียวกัน เพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละแนวแกนบนระนาบของพินชุด และเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนซึ่ง เกิดขึ้นบนพินชุด แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาความเหมาะสมของการใช้งานในพินชุดแต่ละชนิด ผลการทดสอบออกมาปรากฏว่า ในพินชุดแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยจากผลการทดสอบพบว่า พินชุดชนิดที่ 2 มีค่าความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุด แต่ให้ความกว้าง ของร่องดินเมื่อใช้งานสูงสุด ดังนั้นพินชุดชนิดนี้ จึงเหมาะสมที่จะใช้งานในดินที่มีความแข็งไม่มาก และต้องการขนาดของร่องดินกว้าง พินชุดชนิดที่ 3 มีค่าความเค้นเกิดขึ้นน้อยที่สุด แต่ให้ความ กว้างของร่องดินต่ำสุด ดังนั้นพินชุดชนิดนี้ จึงเหมาะสมที่จะใช้งานในดินที่มีความแข็งมาก แต่ไม่ ต้องการขนาดของร่องดินกว้าง ส่วนพินชุดชนิดที่ 1 มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนพินชุดเป็นกลางโดย เปรียบเทียบกับพินชุดชนิดที่ 2 และ 3 และให้ค่าความกว้างของร่องดินเป็นกลางระหว่างชนิดที่ 2 และ 3 ด้วยเช่นกัน ดังนั้นพินชุดชนิดที่ 1 นี้ จึงเหมาะที่จะใช้ในดินที่มีความแข็งปานกลาง คือไม่ แข็งมากเท่ากับดินที่ใช้กับพินชุดชนิดที่ 3 แต่สามารถใช้ได้ในดินที่มีความแข็งมากกว่าดินที่ใช้ใน พินชุดชนิดที่ 2

Experimental Of Deflection In Tillage Tools

Academic Year 1999

By

Mr. Decho Tha-in

Mr. Songwut Doungmahasorn

Mr. Manon Khumyam

Project Report Advisor

Mr.Samruay Kharanan

ABSTRACT

The main object of this project is determine appropriate of tillage tools for each condition of soil. The appropriation of tillage tools were determine from value of shear and compressive stress in the experiment.

Experiment we use 3 types of tillage tools. Testing we fix moisture content and density of soil, depth and velocity of tillage tools in domain. The result of this experiment were show

- In material type 2 were given stress and ditch width maximum
- In material type 3 were given stress and ditch width minimum
- In material type 1 were given stress and ditch width medium between type 2 & 3

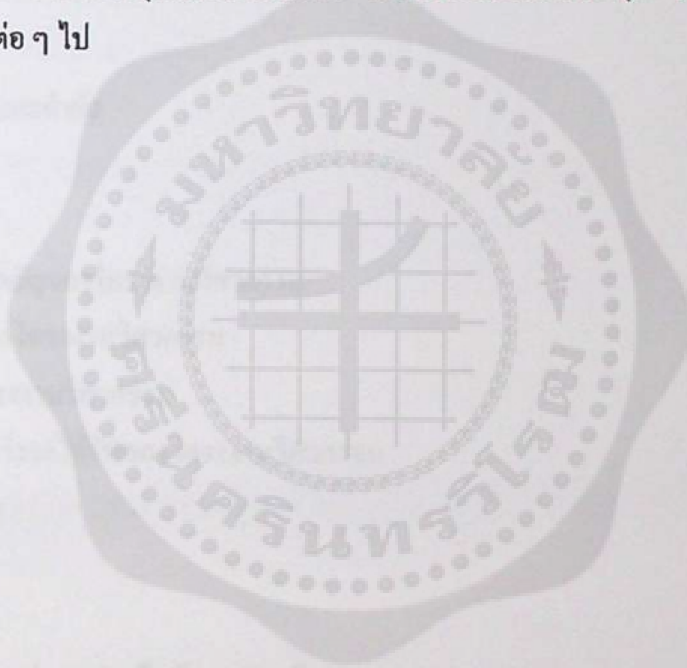
Thus, material type 2 appropriate to use in softness of soil and want more ditch width. Material type 3 appropriate to use in hardness of soil and want less ditch width. Material type 1 appropriate to use in soil hardness less than soil in type 3 but it can use in soil hardness more than type 2, ditch width of type 1 were medium between type 2 & 3

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ส้ารวบ กระระนันท์ อาจารย์ ภาควิชา ศีธรรมรึน และ อาจารย์ สมชาย แฉ่มใส อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ คณะผู้จัดทำโครงการ จนโครงการสำเร็จสมบูรณ์ทุกประการ กราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ การอบรมเลี้ยงดูมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำเป็นคนมีเหตุผล มีสติ มีปัญหาที่ดี สามารถรับผิดชอบตนเองจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้

สุดท้ายนี้ ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัย ได้โปรดคลนบันดาลให้ทุก ๆ ท่านในที่นี้มีแต่ ความสุขความเจริญต่อ ๆ ไป

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1. บทนำ	
ที่มาและความสำคัญของโครงการวิศวกรรม	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิศวกรรม	1
ขอบเขตของโครงการวิศวกรรม	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิศวกรรม	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
ความเค้น	3
ความเครียด	4
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	5
รีชีสแตนท์สเตรนเกจ	7
วงจรวีรส โดโนบริคท์	12
การติดตั้งสเตรนเกจ	13
ระบบไฮดรอลิกส์	18
ฟันชุดของเครื่องเพาะปลูก	23
การวิจัยที่ผ่านมา	27
การหาความชื้นของดิน	29
การหาความหนาแน่นของดิน	30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. การคำนวณและการออกแบบ	
การคำนวณในระบบไฮดรอลิกส์	31
การติดตั้งสเตรนเกจบนพืนซูด	33
การออกแบบการทดลอง	35
4. อุปกรณ์ วิธีการทดลอง และผลการทดลอง	
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
วิธีตั้งความเร็วลูกสูบ	37
วิธีการเตรียมดินในกระบอกก่อนการทดลอง	37
วิธีการติดตั้งพืนซูด	37
วิธีการใช้เครื่องมือวัดความเครียด	38
วิธีการทดลอง	38
ตัวอย่างการคำนวณ	39
ตัวอย่างการหาความชื้นดิน	42
ผลการทดลอง	44
5. สรุปผลการทดลอง	
สรุปผลการทดลอง	125
บรรณานุกรม	128
ภาคผนวก	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางค่าความไวความเครียดของโลหะ S_A สำหรับสเตรนเกจทั่วๆ ไป	9
4.1 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา	44
4.2 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	45
4.3 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	46
4.4 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	47
4.5 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา	50
4.6 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	51
4.7 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	52
4.8 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	53
4.9 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา	56
4.10 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	57
4.11 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	58
4.12 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟิสิกส์แบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

[illegible]

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	81
4.27 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	82
4.28 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	83
4.29 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา	86
4.30 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	87
4.31 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	88
4.32 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	89
4.33 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา	92
4.34 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย	93
4.35 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา	94
4.36 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย	95
5.1 ข้อดีข้อเสียของฟันชุดแต่ละชนิดและลักษณะการใช้งาน	127
ตารางภาคผนวกที่	
1. ตารางข้อมูลการเลือกใช้ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกส์ (ของ Northman)	141

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงความเค้นดึง	3
2.2 แสดงความเค้นอัด	3
2.3 แสดงความเค้นเฉือน	4
2.4 แสดงความเครียดดึง	4
2.5 แสดงความเครียดอัด	5
2.6 แสดงความเครียดเฉือน	5
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	6
2.8 แสดงอิเล็กทริกอลิซิสแดนท์สเตรนเกจ	8
2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R/R$ ในรูปฟังก์ชันของความเครียด สำหรับ คอนสแตนแตน	9
2.10 แสดงสเตรนเกจแบบต่าง ๆ	11
2.11 แสดงวงจรสโตนบริคท์ถูกใช้ในการกลับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R/R$ ของสเตรนเกจให้ออกมาเป็นค่าของความต่างศักย์ขาออก U_0	11
2.12 แสดงวงจรความต่างศักย์คงที่ของวีธสโตนบริคท์	12
2.13 แสดงการติดเทปใส	15
2.14 แสดงการดึงเทปใส	15
2.15 แสดงเทปใสติดกับสเตรนเกจที่ดึงออกมาเรียบร้อยแล้ว	15
2.16 แสดงการดึงเทปใสหอยดกาวลงบนสเตรนเกจ	16
2.17 แสดงการใช้ทิชชูกดไล่ฟองอากาศ	16
2.18 แสดงการดึงเทปใสออกจากตัวสเตรนเกจ	16
2.19 แสดงตำแหน่งของสเตรนเกจและแผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณ	17
2.20 แสดงวิธีการทำลวดจัมเปอร์	17
2.21 แสดงเกจที่ทำการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว	17
2.22 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์	18
2.23 แสดงส่วนต่าง ๆ ของกระบอกสูบไฮดรอลิกส์	20
2.24 แสดงส่วนประกอบชุดดันกำลังไฮดรอลิกส์	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงการทำงานของลูกสูบสองทิศทาง	23
2.26 แสดงลักษณะและรูปร่างของหัวพรวนของเครื่องเพาะปลูก	24
2.27 แสดงแรงที่กระทำต่อฟันชุดในแกนต่างๆ	25
2.28 กราฟแสดงการแปรผันระหว่างมุม ψ กับมุม ϕ ของหัวพรวนของเครื่องเพาะปลูก	26
3.1 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในฟันชุดแบบที่ 1	33
3.2 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในฟันชุดแบบที่ 2	34
3.3 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในฟันชุดแบบที่ 3	34
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน	48
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง	49
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน	54
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง	55
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน	60
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง	61
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน	66
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง	67
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนฟันชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน	72

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง	115
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 1 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	116
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 1 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	117
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 1 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	118
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	119
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	120
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	121
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	122
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	123
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm	124
↑	
รูปภาคผนวกที่	
1. แสดงเครื่องทดสอบการ โกงของพื้นขูด	130
2. แสดงพื้นขูดทั้ง 3 แบบ ซึ่งติดตั้ง strain gauge เรียบร้อยพร้อมที่จะทำการทดสอบ	130
3. แสดงลักษณะการติดตั้งพื้นขูดในดินก่อนการทดสอบ	131
4. แสดงลักษณะพื้นขูดในดินหลังการทดสอบ	131

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	mm ²
A _M	พื้นที่หน้าตัดของโลหะตัวนำไฟฟ้า	mm ²
E	โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น	N/mm ²
F	แรง	N
G	โมดูลัสของความแข็งแรง	N/mm ²
L	ความยาวเดิมของวัตถุ	mm
L _M	ความยาวของโลหะตัวนำไฟฟ้า	mm
R	ความต้านทานของสเตรนเกจ	Ω
ΔR	ความต้านทานของสเตรนเกจที่เปลี่ยนไป	Ω
R _M	ค่าความต้านทานของโลหะตัวนำ	Ω
S _s	ค่าความไวความเครียดของโลหะ	-
S _ε	ค่าแกกแฟกเตอร์	-
U _o	ค่าความต่างศักย์ขาออก	V
U _s	ค่าความต่างศักย์ขาเข้า	V
V	อัตราส่วนปริมาตรของโลหะตัวนำ	-
σ _t	ความเค้นดึง	kPa
σ _c	ความเค้นอัด	kPa
τ	ความเค้นเฉือน	kPa
ε _t	ความเครียดดึง	-
ε _c	ความเครียดอัด	-
γ	ความเครียดเฉือน	-
δ _t	ส่วนที่ยืดออกของวัตถุ	mm
δ _c	ส่วนที่หดลงของวัตถุ	mm
ρ	ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะ	Ω
ε _s	ความเครียดตามแนวแกนของตัวนำ	-
ε _t	ความเครียดตามแนวขวางของตัวนำ	-

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการวิศวกรรม

การขุดไถเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเพาะปลูกมากที่สุด จุดมุ่งหมายในการขุดคือ จัดเตรียมพื้นที่ให้เหมาะสมที่สุดในการเพาะปลูก การขุดทำให้เกิดช่องว่างระหว่างดินโดยการลดขนาดของก้อนดิน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ฟันขุดไถ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และมีหลายแบบหลายชนิดด้วยกัน เพื่อให้เลือกใช้ได้ตามสภาพของดินหากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสมอาจทำให้ ประสิทธิภาพในการใช้งานต่ำและเกิดความเสียหายขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติและขีดความสามารถของฟันขุดไถ เพื่อหาความเหมาะสมที่จะเลือกใช้งานในสภาพงานที่แตกต่างกันไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิศวกรรม

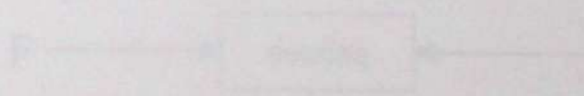
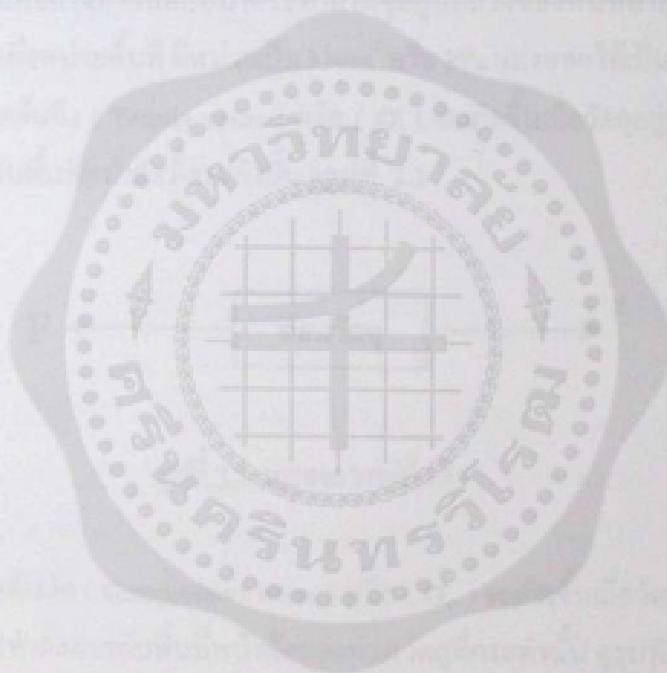
1. เพื่อวิเคราะห์การแตกหักทางกายภาพของเม็ดดิน ที่ความเร็วแตกต่างกัน
2. เพื่อวิเคราะห์ความเครียดของฟันขุดที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของฟันขุดชนิดต่าง ๆ
3. เพื่อศึกษาลักษณะการโค้งงอของฟันชนิดต่าง ๆ ที่มีใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร

ขอบเขตของโครงการวิศวกรรม

1. ทดสอบฟัน 3 ชนิดที่มีใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรในปัจจุบัน
2. สร้างชุดสถิติการทดสอบในสนามขนาดเล็ก
3. ใช้ดินในพื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์อภีร์ทดสอบ
4. ใช้ความเร็วในการทดสอบ 3 ความเร็วคือ 5 cm/s, 7 cm/s, 9 cm/s

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการนวัตกรรม

1. สามารถวิเคราะห์การโค้งงอของฟันที่ความเร็วต่าง ๆ ได้
2. สามารถนำประโยชน์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อไปเลือกชนิดของฟันให้เหมาะสมกับความเร็วที่ใช้ในสนามจริง
3. เพื่อประยุกต์การใช้งานสเตรนเกจ (strain gauge) ในการวัดแบบอื่น ๆ



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบเครื่องวัด

1. ส่วนหัวเครื่องวัด (Measuring head) หรือ (T) เป็นส่วนที่จะวัดค่าความเค้น

โดยจะนำค่าที่ได้ไปวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นบนผิวฟันกับอัตราความเร็วฟัน 2.3

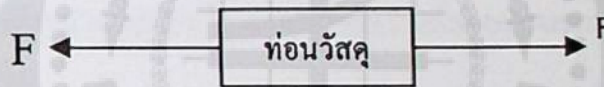
บทที่ 2

ทฤษฎี

ความเค้น (Stress)

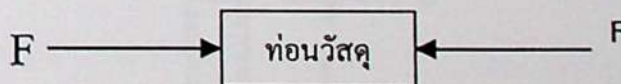
ความเค้นคือแรงภายนอกที่มากระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุนั้น หรือแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น kN/m^2 หรือ kPa แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ความเค้นดึง (Tensile stress) หรือ (σ_t) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง โดยแรงดึงจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่กระทำนั้น รูปที่ 2.1



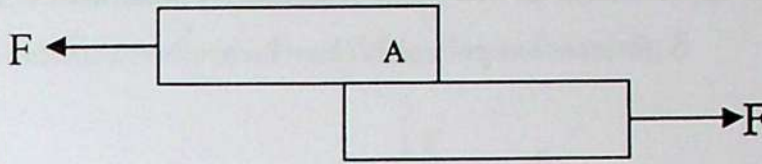
รูปที่ 2.1 แสดงความเค้นดึง

2. ความเค้นอัด (Compressive stress) หรือ (σ_c) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงอัด โดยแรงอัดจะต้องกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุที่กระทำนั้น รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงความเค้นอัด

3. ความเค้นเฉือน (Shear stress) หรือ (τ) เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุนั้น โดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น รูป 2.3



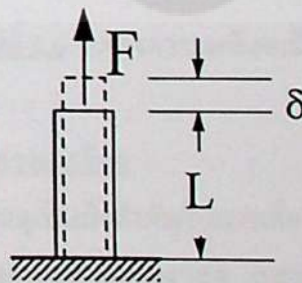
รูปที่ 2.3 แสดงความเค้นเฉือน

- เมื่อ τ คือความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น
 A คือพื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแรง
 F คือแรงเฉือนที่กระทำกับท่อนวัตถุ

ความเครียด (Strain)

ความเครียดคือขนาดที่เปลี่ยนไปต่อขนาดเดิม เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ความเครียดแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

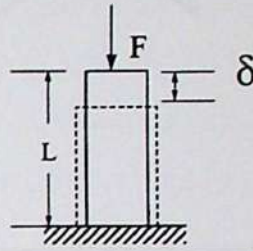
1. ความเครียดดึง (Tensile strain) หรือ ϵ_t เมื่อท่อนวัตถุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกน และเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างช้า ๆ ท่อนวัตถุนี้ก็จะเกิดการยืดออกที่ละน้อยตามขนาดของแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของแรง F ทำให้ท่อนวัตถุยืดออกเท่ากับ δ ดังแสดงในรูป ขณะที่ท่อนวัตถุยืดออกก็จะเกิดการหดตามแนวตั้งของท่อนวัตถุนั้น



รูปที่ 2.4 แสดงความเครียดดึง

- เมื่อ ϵ_t คือความเครียดดึงที่เกิดขึ้น
 δ คือส่วนที่ยืดออกของวัตถุ
 L คือความยาวเดิมของวัตถุนั้น

2. ความเครียดอัด (Compressive strain) หรือ ϵ_c เมื่อท่อนวัตถุถูกกระทำด้วยแรงกดตามแนวแกน และเพิ่มแรงกดขึ้นอย่างช้าจนทำให้ท่อนวัตถุหดตัวลงเท่ากับ δ



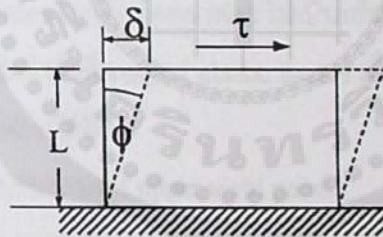
รูปที่ 2.5 แสดงความเครียดอัด

เมื่อ ϵ_c คือความเครียดกดที่เกิดขึ้น

δ คือส่วนที่หดตัวของวัตถุ

L คือความยาวเดิมของวัตถุ

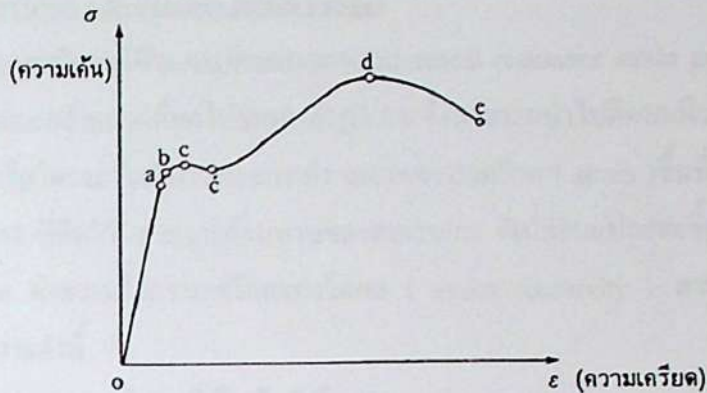
3. ความเครียดเฉือน (Shear strain) หรือ (γ) เมื่อมีแรงเฉือนกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดขึ้นมา ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความเครียดเฉือน



รูปที่ 2.6 แสดงความเครียดเฉือน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้โลหะที่จะมาทำโครงสร้างต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุโดยเฉพาะกำลังของวัสดุ การทดสอบวัสดุที่สำคัญอันหนึ่งคือ การทดสอบโดยใช้แรงดึงโดยเฉพาะวัสดุเหนียว เช่น เหล็ก จะพบว่าความเค้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดในช่วงระยะหนึ่ง แต่เมื่อผ่านช่วงนี้ไปแล้วความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงต่อไปอีก ดังแสดงในกราฟ



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

จากกราฟมีจุดสำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. จาก 0 ถึง a กราฟจะเป็นเส้นตรง แสดงว่าแรงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับส่วนที่ขีดยืดออก หรือความเค้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียด
2. จุด a ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของเส้นตรง เรียกว่าขีดจำกัดสัดส่วน (proportional limit) เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟจะเป็นเส้นตรงหลังจากจุดนี้แล้วความเค้นจะไม่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียดอีกคือกราฟจะไม่เป็นเส้นตรง
3. จุด b เรียกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่น (elastic limit) เป็นจุดสุดท้ายที่ความยาวของวัตถุจะกลับมามีขนาดเท่าเดิมได้อีก
4. จุด c เรียกว่าจุดครากบน (upper yield point)
5. จุด c' เรียกว่าจุดครากล่าง (lower yield point)
6. จาก c ถึง e เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic) นั่นคือวัตถุยืดออกอย่างถาวรถ้าปล่อยแรงวัตถุจะไม่หดตัวกลับมาอยู่ในสภาพเดิมอีก
7. จาก 0 ถึง d การยืดเกิดขึ้นทุกส่วนตลอด gauge length
8. จาก d ถึง e การยืดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เฉพาะบริเวณที่จะเกิดการหักหรือขาดเท่านั้น
9. จุด d เรียกว่ากำลังประลัย (ultimate strength) เป็นจุดที่เกิดความเค้นขึ้นสูงสุดในวัตถุนั้น
10. จุด e เรียกว่าจุดแตกหัก (rupture point or breaking point) เป็นจุดที่วัตถุขาดออกจากกัน

รีซิสแตนซ์สเตรนเกจ (Resistance strain gauge)

อิเล็กทริกอลรีซิสแตนซ์สเตรนเกจ (Electrical resistance strain gauge) คือแผ่นโลหะบาง ๆ ที่มีลักษณะคล้ายลวดที่ขดไปขดมา ดังรูป 2.8 ซึ่งสามารถนำไปติดบนผิววัสดุหรือโครงสร้างได้ เมื่อวัสดุหรือโครงสร้างมีการกระทำ จะเกิดความเครียด (strain) ขึ้นที่วัสดุ และจะส่งผ่านไปยัง สเตรนเกจ ที่ติดไว้ ค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับภาระที่ทำให้เกิดความเครียด ค่าความไวความเครียดของโลหะ (strain sensitivity) สามารถอธิบายโดยการวิเคราะห์อย่างง่ายดังนี้

ค่าความต้านทาน R_M ของโลหะที่เป็นตัวนำคือ

$$R_M = \rho \frac{L_M}{A_M} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะ

L_M คือความยาวของโลหะตัวนำไฟฟ้า

A_M คือพื้นที่หน้าตัดของโลหะตัวนำไฟฟ้า

ทำการดิฟเฟอเรนเชียล 2.1 และหารด้วยค่าความต้านทานของโลหะตัวนำไฟฟ้า R ได้

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.2)$$

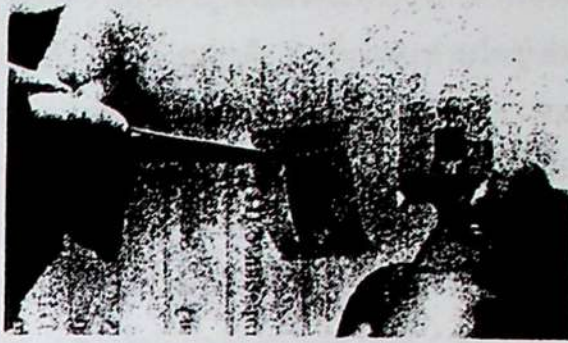
เทอม dA คือพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากมีการกระทำ สำหรับในกรณีสภาวะความเค้นดึงแกนเดียว (uniaxial tensile stress) จะได้

$$\epsilon_L = \frac{dL}{L} \text{ และ } \epsilon_t = -\nu \epsilon_L = -\nu \frac{dL}{L} \quad (2.3)$$

โดยที่ ϵ_L คือความเครียดตามแนวแกนของตัวนำ

ϵ_t คือความเครียดตามแนวขวางของตัวนำ

ν คืออัตราส่วนปัวซองของโลหะตัวนำ



รูปที่ 2.8 แสดงอิเล็กตรอนลึกรังสีที่สเตรนเกจ

ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำคือ d_0 ก่อนที่จะเกิดความเครียดในแนวแกนและ d_r หลังจากเกิดความเครียด จะเขียนได้ว่า

$$d_r = d_0 \left(1 - \nu \frac{dL}{L} \right) \quad (2.4)$$

จากสมการ 2.4 จะทำให้ได้ว่า

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L} + \nu^2 \left(\frac{dL}{L} \right)^2 \approx -2\nu \frac{dL}{L} \quad (2.5)$$

แทนค่าสมการ 2.5 ลงในสมการ 2.2

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1+2\nu) \quad (2.6)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้

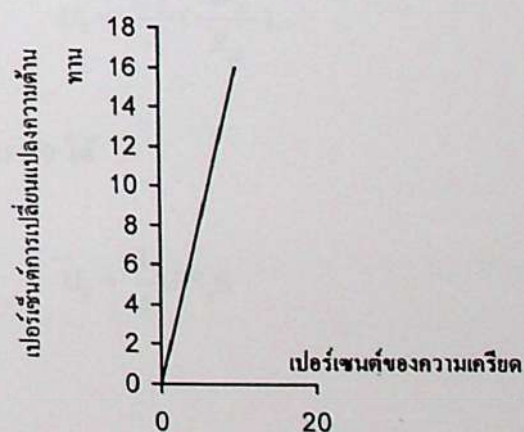
$$S_A = \frac{dR/R}{\epsilon_a} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_a} + (1+2\nu) \quad (2.7)$$

เมื่อ S_A คือค่าความไวความเครียดของโลหะ หรือ โลหะเจือ (alloy) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวนำ ซึ่งอยู่ในเทอมของ $(1+2\nu)$ และการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

จำเพาะจะอยู่ในเทอม $(dp/p) / \varepsilon$ ค่า S_A จะมีช่วงระหว่าง 2 - 4 สำหรับโลหะส่วนใหญ่ที่ใช้ทำตัวนำ เพราะว่าค่าของ $(1+2U)$ จะมีค่าสูงสุดคือ 1.6 ในโลหะส่วนใหญ่ ค่าความเปลี่ยนแปลงความต้านทานจำเพาะที่เกิดจากความเครียดจะมีการแปรเปลี่ยนระหว่าง 0.4 – 2.4 ค่าที่เพิ่มขึ้นของความต้านทานจำเพาะเป็นผลที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระเมื่อเกิดความเครียด ชนิดของโลหะเจือ ที่นิยมใช้ในการทำสเตรนเกจ รวมทั้งค่าความไวแสดงในตารางที่ 1 โดย สเตรนเกจส่วนใหญ่จะทำมาจากโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล (Copper – Nickel alloy) ซึ่งรู้จักกันในชื่อของแอดวานซ์ (Advance) หรือ คอนสแตนแตน (constantan) กราฟแสดงการตอบสนองของโลหะเจือ ($\Delta R/R$ เป็นฟังก์ชันของความเครียด) แสดงในรูปที่ 2.9

ตารางที่ 1.1 ตารางค่าความไวความเครียดของโลหะ S_A สำหรับสเตรนเกจทั่วไป

วัสดุ	ส่วนประกอบ (%)	S_A
Advance or Constantan	45 Ni , 55 Cu	2.1
Nichrome V	80 Ni , 20 Cr	2.1
Isoelastis	36 Ni , 8 Cr , 0.5 Mo , 55.5 Fe	3.6
Karma	74 Ni , 20 Cr , 3 Al , 3 Fe	2.0
Armour D	70 Fe , 20 Cr , 10 Al	2.0
Platinum-Tungsten	92 Pt , 8W	4.0



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R/R$ ในรูปฟังก์ชันของความเครียด สำหรับ คอนสแตนแตน

สาเหตุที่โลหะเจือนี้นิยมใช้เพราะ ค่าการตอบสนองเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงของความเครียด (ไม่เกิน 8 %) มีค่าความต้านทานจำเพาะสูง และมีความเสถียรภาพการนำไฟฟ้าดีเยี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สเตรนเกจส่วนใหญ่จะเป็นแบบ เมทัลฟอยล์ (Metal-foil) (ดูรูปที่ 2.10) เกจที่สั้นที่สุด คือ 0.20 mm ยาวที่สุด 102 mm ค่าความต้านทานมาตรฐานของสเตรนเกจ คือ 120 และ 350 Ω อย่างไรก็ตามก็คีสเตรนเกจที่ออกแบบเพื่องานพิเศษจะมีค่าความต้านทานถึง 500 , 1000 และ 5000 Ω เลขก็ได้ลักษณะค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ สเตรนเกจเมื่อเทียบกับความเครียด ε ในทิศทางของ สเตรนเกจ คือ

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon \quad (2.8)$$

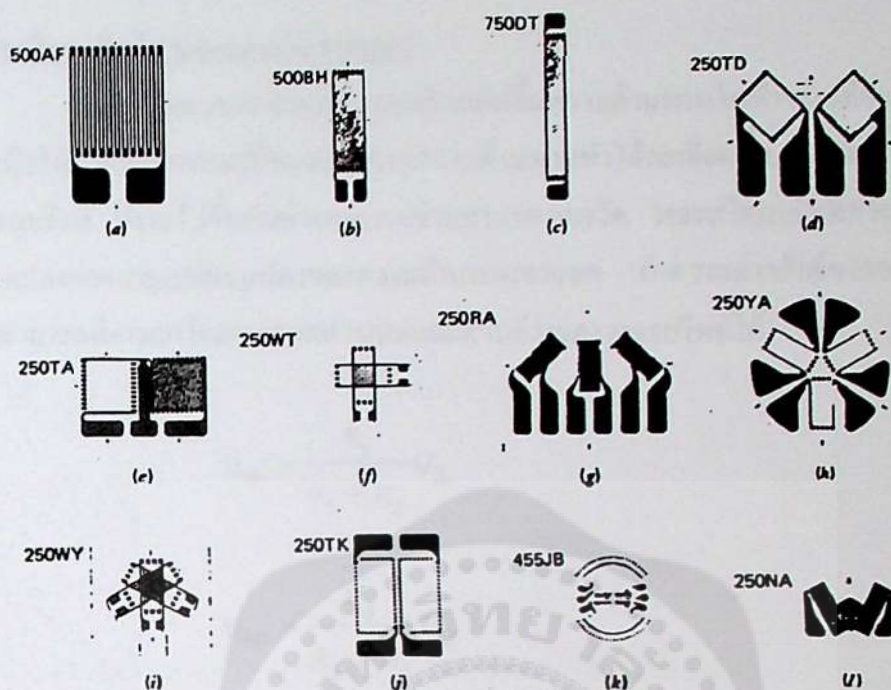
โดย S_g คือ ค่าเกจแฟกเตอร์ (gauge factor) หรือ ค่าปรับเทียบคงที่ (calibration constant) ของ สเตรนเกจ ค่าเกจแฟกเตอร์ S_g จะมีค่าความไวความเครียดของโลหะเจือ S_A อยู่ด้วยเสมอเพราะว่ากริดคอนฟิกูเรชัน (grid configuration) ของสเตรนเกจในแนวขวางของตัวนำมีค่าน้อยกว่า การตอบสนองในแนวแกน

ค่า เอาร์ทพุท $\Delta R/R$ ของ สเตรนเกจ โดยปกติจะแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ วงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำ เกจ 1 ตัว ไปติดบนแขนใดแขนหนึ่งของวงจรวิทสโตนบริดจ์และคิดค่าตามความต้านทานที่มีค่าเท่ากัน 3 ตัวบนแขนที่เหลือ จะได้ค่าความต่างศักย์ขาออกคือ

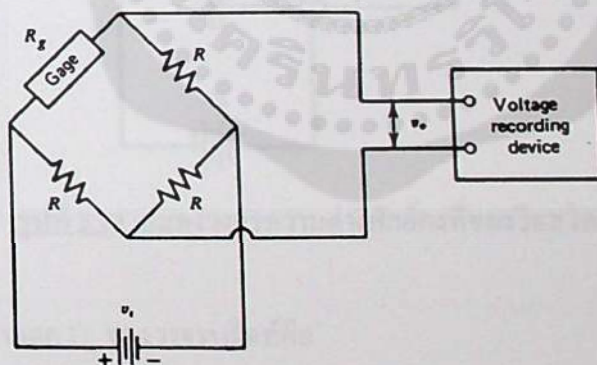
$$U_0 = \frac{U_s}{4} \left(\frac{\Delta R_g}{R_g} \right) \quad (2.9)$$

แทนค่าสมการ 2.8 ลงใน 2.9 ได้

$$U_0 = \frac{1}{4} U_s S_g \varepsilon \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.10 แสดงสเตรนเกจแบบต่าง ๆ



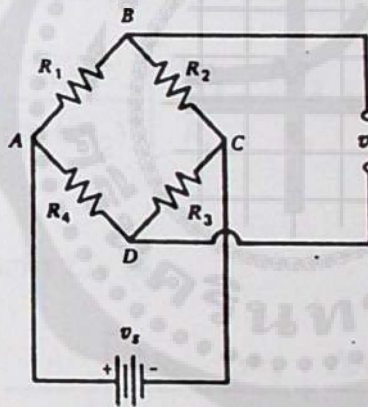
รูปที่ 2.11 แสดงวงจรสโตนบริดจ์ที่ใช้ในการกลับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R/R$ ของสเตรนเกจให้ออกมาเป็นค่าของความต่างศักย์ขาออก v_o

วงจรวีรสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)

เมื่อเกจวัดความเครียดมีความเครียดเกิดขึ้นความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพื่อให้การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทำได้ละเอียดขึ้น จึงใช้ระบบวัดแบบวีรสโตนบริดจ์ ซึ่งจะไม่นับกับค่าของความต้านทานของเกจวัด วงจรสโตนบริดจ์ส่วนใหญ่จะใช้ในการแปลงค่าความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานขาออก ค่าความต่างศักย์ขาออกของวงจรบริดจ์สามารถพิจารณาโดยการแยกส่วนบนและส่วนล่างของวงจรบริดจ์ได้

$$U_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_S \quad (2.11)$$

$$U_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_S \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรความต่างศักย์คงที่ของวีรสโตนบริดจ์

ค่าความต่างศักย์ขาออก U_o ของวงจรบริดจ์คือ

$$U_o = U_{AB} - U_{AD} \quad (2.13)$$

แทนค่าสมการ 2.11 และ 2.12 ลงใน 2.13 ได้

$$U_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_3)(R_3 + R_4)} U_S \quad (2.14)$$

สมการ 2.14 แสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ขาออกจะหายไป ($U_o = 0$) ถ้า

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2.15)$$

เมื่อสมการ 2.15 เป็นจริงวงจรบริดจ์จะถูกทำให้สมดุล ในการเริ่มต้นสมดุลวงจรบริดจ์ ค่าความต่างศักย์ขาออก ΔU_o จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 เปลี่ยนไปเป็น ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 และ ΔR_4 นำไปเทียบกับสมการ 2.14 ได้

$$\Delta U_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (2.16)$$

ทำการรวมโดยไม่คิดเทอมที่มีกำลังมากกว่า 1 และแทนลงในสมการ 2.14

$$\Delta U_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] U_s \quad (2.17)$$

ให้ $r = \frac{R_2}{R_1}$ แทนลงในสมการ 2.14 ได้

$$\Delta U_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] U_s \quad (2.18)$$

สมการ 2.16 และสมการ 2.17 แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ขาออกจากวงจรบริดจ์เป็น ฟังก์ชันเชิงเส้นของความต้านทานเปลี่ยนแปลง

การติดตั้งสเตรนเกจ

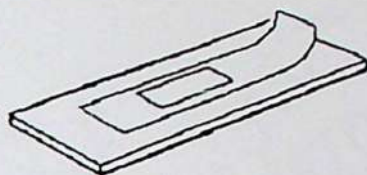
1. การเตรียมผิว (Surface Preparation)

วิธีนี้ใช้สำหรับสเตรนเกจ ที่จะนำมาติดตั้งกับวัสดุที่เป็นโลหะและโลหะเจือแต่ไม่เหมาะสมกับพลาสติก และ ซีเมนต์

- 1.1 ทำการขัดผิววัสดุด้วยกระดาษทราย, เครื่องขัด, กระดาษขัดหรือที่คล้าย ๆ กัน เพื่อขจัดสี และฝุ่นออกจากผิว โดยขัดให้เรียบพยายามให้เหลือรอยขีดข่วนน้อยที่สุด
- 1.2 ทำความสะอาดผิวด้วย ทิชชู ที่จุ่มสารละลาย (solvent) ระวังอย่าให้มีสิ่งสกปรกหล่นลงไปในขวดสารละลาย ทำซ้ำอีกถ้าจำเป็น
- 1.3 ทำการติดตั้งในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 20°C และให้แน่ใจว่าอุณหภูมิคงที่
- 1.4 ต้องให้แน่ใจว่าผิวของวัสดุแห้งอยู่เสมอ
- 1.5 คัดกระดาษทิชชู (ต้องไม่เป็นขุยเวลาเช็ด) ออกมาเป็นแถบยาว ๆ แถบเล็ก ๆ ชุบกระดาษด้วยกรด (acid cleaner) และนำไปเช็ดบนผิววัสดุ เช็ดออกด้วยทิชชูแห้ง ทำซ้ำถ้าต้องการ
- 1.6 กำหนดตำแหน่งสำหรับติดสเตรนเกจ โดยใช้ดินสอ 4H โดยการทำเครื่องหมายบาง ๆ หลังจากที่ทำการล้างผิวเสร็จแล้ว ระวังอย่าให้มีรอยขีดข่วนที่เกิดจากการทำเครื่องหมาย ตรงบริเวณที่จะติดสเตรนเกจ
- 1.7 ล้างผิวด้วยกรด โดยใช้คอตตอนบัดเช็ด แล้วล้างออกด้วยทิชชู ทำซ้ำจนกระทั่งไม่มีคราบติดคอตตอนบัดขึ้นมา
- 1.8 ใช้คอตตอนบัดชุบน้ำยนิวทรัลไลซิงก์กลีนเนอร์ (neutralising cleaner) เพื่อปรับให้ผิวของวัสดุมีค่าเป็นกลาง นำไปเช็ดผิว แล้วเช็ดด้วยทิชชู 1 ครั้ง อย่าให้รอยดินสอยื่นจากขอบเข้าไปอยู่บริเวณตรงที่ติดสเตรนเกจ โดยการเช็ดด้านในออกไปด้านนอกของจุดที่ติดสเตรนเกจ อย่าให้นิวทรัลไลซ์ (neutralise) แห้งบนผิววัสดุเอง

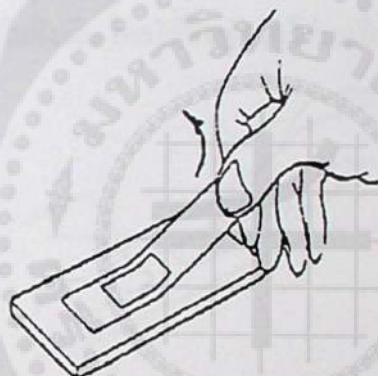
2. การเตรียมสเตรนเกจและติดตั้ง

- 2.1 นำกระจก (glass mounting panel) ออกจากกล่องแล้วทำความสะอาดด้านบนของผิวด้วยทิชชูจุ่ม นิวทรัลไลซิงก์กลีนเนอร์ เช็ดให้แห้งด้วยทิชชูสะอาด
- 2.2 นำสเตรนออกจากที่เก็บโดยใช้ปากคีบ และผิวหน้าของสเตรนเกจอยู่บน (ด้านติดตั้งอยู่ด้านล่าง) โดยสังเกตที่เครื่องหมายบนเกจจะต้องไม่กลับหัว วางบนกระจก ถ้าหากมีแผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณติดอยู่กับสเตรนเกจ ให้เอาออกมา 1 คู่จากห่อ โดยใช้ปากคีบคีบจับออกมา แล้ววางถัดไปจากด้านปลายล่างของสเตรนเกจบนกระจกโดยให้สัมพันธ์กับตำแหน่งที่จะติดตั้งจริง ๆ
- 2.3 นำเทปใสยาวประมาณ 10 เซนติเมตรปิดทับลงบนตัวสเตรนเกจ และแผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณให้พอดี โดยประกบสเตรนเกจระหว่างเทปกับแผ่นกระจกให้เทปปิดทับ สเตรนเกจและติดกับกระจก และให้เผยอด้านปลายของเทปไว้เพื่อเอาไว้ใช้ดึงออก ต้องแน่ใจว่า เทปติดกับ สเตรนเกจเรียบร้อยแล้ว (รูปที่ 2.13)



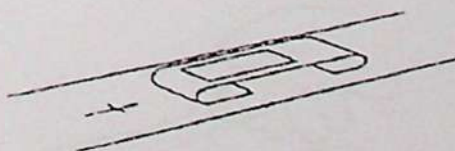
รูปที่ 2.13 แสดงการติดเทปใส

- 2.4 คึงเทปขึ้นโดยคึงในมุมต่ำ ๆ รักษาให้เทปอยู่ภายใต้แรงคึง แล้วคึงเทปและเกจออกจากกระจก (รูปที่ 2.14)

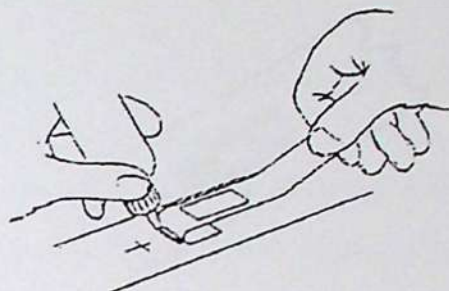


รูปที่ 2.14 แสดงการคึงเทปใส

- 2.5 วางตำแหน่งของสเตรนเกจที่ติดไว้บนเทปใส ลงบนวัสดุที่ทำความสะอาดแล้ว ให้ตรงกับตำแหน่งที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ โดยพับปลายของเทปใสด้านหัวของสเตรนเกจให้ติดกันเพื่อง่ายต่อการคึงเทปกาออก
- 2.6 คึงเทปใสออกแล้วหยอดกาวที่ใช้สำหรับติดสเตรนเกจ (รูปที่ 2.15-2.16)

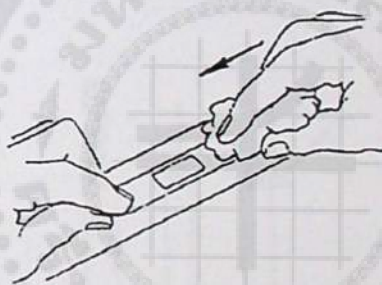


รูปที่ 2.15 แสดงเทปใสติดกับสเตรนเกจที่คึงออกมาเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2.16 แสดงการดึงเทปใสหอยอดกาวลงบนสเตรนเกจ

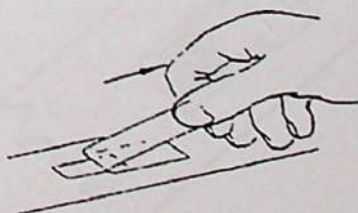
2.7 ปิดเทปใสกลับดังเดิม โดยใช้ทิชชูกดไล่มาเรื่อย ๆ บนผิวของเทปใส (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 แสดงการใช้ทิชชูกดไล่ฟองอากาศ

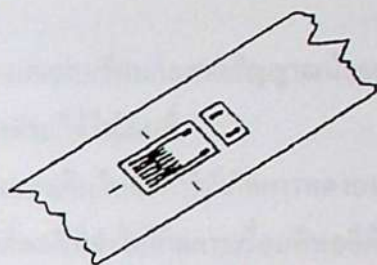
2.8 กดสเตรนเกจให้ติดกับผิววัสดุโดยใช้นิ้วโป้ง หรือนิ้วมือกดไว้ประมาณ 1 นาที ข้อควรระวัง อย่าให้ผิวหน้าโคนกาว จำนวนกาวที่หยดลงไปในข้อ (2.6) จะต้องพอเพียงในการที่ทำให้สเตรนเกจติดกับวัสดุได้เต็มที่

2.9 หลังจากนั้นประมาณ 2 นาทีค่อย ๆ ดึงเทปใสออกจากผิววัสดุ (รูปที่ 2.18)



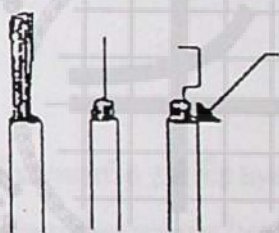
รูปที่ 2.18 แสดงการดึงเทปใสออกจากตัวสเตรนเกจ

3. การเชื่อมสายไฟ



รูปที่ 2.19 แสดงตำแหน่งของสเตรนเกจและแผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณ

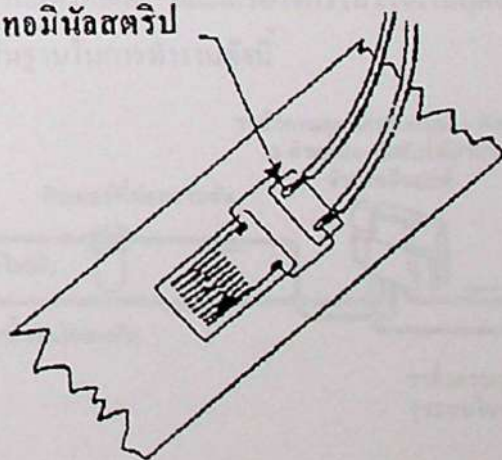
- 3.1 ให้ความร้อนแก่ลวดเชื่อมและบริเวณที่ทำการบัดกรี โดยใช้หัวบัดกรี
- 3.2 ตัดลวดไฟฟ้า 1 เส้นมาเชื่อม โดยให้ความยาวเกินมาเล็กน้อย (รูปที่ 2.20)



รูปที่ 2.20 แสดงวิธีการทำลวดจัมเปอร์

- 3.3 เชื่อมลวดไฟฟ้าติดกับจุดที่ต้องการติดตั้ง

เทอมินัลสตริป



รูปที่ 2.21 แสดงเกจที่ทำการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว

3.4 เหตุที่ต้องทำลวดไฟนำเชื่อมติดเพื่อป้องกันแรงดึงที่ส่งผลต่อเกจ โดยตรงทำให้เกจเสียหาย

หมายเหตุ

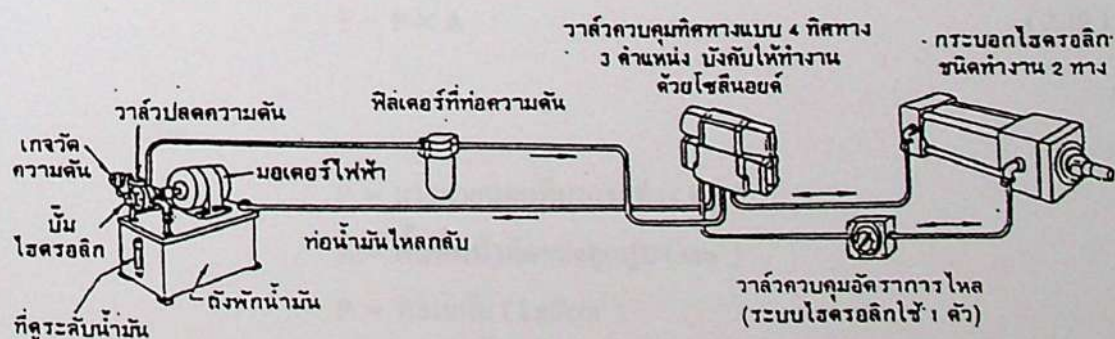
- ถ้าให้ความร้อนแก่แผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณน้อยเกินไป ลวดจะติดไม่ดี และทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านได้ไม่เต็มที่
- ถ้าให้ความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการคดงอของแผ่นเชื่อมต่อสายสัญญาณเวลาให้ความร้อนที่พอดีทำให้เกิดการเชื่อมที่พอดีคือ 1 หรือ 2 วินาที

4. การตรวจสอบการติดตั้งสเตรนเกจ

- 4.1 การตรวจสอบทางไฟฟ้าโดยใช้โอมห์มิเตอร์ (ohmmeter) เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่ถูกต้องคู่ที่ของไส้สเตรนเกจ
- 4.2 ตรวจสอบค่าความต้านทานจนวนกับผิวโลหะ ค่าที่ขอมรับได้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำที่ต้องการจะใช้ แต่ค่าในการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า $10\text{ M}\Omega$

ระบบไฮดรอลิกส์

คำว่า hydraulic มาจากคำในภาษากรีก 2 คำคือ hydro หมายถึงน้ำและ aulis ซึ่งหมายถึงท่อ (pipe) เดิมคำว่า hydraulic จึงหมายถึงเฉพาะการไหลของน้ำในท่อเท่านั้น แต่ปัจจุบันคำนี้หมายถึงการไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบ เพื่อเป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานในการเปลี่ยนแปลงกำลังงานจากของไหลให้เป็นกำลังงานกล คือ ทำให้กระบอกสูบไฮดรอลิกส์และมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ทำงาน ตัวอย่างงานเช่น ระบบเบรกในรถยนต์ แม่แรงไฮดรอลิกส์ เครื่องอัดเกียร์อัตโนมัติ เครน กว้าน รถแทรกเตอร์ และเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ระบบไฮดรอลิกส์จะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.22 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์

- อุปกรณ์ดันกำลัง ทำหน้าที่เป็นดันกำลังในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกส์เพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิกส์ ประกอบด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า
- อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิกส์ ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมัน ขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิกส์ ประกอบด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ ใต้กรองน้ำมันไฮดรอลิกส์ และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ที่ใช้กับถังพักน้ำมัน
- อุปกรณ์สร้างการไหลทำหน้าที่สร้างอัตราการไหลประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกส์ชนิดต่างๆ
- อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึงวาล์วควบคุมชนิดต่าง ๆ ในระบบไฮดรอลิกส์ เช่น วาล์วควบคุมทิศทางการไหลใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของกันสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัด ปริมาณน้ำมันที่เข้าสู่สูบเพื่อควบคุมความเร็วของกันสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ
- อุปกรณ์ในการทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังของของไหลให้เป็นกำลังงานกล เช่น กระบอกสูบไฮดรอลิกส์หรือมอเตอร์ไฮดรอลิกส์
- อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางเดินการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในระบบประกอบด้วยแป๊ป (pipe) ท่อ (tube) สายน้ำมันไฮดรอลิกส์ (hoses) ข้องอ (bending) และข้อต่อชนิดต่าง ๆ (fittings)

1. ทฤษฎีพื้นฐานระบบไฮดรอลิกส์

กฎของ Pascal

คุณสมบัติของของไหล คือ มีความดันไปทุกทิศทาง และเปลี่ยนรูปไปตามภาชนะที่ใส่ ด้วยแรงที่เท่ากันในพื้นที่ที่เท่ากัน

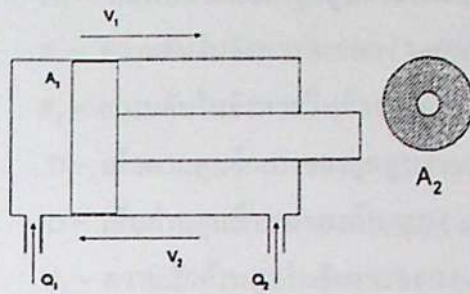
$$F = P \times A \quad (2.19)$$

เมื่อ

F = แรงภายนอกที่มากระทำ (kgf)

A = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (cm^2)

P = ความดัน (kgf/cm^2)



รูปที่ 2.23 แสดงส่วนต่าง ๆ ของกระบอกสูบไฮดรอลิกส์

แรง = ความดัน $\times$ พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ

$$F_1 = P_1 \times A_1$$

$$F_1 = \frac{P_1 \times \pi D^2}{4} \quad (2.20)$$

$$F_2 = P_2 \times A_2$$

$$F_2 = \frac{P_2 \times \pi (D^2 - d^2)}{4} \quad (2.21)$$

ความเร็ว = $\frac{\text{อัตราการไหล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ}}$

$$V_1 = \frac{Q_1}{A}$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{\pi D^{2/4}} \quad (2.22)$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{B}$$

$$V_2 = \frac{4 \times Q_2}{\pi (D^2 - d^2)} \quad (2.23)$$

โดยที่

F_1 = แรงที่ได้ในจังหวะวิ่งออก (kgf)

F_2 = แรงที่ได้ในจังหวะวิ่งเข้า (kgf)

A_1 = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านหัว (cm^2)

A_2 = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านท้าย (cm^2)

P_1 = ความดันในจังหวะวิ่งออก (kgf/cm^2)

P_2 = ความดันในจังหวะวิ่งเข้า (kgf/cm^2)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลูกสูบ (cm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของก้านสูบ (cm)

V_1 = ความเร็วก้านสูบในจังหวะออก (cm/min)

V_2 = ความเร็วก้านสูบในจังหวะเข้า (cm/min)

Q_1 = อัตราไหลด้านหัวสูบ (cm^3/min)

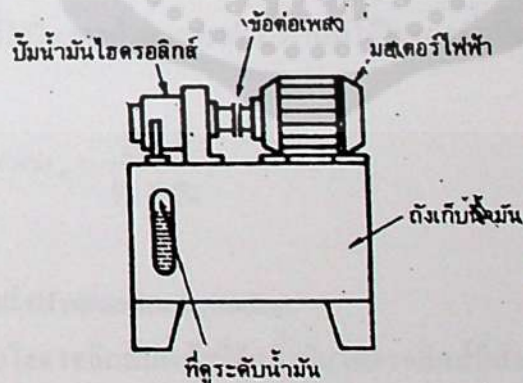
Q_2 = อัตราไหลด้านท้ายสูบ (cm^3/min)

2. ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ (Hydraulics Power Unit)

หน้าที่ของชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์มีดังนี้

- สร้างปริมาณการไหลของน้ำมัน
- ควบคุมความดันน้ำมันสูงสุด
- เป็นถังพักน้ำมัน

ส่วนประกอบของชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์มีดังนี้ (ดูรูปที่ 2.24 ประกอบ)



รูปที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์

3. การคำนวณกำลังที่ใช้ในการปั๊ม

เพื่อจะได้สามารถเลือกขนาดของต้นกำลังขับได้ถูก ต้นกำลังขับได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องจักรไฮดรอลิกสัณนั้นถูกนำไปใช้งานที่ใด ถ้าเป็นเครื่องจักรที่ติดตั้งตามโรงงานอุตสาหกรรมก็ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง แต่ถ้าเป็นระบบไฮดรอลิกส์สำหรับรถคัมพ์ รถยกของ รถขุดตัก รถไถ หรือรถเกรดดิน จะใช้เครื่องยนต์ของรถนั้นๆเป็นต้นกำลังขับ ซึ่งกำลังงานที่ใช้ในการปั๊มในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$Power_{th} = Q \times P \quad (2.24)$$

$Power_{th}$ คือ กำลังงานที่ใช้ในการปั๊มในทางทฤษฎี $\left(\frac{Nm}{min}, kW, hp \right)$

Q คือ ปริมาณการส่งจ่ายน้ำมันของปั๊ม (l/min)

P คือ ความดันของน้ำมันที่ใช้งาน $(KPa, 10^5 N/m^2, bar / 14.5 psi)$

ในทางปฏิบัติ ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า (η_m) และประสิทธิภาพของปั๊ม (η_p) ด้วย ซึ่งกำหนดให้มีค่าดังนี้

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า (η_m) มีค่า 80 เปอร์เซ็นต์

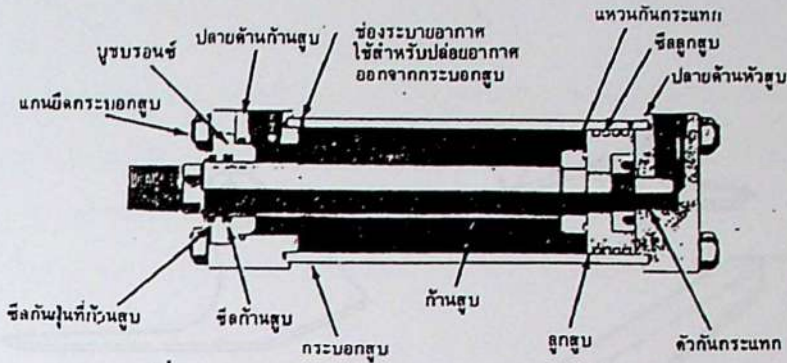
ประสิทธิภาพของปั๊ม (η_p) แบ่งออกเป็น 2 อย่าง ถ้าเป็นปั๊มใหม่มีค่า 80 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเป็นปั๊มเก่ามีค่า 60 เปอร์เซ็นต์

ฉะนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณกำลังงานที่ใช้ในการปั๊มจริง สามารถหาได้ดังนี้

$$Power_{\eta} = \frac{Q \times P}{\eta_p \times \eta_m} \quad (2.25)$$

4. กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกส์ (Hydraulics Cylinder)

กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกส์มีหน้าที่รับน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ส่งมาจากปั๊มและวาล์วควบคุมต่างๆเพื่อเปลี่ยนกำลังงานไฮดรอลิกส์ให้เป็นกำลังงานกล โดยการเปลี่ยนความดันและความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในท่อทางให้เป็นการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เมื่อน้ำมันป้อนเข้าสู่กระบอกลูกสูบทำให้เกิดงานขึ้นโดยอัตราการไหลของน้ำมันจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของลูกสูบ กำลังงานกล (แรงม้า) ที่เกิดขึ้นกระบอกลูกสูบโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะคือ แบบทำงานสองทาง (double acting cylinder) และแบบทำงานทางเดียว (single acting cylinder)



รูปที่ 2.25 แสดงการทำงานของลูกสูบสองทิศทาง

ฟันชุดของเครื่องเพาะปลูก (Sweep of Cultivators)

ฟันชุดของเครื่องเพาะปลูก เป็นส่วนประกอบในการทำงานส่วนหนึ่งของเครื่องเพาะปลูก, ไถลึก (Deep plows), ใบมีดระดับ (Plane cutters), คิวคลิก (Deep ripper) เป็นต้น

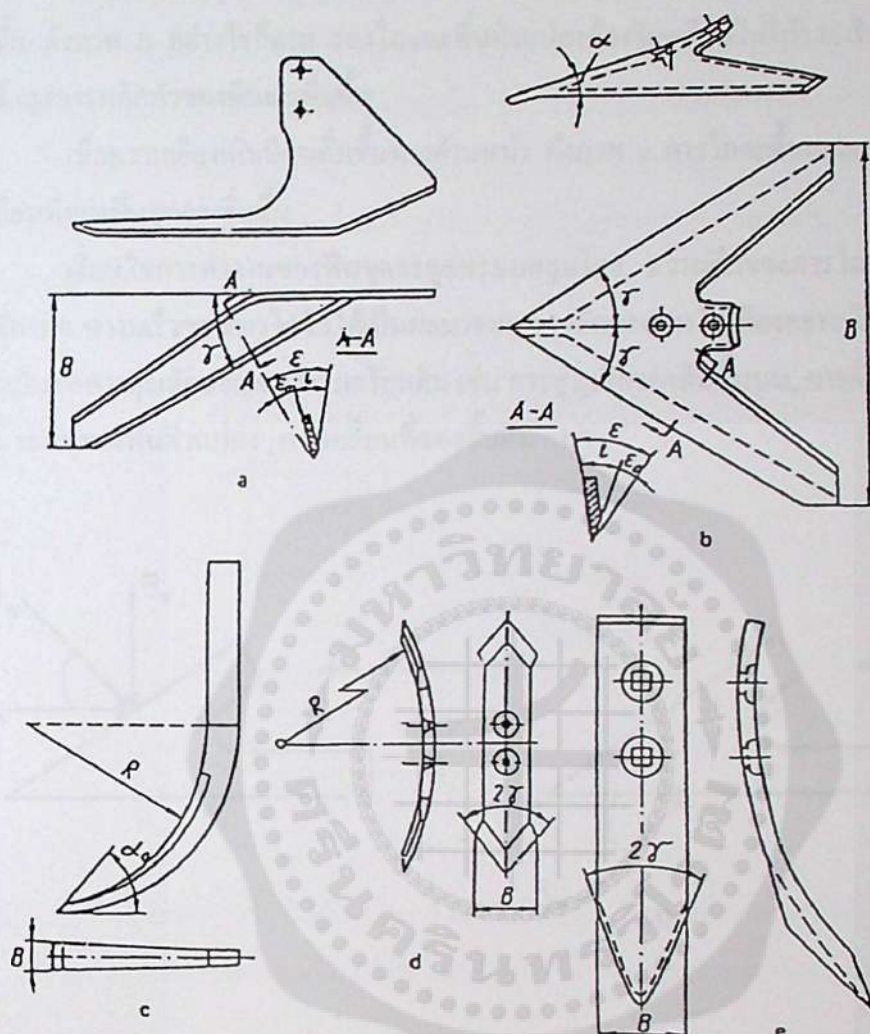
ฟันชุดของเครื่องเพาะปลูกจะบางและมีลักษณะที่จะตัดฉีกดิน ฟันชุดนั้นอาจจะมีปีกเดียวและแบนราบ ดังรูปที่ 2.26(a) หรือรูปร่างคล้ายกับรูปธนูและแบนราบมีใบมีดรอบ ๆ ดังรูปที่ 2.26(b) ฟันของฟันชุดอาจจะมีรูปร่างคล้ายสิ่ว ดังรูปที่ 2.26(c) และรูปที่ 2.26(d) หรือมีรูปร่างคล้ายหอก ดังรูปที่ 2.26(e) ฟันชุดของการขุดลึกและตัดในแนวระนาบมีลักษณะคล้ายคลึงกันในรูปร่าง ดังเช่น ฟันชุดแบบลูกธนู

พารามิเตอร์หลักของฟันชุดครอบคลุมรูปร่างและลักษณะในการปฏิบัติงานคือ มุมยอด γ , มุมแตกหัก α ซึ่งมุมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแนวราบ ϵ , ความชันของใบมีด I และความกว้างในการตัด β สำหรับ ripper, รัศมีความโค้งของพื้นผิวของฟันจะเป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งการที่ฟันชุดจะทำงานนั้นก็ขึ้นอยู่กับขนาดและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้

ความจุของการพรวนเป็นผลโดยขนาดของมุม α จะทำให้แรงกิริยาในการพรวนเพิ่มขึ้น มุม α เป็นค่าจำกัดช่วงหนึ่งซึ่งแปรผันตามชนิดของฟันชุดดังแสดงข้างล่างนี้

ชนิด arrow shaped (รูปร่างคล้ายลูกธนู)	25-30 องศา
ชนิด plane cutters (ใบมีดระดับ)	12-15 องศา
ชนิด spear shaped (รูปร่างคล้ายหอก)	25-45 องศา
ชนิด chisel shaped (รูปร่างคล้ายสิ่ว)	4 - 40 องศา

ฟันของฟันชุดเหล่านี้จะทำการตัดดินที่ความกว้างต่าง ๆ กันโดยความกว้าง β คือ 85, 120, 150 และ 165 มิลลิเมตรสำหรับ plane cutters 145, 150, 160, 220, 250, 270 และ 330 มิลลิเมตรสำหรับ arrow shape และ 2500 มิลลิเมตรสำหรับ flat cutter-ripper รัศมีความโค้งของฟันของ ripper R มีค่า 125-250 มิลลิเมตร ความชันของฟัน (มุม I) มีค่าระหว่าง 12-15 องศา



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะและรูปร่างของฟันชุดของเครื่องเพาะปลุก

- | | |
|--------------------|-------------------|
| a – single edged, | d – reversible, |
| b – arrow shaped, | e – spear shaped. |
| c – chisel shaped, | |

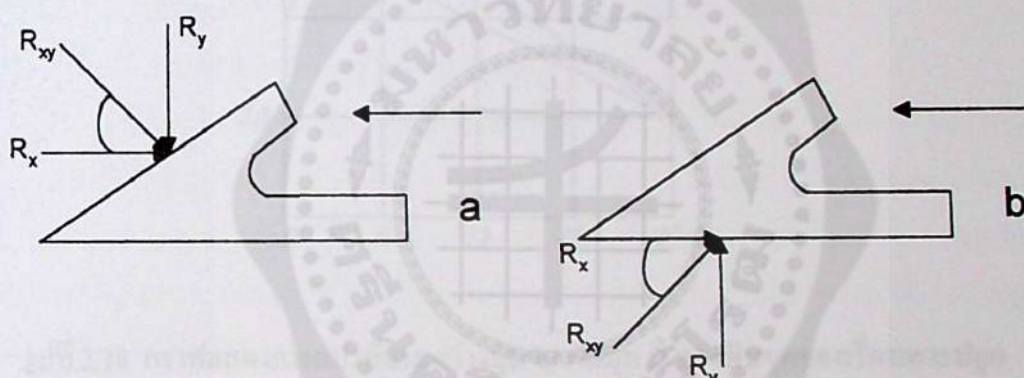
สำหรับฟันชุดแบบขอบเดียวและ arrow shape, ปฏิกริยาระหว่างพื้นผิวการทำงานกับดินเป็นสามหน้าสัมผัส ในขณะที่ฟันของ ripper, มุม α จะเป็นปฏิกริยาระหว่างกันกับดิน

ฟันชุดของเครื่องเพาะปลุกต้องอยู่ในตำแหน่งที่วางขอบของการตัดไว้ในระนาบด้วยการติดตั้งตามรูปแบบร่องไถที่ใช้ ดังภาพ a จะได้รับการกำจัดวัชพืชอย่างน่าพอใจ

การจัดเตรียมจุดเอียงของฟันชุดบนเครื่องเพาะปลูก จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไถให้ลึกขึ้น ดังภาพ b อย่างไรก็ตาม ร่องไถและพื้นผิวแปลงต้องจัดเตรียมไม่ให้ราบเรียบเกินไป ที่ความเร็วสูงการพลิกตัวของดินจะเพิ่มขึ้น

เมื่อความเอียงเพิ่มมีค่าเพิ่มขึ้นทางด้านหน้า ดังภาพ c การไถจะตื้นและความต้านทานการเคลื่อนที่ของฟันชุดจะเพิ่มขึ้น

เงื่อนไขการทำงานของฟันชุดจะถูกครอบคลุมโดย ความลึกของการไถและความเร็วของเครื่องมือ ความเร็วของการไถไม่ได้เป็นผลมาจากความลึกของการไถเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีตัวแปรซึ่งเป็นผลทางคุณลักษณะของการเตรียมดิน เช่น การสูญเสียของดินชั้นบน, การตัดรากของพืช, วัชพืช, ระดับของพื้นผิวแปลง, การเคลื่อนที่ของชั้นดิน ฯลฯ



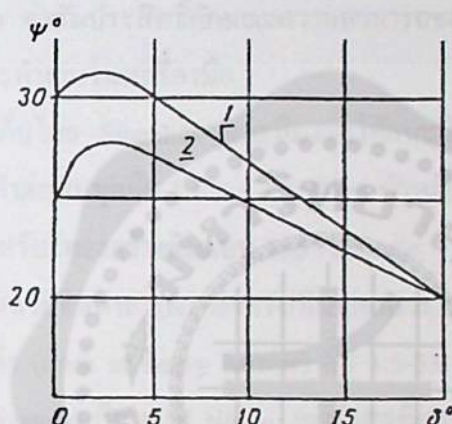
รูปที่ 2.27 แสดงแรงที่กระทำต่อฟันชุดในแกนต่าง ๆ

มุม ψ จะเป็นบวก ดังภาพ a ถ้าแรง R_x มีทิศทางลง หรือเป็นลบถ้าแรง R_x มีทิศขึ้น ดังภาพ b ขนาดของมุมขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือ

มุม ψ จะเป็นลบสำหรับ teeth of harrow, disk-cutter ของไถ, keel shaped และ twin disk plowshares สำหรับปลายฟันชุดของเครื่องเพาะปลูกมุมอาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ จะเป็นบวกสำหรับ sharp teeth และเป็นลบเมื่อทำงานในดินแห้งและแข็งโดยใบมีดที่

มุม ψ ขึ้นอยู่กับมุมแตกหัก α และมุมเสียดทาน ϕ มุม ψ จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม α และมุม ϕ เพิ่มขึ้นนอกจากนี้มุม ψ ยังขึ้นอยู่กับอิทธิพลของความหนาแน่น, ความชื้นของดิน, การตั้งเครื่องมือในแนวราบ, ความคมของมีด และความลึกของการไถ

ค่าลบของมุม ψ จะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของดิน และตามปกติ มุม ψ จะกลายเป็นลบทั้งนี้ก็เพราะว่าองค์ประกอบในแนวตั้งของความต้านทานของดินที่กระทำต่อใบมีดเพิ่มขึ้นกับความหนาแน่น เมื่อดินมีความชื้นสูงแรงยึดเกาะจะเพิ่มขึ้น ผลก็คือจะทำให้มุม ψ ลดลง ดังนั้นสำหรับปลายฟันขุดเมื่อความชื้นแปรผันจากปานกลางไปสูง มุม ψ จะลดลงจาก 18-24 องศา เป็น -4 - -8 องศา ซึ่งแสดงถึงผลกระทบในการไถพรวน แรง R_x จะลดลงเมื่อทำการไถในดินที่มีความชื้นสูง



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงการแปรผันระหว่างมุม ψ กับมุม δ ของฟันขุดของเครื่องเพาะปลูก

1 – medium loams with 28 % moisture , 2 – medium loams with 25 % moisture

รูปที่ 2.28 แสดงถึงการค้นคว้าของ Sineokov ซึ่งได้ระบุถึงอิทธิพลของมุม δ ดังภาพ b (ความเอียงของใบมีดกับแนวราบคือ มุม δ ที่ความชื้น 25-29 % ในดิน Sod-Podzodic เมื่อมุม δ เพิ่มขึ้นจาก 0-2.5 องศา มุม ψ จะเริ่มเพิ่มขึ้น เมื่อมุม δ เพิ่มมากขึ้นต่อไปอีกมุม ψ จะลดลง การแปรผันของมุม ψ เกิดขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของมุม δ ทำให้ปฏิกิริยาของดินบนใบมีดลดลง นี่คือการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบแนวตั้งของแรงปฏิกิริยา R อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ที่คล้ายคลึงกัน มุม α จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม ψ ลดลง

ผลเหล่านี้เนื่องมาจากค่าที่แน่นอนของมุม δ ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของมุม ψ เนื่องจากผลกระทบของปฏิกิริยาบนใบมีด ซึ่งได้ชัดเจนโดยการเพิ่มขึ้นของมุม α

ดังนั้น ความเอียงของขอบการตัดของฟันขุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับระนาบแนวราบที่มากกว่า 2.5 องศา ได้จำกัดความลึกของการไถและความมั่นคงของเครื่องมือ

ความลึกของการไถเป็นผลกระทบของมุม ψ ในทิศทางที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มความลึกของการไถของฟันชุด องค์ประกอบในแนวตั้งของแรงที่กระทำบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้น ผลนี้จะเป็นการเพิ่มขนาดสัมบูรณ์ของมุม ψ ขนาดของแรง R หาโดยใช้ Dynamometer ซึ่งจะเพิ่มขั้นตอนการเพิ่มค่าความกว้าง (b) และความลึกของการไถ (a) แรง R อาจจะแสดงได้ดังนี้

$$R = Kab \quad (\text{หน่วย N}) \quad (2.26)$$

โดย K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะความสามารถของดินที่จะต้านการกระทำ (ความต้านทานจำเพาะ) ของการทำงานโดยเครื่องมือ

ข้อมูลที่ถูกรวบรวมโดย Sineokov และทีมงานได้แนะนำค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (K) สำหรับแรงที่กระทำต่อฟันชุดคือ 1.1 – 1.35 N/mm สำหรับโครงสร้างดินแบบ Chernozems และ 1.65-2.0 N/mm. สำหรับโครงสร้างดินแบบ Sod-Podsodic

ค่าความต้านทานจำเพาะ (K) สำหรับฟันชุดแนวราบ (teeth of planers) คือ 3.1-4.6 N/mm. สำหรับฟันชุดแข็ง (teeth of heavy harrow) คือ 1.5-3.0 N/mm. สำหรับฟันชุดของเครื่องเพาะปลูก (teeth of cultivators) คือ 5-10 N/mm. (ค่าต่ำสุดที่ความลึกการไถ 12 cm. และสูงสุดที่ความลึกการไถ 25 cm.) ค่าเหล่านี้ใช้แสดงความต้านทานจำเพาะสำหรับเครื่องมือที่ใช้สำหรับความลึกของการไถที่ดีที่สุด (15-25 cm.)

การวิจัยที่ผ่านมา

รูปแบบการแตกหักของดินและความเหมาะสมของดินภายใต้การกระทำของเครื่องมือที่มีรูปแบบแบนที่อยู่ในแนวตั้งฉาก ที่ทำงานที่ภาวะกึ่งสถิตในทรายที่อัดแน่นเพื่อใช้ในการศึกษาการแตกหักของดินที่พบจะเกิดขึ้นโดยการปาดไปข้างหน้า เริ่มต้นโดยให้เครื่องมือเคลื่อนที่ไปในแนวระนาบโดยมีระยะทางที่แน่นอนและเพิ่มความลึกขึ้นทีละน้อยโดยใช้มุมเฉือน 27 องศา $\pm$ 2 องศา ซึ่งจะใกล้เคียงกับมุมในทางทฤษฎี ($\pi/4 - \phi/2$) คือ 26.5 องศา สำหรับทุกเครื่องมือที่ศึกษา การเพิ่มแรงเฉือนการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นภายในบริเวณที่ดินเสื่อมโทรม จะทำให้เกิดเป็นเนินขึ้นมาก เมื่อเพิ่มความลึกให้กับเครื่องมือที่มีอัตราส่วนของรูปร่างเหมือนเดิม ที่ความลึก 5 เซนติเมตรและ 7.5 เซนติเมตรรูปแบบการแตกหักจะคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของรูปร่าง ส่วนที่ความลึกที่มากกว่าคือ 10 เซนติเมตรและ 12.5 เซนติเมตรรูปแบบการแตกหักจะเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนของรูปร่างของเครื่องมือ การตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นภายในบริเวณดินที่เสื่อมโทรม จะทำให้เกิดการดัน

ตัวไปข้างหน้าตามธรรมชาติโดยเริ่มจากส่วนบนของเครื่องมือที่มีมุม 40 องศา ถึง 50 องศา ซึ่งจะน้อยกว่ามุมทางทฤษฎี ($90^\circ - \phi$) คือ 53 องศา ปฏิกริยาเนื่องจากดินในแนวตั้งและแนวระดับจะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรในธรรมชาติและเกิดขึ้นเป็นช่วงๆกลับไปกลับมาสำหรับเครื่องมือที่ศึกษาความยาวคลื่นและการกระจัดของปฏิกริยาในแนวระนาบเพราะว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของรูปร่างของเครื่องมือและความลึก

การปรับเปลี่ยนที่เหมาะสมทำให้ได้รูปร่างของเครื่องมือที่แตกต่างกัน ส่วนหน้ามีรูปร่างคล้ายรูป $\frac{1}{4}$ ของวงรีและด้านท้ายมีลักษณะเป็นยอดของสามเหลี่ยม รูปร่างแบบนี้เป็นพื้นฐานโดยทั่วไปของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาเพื่อทำนายหาน้ำหนักที่เหมาะสม ค่าที่ทำนายได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากข้อมูลที่ความลึกของเครื่องมือมีระดับต่ำ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของรูปร่างของเครื่องมือและความลึก สำหรับเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่กว่าจากข้อมูลที่ได้จะพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำนายเอาไว้ เนื่องจากการปรับที่ไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ข้อมูลที่สังเกตได้และค่าที่ได้จากการทำนายควรจะไปในลักษณะเดียวกัน¹

ผลกระทบของความเร็วและอัตราส่วนของรูปร่าง (Aspect ratio) ที่ทำให้เกิดปฏิกริยาของดินภายใต้การกระทำของแผ่นโลหะในแนวตั้งฉากต่อดินเหนียวที่ศึกษา การทดลองกระทำโดยการทดสอบในกระบะดินเราจะใช้แผ่นโลหะที่อยู่ในแนวตั้งมีอัตราส่วนของรูปร่าง คือ 0.5, 1.0 และ 2.0 ใช้ความลึกในการทดลองสองค่า คือ 10 เซนติเมตรและ 15 เซนติเมตรที่ความเร็วสามค่า คือ 0.11, 0.20 และ 0.33 เมตรต่อวินาทีและความชันของดินสองค่า คือ 5.8 % และ 16.7 %

จากการสังเกตจะได้ว่า ปฏิกริยาทั้งในแนวตั้งฉากและแนวระดับเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรและในเฟสแต่ละเฟสนั้นเป็นการรวมกันของความเร็ว, อัตราส่วนของรูปร่าง และความชันที่ได้จากการทดลอง แรงในแนวระดับและแนวตั้งฉาก (ค่าสูงสุด, ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย) จะเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราส่วนของรูปร่าง และสำหรับค่าความความชันทั้งสองค่า ค่าเฉลี่ยของแรงในดินชันจะมีค่ามากกว่าแรงในดินแห้ง ความยาวคลื่นของการแตกหักของดินมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นจากการเพิ่มอัตราส่วนของรูปร่างที่ความลึกที่กำหนด

แรงในแนวระดับและแนวตั้งฉากจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็ว อัตราของการเพิ่มที่แสดงจะมีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้นหรือลอการิทึม อัตราการเพิ่มในดินชันจะมีค่ามากกว่าในดินแห้ง ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือที่ใช้ศึกษานี้ไม่ได้แสดงแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของการแตกหักของดิน การร่างรูปแบบเฉพาะที่เพิ่มขึ้นของการเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือและแนวโน้มจะมีการเพิ่มแบบเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Strength-Deformation) ของดินจากแรงเฉือน

ความชื้นของดินถูกพบว่ามีผลกระทบสำคัญต่อปฏิกิริยาทั้งสองแนวของดินในรูปของแรงและความถี่ของการแตกหักของดิน การเพิ่มความจุความชื้นของดินจาก 5.8 % ไปเป็น 16.7 % ทำให้แรงทั้งสองแนวและความยาวคลื่นของการแตกหักของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว²

การหาความชื้นของดิน

1. ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างดินมาใส่ถาดโลหะแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
3. นำถาดโลหะที่บรรจุดิน เข้าตู้อบใช้อุณหภูมิ 105° C ใช้เวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
4. หลังจากอบเสร็จแล้ว นำถาดโลหะที่บรรจุดินมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง
5. นำเฉพาะถาดโลหะไปชั่งน้ำหนัก
6. นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าความชื้นจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของดิน (Dry basic, \%)} = \frac{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินแห้ง})}{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะ})} \times 100$$

$$\text{ความชื้นของดิน (Wet basic, \%)} = \frac{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินแห้ง})}{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะ})} \times 100$$

¹ ที่มา Bikash Kumar Pathak. Effect of ratio on soil-tine interactions at low speed in dry sand.

Thesis AIT, Bangkok, Thailand

² ที่มา Hong Jian Peng. Effect of speed and aspect ratio on soil reactions caused by vertical tines in bangkok clay soil. Thesis AIT, Bangkok, Thailand

การหาความหนาแน่นของดิน

1. ทำแบบเดียวกับ การหาค่าความชื้น
2. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของดินจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density)} = \frac{\text{มวลของดินแห้งไม่รวมภาชนะ(g)}}{\text{ปริมาตรของดิน(cm}^3\text{)}}$$



บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

การคำนวณในระบบไฮดรอลิกส์

กำหนดให้แรงที่สูงสุดที่ให้แก่ชุดขับเคลื่อน

$$\begin{aligned}(F) &= 15 \quad \text{kN} \\ &= 15000 \quad \text{N}\end{aligned}$$

แรงเสียดทานของซิลลูกสูบกับกระบอกสูบมีค่าประมาณ 20 % ของแรงสูงสุด
ได้แรงเสียดทาน

$$\begin{aligned}(Fr) &= 0.2 \times 15000 \quad \text{N} \\ &= 3000 \quad \text{N}\end{aligned}$$

ดังนั้นแรงดันของลูกสูบ

$$\begin{aligned}P &= F + Fr \\ &= 15000 + 3000 \quad \text{N} \\ &= 18000 \quad \text{N}\end{aligned}$$

กำหนด

- ความเร็วในการเคลื่อนตัวของลูกสูบ 150 mm/sec
- ระยะชักของลูกสูบ 1 m (1000 mm)
- ความดันใช้งาน 10000 kN/m²
- ไม่จำกัดความเร็วในขากลับเนื่องจากเราวัดแรงในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างเดียว

1. การคำนวณหาขนาดของกระบอกสูบไฮดรอลิกส์

จากสมการ

$$\begin{aligned}A &= \frac{F}{P} \\ &= \frac{18000}{10000} \\ &= 18 \quad \text{cm}^2\end{aligned}$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{\frac{A \times 4}{\pi}} \\
 &= \sqrt{\frac{18 \times 4}{\pi}} \\
 &= 4.787 \quad \text{cm}
 \end{aligned}$$

∴ ควรใช้กระบอกสูบนี้นี้ขนาดตั้งแต่ 47.87 mm ขึ้นไปซึ่งในการทดลองนี้เราใช้กระบอกสูบที่ขนาด 50.8 mm จึงสามารถใช้ได้ เพราะอาจจะมีแรงเสียดทานหรือแรงภายนอกอื่นๆมากระทำต่อลูกสูบได้อีก เราจึงต้องเลือกกระบอกสูบให้ใหญ่กว่าที่เราคำนวณได้ ดังนั้นจะได้ความดันใช้งานจริง

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{F}{A} \\
 &= \frac{18000}{50.8^2 \pi / 4} \\
 &= 8,880 \quad \text{kN/m}^2
 \end{aligned}$$

2. หาอัตราการป้อนน้ำมันแก่กระบอกสูบ

จากสมการ

$$\begin{aligned}
 Q &= A_c V_c = A_1 V_1 \\
 &= 20.268 \times 10^{-4} \times 150 \times 10^{-3} \times 60 \\
 &= 18.24 \times 10^{-3} \quad \text{l/min}
 \end{aligned}$$

3. หาขนาดของปั๊ม

เมื่อทราบอัตราการไหลที่ต้องการ เท่ากับ 18.24 l/min และความดันใช้งาน 10000 kN/m² เราจะเลือกขนาดของปั๊มโดยพิจารณาจากตารางที่ เลือกใช้ปั๊มรุ่น VPNC-17-2-30 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Max. Pressure = 6867	kN/m ²
อัตราการไหล = 21.8	m ³ /min
Power Input = 3.50	kW

แต่มอเตอร์โดยทั่วไปจะหมุนที่ 1450 rpm และปั๊มมีประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (η_v) 90 %

$$\begin{aligned}\text{เพราะฉะนั้นจะคิดอัตราการไหลจริงได้} &= \frac{21.8 \times 10^{-3} \times 1450 \times 0.9}{1500} \\ &= 18.966 \quad \text{l/min}\end{aligned}$$

4. หาค่าพลังงานที่ใช้ขับปั๊ม

จากสมการ

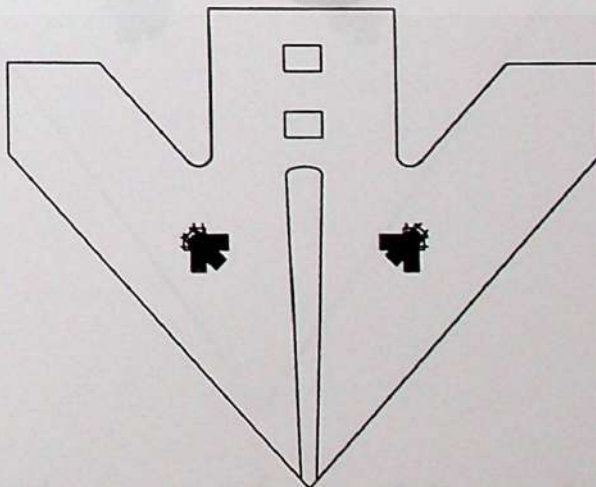
$$\begin{aligned}\text{Power}_n &= \frac{QP}{\eta_m \eta_p} \\ &= \frac{18.966 \times 70}{612 \times 0.8 \times 0.8} \\ &= 3.39 \quad \text{kW}\end{aligned}$$

∴ จากการคำนวณค่า Power_n ที่ได้ จะมีค่าน้อยกว่าในแคตตาล็อกแนะนำคือ 3.50 kW

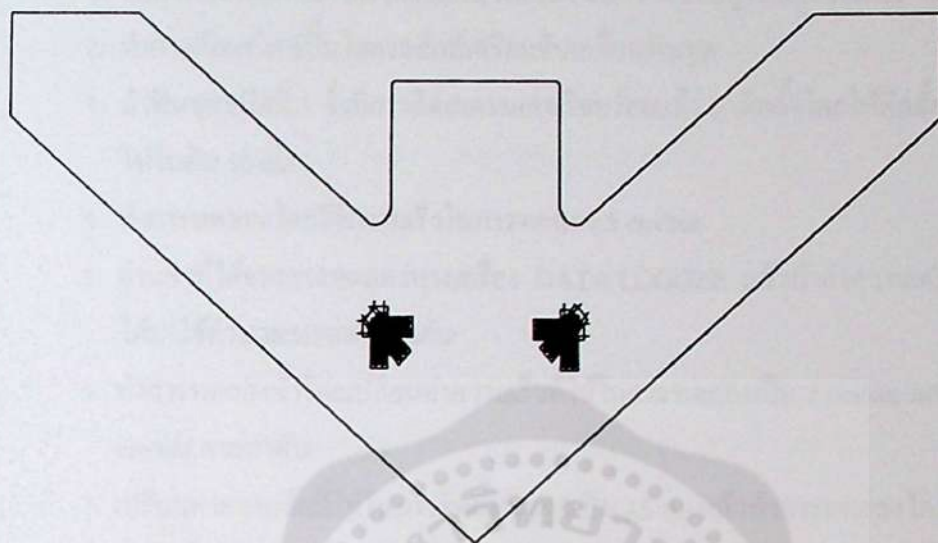
จึงเลือกใช้ Motor ขนาด 3.50 kW หรือ 4.692 hp

การติดตั้งสเตรนเกจบนพื้นชุด

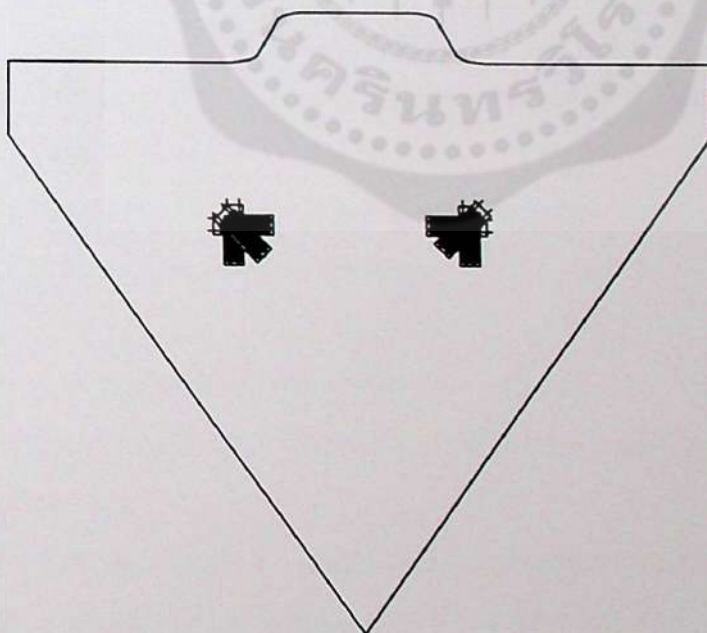
การกำหนดจุดติดตั้งสเตรนเกจในพื้นชุดแบบต่าง ๆ เนื่องจากเราต้องการวัดจุดที่คาดว่าจะเกิดแรงขึ้นมากที่สุด เพื่อหาจุดที่คิดว่าจะเกิดการเสียหายขึ้นในการใช้งาน



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในพื้นชุดแบบที่ 1



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในฟินชูดแบบที่ 2



รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจในฟินชูดแบบที่ 3

การออกแบบการทดลอง

1. ทำการเตรียมกระบอกดิน โดยให้ดินในกระบอกมีความชื้นอยู่ในช่วง 10.0 % - 18.0 %
2. ทำการเปิดสวิตช์ปั๊มไฮดรอลิกส์เตรียมขับเคลื่อนฟันชุด
3. นำฟันชุดชนิดที่ 1 ซึ่งมีการติดสเตรนเกจเรียบร้อยแล้ว มาติดตั้งโดยให้ติดตั้งลึกลงไปดิน 10 cm
4. ทำการทดลองโดยใช้ความเร็วในการทดลอง 5 cm/sec
5. อ่านค่าที่ได้จากการทดลองทางเครื่อง DATA LOGGER แล้วนำค่าความเครียดที่ได้มาใช้คำนวณหาค่าความเค้น
6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าความเร็วที่ใช้ในการทดลองเป็น 7 cm/sec และ 9 cm/sec ตามลำดับ
7. เปลี่ยนค่าความลึกที่ใช้ในการติดตั้งฟันชุดเป็น 15 cm แล้วทำการทดลองโดยใช้ความเร็วในการทดลองเป็น 5 cm/sec, 7 cm/sec และ 9 cm/sec
8. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนแบบของฟันชุดเป็นชนิดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

บทที่ 4

อุปกรณ์ วิธีการทดลอง และผลการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. กระดาษดิน

เป็นกระดาษทำด้วยโครงเหล็กฉากหนา 4 มิลลิเมตร บูดด้วยเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร มีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร สามารถบรรจุดินได้ 2.88 ลูกบาศก์เซนติเมตรดินสำหรับทดสอบใช้ดินภายในบริเวณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

2. ชุดขับเคลื่อนฟันชุด

ใช้ระบบไฮดรอลิกส์เป็นตัวขับเคลื่อนฟันชุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ชุดไฮดรอลิกส์เพาเวอร์ยูนิต

ใช้มอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ (3 แรงม้า) ความเร็วรอบ 1420 รอบ/วินาที 380 โวลต์เป็นตัวขับเคลื่อนน้ำมันไฮดรอลิกส์

2.2 โซลินอยวาล์ว เป็นวาล์วแบบ 4/3 ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วด้วย ขดลวดโซลินอย ใช้ไฟ 220 โวลต์

2.3 กระบอกสูบ เป็นแบบ Double acting มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ 50.8 เซนติเมตร ระยะชัก 100 เซนติเมตร

3. สเตรนเกจ

สเตรนเกจของบริษัท KYOWA ชนิด KFG - 5 - 120 - C1 - 11 L1M2R ใช้ติดเหล็ก ความยาว 5 เซนติเมตร ความต้านทาน $120.4 \pm 0.4 \Omega$ ค่าเกจแฟกเตอร์ $2.10 \pm 1.0 \%$

4. ชั้นทดสอบฟันชุด

ชั้นทดสอบมีทั้งหมด 3 แบบซึ่งแต่ละแบบจะติดสเตรนเกจทั้งด้านบนและด้านล่าง รวม 4 จุด จุดละ 3 ตัว โดยติดในแนวระนาบ, แนวตั้งฉาก และทำมุม 45 องศา กับแนวระนาบ

5. อุปกรณ์เครื่องวัดความเครียดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดความเครียดของบริษัท TeQuipment รุ่น E31 Mk ขนาด 220 โวลต์

วิธีการตั้งความเร็วของลูกสูบ

1. กดสวิทช์ เบ็ด ที่ตู้คอนโทรล
2. กดสวิทช์ มอเตอร์ ที่ตู้คอนโทรล มอเตอร์จะเริ่มทำงาน
3. กดสวิทช์ GO เพื่อให้ลูกสูบเคลื่อนที่ออก กดสวิทช์ BACK ให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับ
4. ทำการจับเวลา เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ออกจนครบ 60 เซนติเมตร
5. ถ้าความเร็วยังไม่ได้ตามต้องการ ให้ปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลที่ตั้งอยู่ด้านล่าง สวิทช์โซลินอยด์วาล์ว
6. ปรับวาล์วควบคุมการไหล จนได้ความเร็วตามที่ต้องการแล้วจึงทำการติดตั้งฟันชุด

วิธีการเตรียมดินในกระบอกก่อนการทดลอง

1. นำดินมาใส่ในกระบอกดินให้สูง 40 เซนติเมตร
2. นำน้ำหนัก 5 กิโลกรัม มากกดบนดินในกระบอกให้ทั่วจะทำให้ดินยุบตัวต่ำกว่า 10 เซนติเมตร
3. นำดินมาเพิ่มอีกเล็กน้อย แล้วใช้น้ำหนัก 5 กิโลกรัม กดเหมือนเดิม ทำอย่างนี้จนกระทั่งดินไม่เกิดการยุบตัวและมีความสูง 10 เซนติเมตร
4. ทำอย่างนี้ไปทุก ๆ 10 เซนติเมตร จนกระทั่งครบ 40 เซนติเมตร
5. เมื่อทำการทดลองเรียบร้อยแล้วดินจะร่วนจึงต้องทำการเตรียมดินใหม่ทุกครั้ง

วิธีการติดตั้งฟันชุด

1. ทำการขุดดินบริเวณที่จะใส่ฟันชุดให้ลึก 10 เซนติเมตร
2. นำฟันชุดที่ติดตั้งกับขาฟันชุดมาใส่กับชุดจับฟันชุด
3. วัดระดับให้ฟันชุดขนานกับพื้นดินและตั้งฉากกับพื้นดินโดยใช้ฉากวัดระดับ
4. เมื่อได้ระดับแล้วใส่น็อตที่ชุดจับฟันชุด ขันให้แน่น
5. ทำการปรับมุมของฟันชุดให้กระทำกับพื้นดินประมาณ 5-7 องศาโดยการปรับน็อตตัวบนและน็อตตัวล่าง
6. ทำการกลบดินให้ฟันชุดจมอยู่ในดินลึก 10 เซนติเมตร
7. ทำการเตรียมดินบริเวณฟันชุดอีกครั้ง เมื่อเตรียมดินเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดลอง

วิธีการใช้เครื่องมือวัดความเครียด

1. นำฟืนขูดที่ติดตั้งสเตรนเกจเรียบร้อยแล้วมาต่อเข้ากับด้านหลังของเครื่องที่ช่อง P6
2. ทำการเปิดสวิทช์ที่ตัวเครื่องจะเห็นคำว่า READY ที่หน้าจอ
3. กดปุ่ม INITIALISE 4 เพื่อป้อนจำนวนสเตรนเกจ(1-12), ช่วงความเครียดที่ต้องการจะวัด(20000Hi) และค่าเกจแฟกเตอร์(2.10)
4. ถ้าต้องการดูค่าที่ป้อนไปแล้วให้กด INITIALISE 9 ถ้าต่อปริ้นเตอร์อยู่ให้กด PRINTER = ON แล้วกด ENTER
5. กด FUNCTION 2 เพื่อทำการตั้งค่า auto-zero ให้กับสเตรนเกจ
6. กด FUNCTION 4 เพื่อดูค่าความเครียดว่าเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าไม่เป็นศูนย์ให้รอประมาณ 10 วินาที ทำการตั้งค่า auto-zero อีกครั้ง
7. กด DEFINE SCAN เพื่อทำการเก็บข้อมูลโดยตั้งให้เก็บค่าทุก ๆ 0.04 วินาทีในสเตรนเกจแต่ละตัวจนครบ 12 ตัวโดยให้เก็บค่าทั้งหมด 20 ค่า
8. กดปุ่ม START เพื่อทำการเริ่มเก็บข้อมูล เมื่อครบแล้วจะขึ้นคำว่า READY
9. เมื่อทดลองเสร็จแล้วกด CLEAR เพื่อลบค่าทั้งหมด

วิธีการทดลอง

1. ทำการตั้งความเร็วของลูกสูบให้มีความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
2. นำฟืนขูดชนิดที่ 1 มาติดตั้งกับชุดจับฟืนขูด โดยให้ฟืนขูดจมอยู่ในดินลึก 10 เซนติเมตร
3. ทำการเตรียมดินบริเวณฟืนขูดอีกครั้ง
4. นำสเตรนเกจมาต่อเข้ากับเครื่องวัดความเครียด
5. ทำการป้อนข้อมูลและเตรียมเครื่องมือวัดความเครียดให้พร้อมที่จะทำการเก็บข้อมูล โดยต่อเข้ากับปริ้นเตอร์ทางช่อง P1
6. เปิดสวิทช์มอเตอร์เพื่อเตรียมชุดไฮดรอลิกส์เพาเวอร์ยูนิคให้พร้อมที่จะใช้งาน
7. กด GO เพื่อให้ลูกสูบเคลื่อนที่พร้อมกับกดปุ่ม START เพื่อให้เครื่องเริ่มเก็บข้อมูลพร้อมทั้งจับเวลา
8. เมื่อเคลื่อนที่ไปครบ 60 เซนติเมตร กด GO เพื่อให้ลูกสูบหยุดเคลื่อนที่
9. ทำการวัดและสังเกตลักษณะทางกายภาพของดินที่ถูกไถขึ้นมา

10. ทำการทดลองอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ โดยเปลี่ยนความเร็วเป็น 7 เซนติเมตรต่อวินาที และ 5 เซนติเมตรต่อวินาทีและเปลี่ยนความลึกเป็น 15 เซนติเมตร
11. เมื่อครบแล้วเปลี่ยนพื้นชุดเป็นชนิดที่ 2 และชนิดที่ 3 แล้วทำการทดลองเหมือน พื้นชุดชนิดที่ 1

ตัวอย่างการคำนวณ

เลือกทำการคำนวณ strain gage ด้านหน้าซ้าย ซึ่งติดตั้งอยู่บนพื้นชุดชนิดที่ 2 , ระดับความลึก 15 cm , ความเร็วในการทดสอบ 9 cm/s , เหล็กที่นำมาทดสอบมีค่า

- Modulus of elasticity (E) = 157.718 GPa
- Shear modulus of elasticity (G) = 63.777 GPa
- Poisson's ratio (V) = 0.286

จาก strain gage วัดค่าได้ $\epsilon_0 = 99.86 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{45} = 69 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{90} = 24 \times 10^{-6}$

Principle Strain

จากสูตร

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45} - \epsilon_0 - \epsilon_{90}$$

แทนค่า

$$\gamma_{xy} = 2(69 \times 10^{-6}) - (99.86 \times 10^{-6}) - (24 \times 10^{-6})$$

$$\gamma_{xy} = 14.14 \times 10^{-6}$$

จากสูตร

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

แทนค่า

$$\epsilon_{1,2} = 61.93 \times 10^{-6} \pm 38.58 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_1 = 100.51 \times 10^{-6} , \epsilon_2 = 23.35 \times 10^{-6}$$

จากสูตร

$$\tan 2\theta_p = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y}$$

แทนค่า

$$\tan 2\theta_p = \frac{14.14 \times 10^{-6}}{75.86 \times 10^{-6}}$$

$$2\theta_p = 10.56^\circ$$

ค่า $\tan 2\theta_p = 0.1864$ ทำให้ได้ค่ามุม $2\theta_p$ ระหว่าง 0° - 360° ด้วยกัน 2 ค่าคือ 10.56° และ 190.56°

ดังนั้น $\theta_p = 5.28^\circ$ และ 95.28°

ทำการหาค่ามุม θ_p ของแต่ละ Principle Strain

จากสูตร
$$\epsilon_{x1} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta$$

แทนค่า
$$\epsilon_{x1} = 61.93 \times 10^{-6} + 37.93 \times 10^{-6} \cos 10.56^\circ + 7.07 \times 10^{-6} \sin 10.56^\circ$$

$$\epsilon_{x1} = 100.51 \times 10^{-6}$$

จากสูตร
$$\epsilon_{y1} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_{x1}$$

แทนค่า
$$\epsilon_{y1} = (100.51 \times 10^{-6}) + (23.35 \times 10^{-6}) - (100.51 \times 10^{-6})$$

$$\epsilon_{y1} = 23.35 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_{x1} = 100.51 \times 10^{-6} \quad \text{ที่ } \theta_{p1} = 5.28^\circ$$

$$\epsilon_{y1} = 23.35 \times 10^{-6} \quad \text{ที่ } \theta_{p2} = 95.28^\circ$$

Stress

จากสูตร
$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)]$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)]$$

แทนค่า
$$\sigma_x = 286547 [0.714 \times (99.86 \times 10^{-6}) + 0.286 \times (24 \times 10^{-6})] \quad \text{Pa}$$

$$\sigma_y = 286547 [0.714 \times (24 \times 10^{-6}) + 0.286 \times (99.86 \times 10^{-6})] \quad \text{Pa}$$

$$\sigma_z = 286547 \times 0.286 [(99.86 \times 10^{-6}) + (24 \times 10^{-6})] \quad \text{Pa}$$

$$\sigma_x = 22.39 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_y = 13.09 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_z = 10.15 \quad \text{MPa}$$

Maximum shear strain

จากสูตร
$$\frac{\gamma_{\max}}{2} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

แทนค่า
$$\frac{\gamma_{\max}}{2} = \sqrt{\left(\frac{99.86 \times 10^{-6} - 24 \times 10^{-6}}{2}\right)^2 + \left(\frac{14.14 \times 10^{-6}}{2}\right)^2}$$

$$\frac{\gamma_{\max}}{2} = 38.58 \times 10^{-6}$$

$$\gamma_{\max} = 77.16 \times 10^{-6}$$

มุมที่ทำให้ shear strain มีค่าสูงสุดจะมีขนาดต่างจากมุม θ_p อยู่ 45° นั่นคือ

$$\theta_s = \theta_p - 45^\circ$$

$$\theta_s = 5.28^\circ - 45^\circ$$

$$\theta_s = -39.72^\circ$$

จากสูตร
$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = -\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\theta$$

แทนค่า
$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = -(37.93 \times 10^{-6}) \sin(-79.44) + (7.07 \times 10^{-6}) \cos(-79.44)$$

$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = 38.58 \times 10^{-6}$$

$$\gamma_{x1y1} = 77.16 \times 10^{-6}$$

ดังนั้น
$$\theta_{s1} = -39.72^\circ ; \theta_{s2} = \theta_{s1} + 90^\circ$$

$$\theta_{s2} = 50.28^\circ$$

จากสูตร
$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = -\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\theta$$

แทนค่า
$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = -(37.93 \times 10^{-6}) \sin(100.56) + (7.07 \times 10^{-6}) \cos(100.56)$$

$$\frac{\gamma_{x1y1}}{2} = -38.58 \times 10^{-6}$$

$$\gamma_{x1y1} = -77.16 \times 10^{-6}$$

$$\gamma_{\max} = 77.16 \times 10^{-6} \text{ ที่ } \theta_{.1} = -39.72^\circ$$

$$\gamma_{\min} = -77.16 \times 10^{-6} \text{ ที่ } \theta_{.2} = 50.28^\circ$$

ค่า normal strains เมื่อ shear strains มีค่าสูงสุดและต่ำสุดคือ

จากสูตร
$$\varepsilon_{\text{ver}} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}$$

แทนค่า
$$= \frac{123.86 \times 10^{-6}}{2}$$

$$= 61.93 \times 10^{-6}$$

shear stress

จากสูตร
$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} \times G$$

แทนค่า
$$\tau_{xy} = 14.14 \times 10^{-6} \times 63.777$$

$$\tau_{xy} = 9.02 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

ตัวอย่างการหาค่าความชื้นของดิน

ปฏิบัติตามขั้นตอนการหาค่าความชื้นดินโดยเก็บตัวอย่างดินที่ 10 cm และ 15 cm ซึ่งมี

ค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

ที่ความลึก 10 cm

- น้ำหนักของภาชนะที่ใช้ใส่ดิน 50.4816 g
- น้ำหนักของภาชนะรวมกับน้ำหนักของดินชื้น 100.4856 g
- น้ำหนักของภาชนะรวมกับน้ำหนักของดินแห้ง 93.4871 g

ที่ความลึก 15 cm

- น้ำหนักของภาชนะที่ใช้ใส่ดิน 49.0835 g
- น้ำหนักของภาชนะรวมกับน้ำหนักของดินชื้น 99.0873 g
- น้ำหนักของภาชนะรวมกับน้ำหนักของดินแห้ง 90.5058 g

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

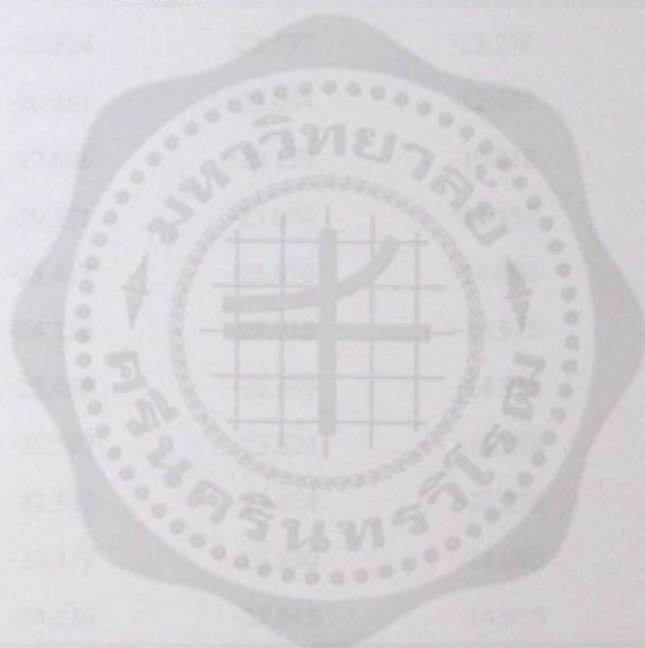
$$\text{ความชื้นของดิน (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินแห้ง})}{(\text{น้ำหนักถาดโลหะรวมดินชื้น} - \text{น้ำหนักถาดโลหะ})} \times 100$$

แทนค่าที่ความลึก 10 cm

$$\begin{aligned}\text{ความชื้นของดิน} &= \frac{(100.4856 - 93.4871)}{(100.4856 - 50.4861)} \times 100 \\ &= 13.997 \%\end{aligned}$$

แทนค่าที่ความลึก 15 cm

$$\begin{aligned}\text{ความชื้นของดิน} &= \frac{(99.0873 - 90.5058)}{(99.0873 - 49.0835)} \times 100 \\ &= 17.162 \%\end{aligned}$$



ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	-21.778	-21.778	-12.457	0.000
0.52 – 0.60	-19.732	-20.958	-11.637	0.650
1.00 – 1.08	-17.686	-20.139	-10.818	1.488
1.48 – 1.56	-23.824	-22.597	-13.276	-1.541
1.96 – 2.04	-20.551	-23.004	-12.457	2.407
2.44 – 2.52	-17.686	-20.139	-10.818	2.407
2.92 – 3.00	-20.551	-23.004	-12.457	1.488
3.40 – 3.48	-23.417	-25.870	-14.096	1.488
3.88 – 3.96	-24.236	-27.915	-14.915	2.373
4.36 – 4.44	-25.463	-26.689	-14.915	1.541
4.84 – 4.92	-22.597	-23.824	-13.276	0.650
5.32 – 5.40	-22.597	-23.824	-13.276	1.541
5.80 – 5.88	-23.417	-25.870	-14.096	1.488
6.28 – 6.36	-24.236	-27.915	-14.915	2.373

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

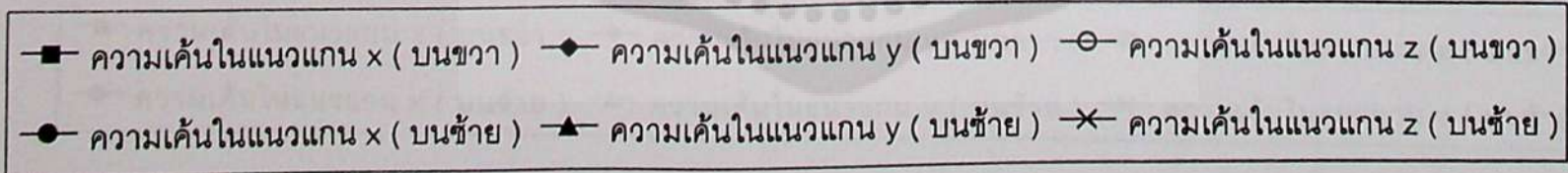
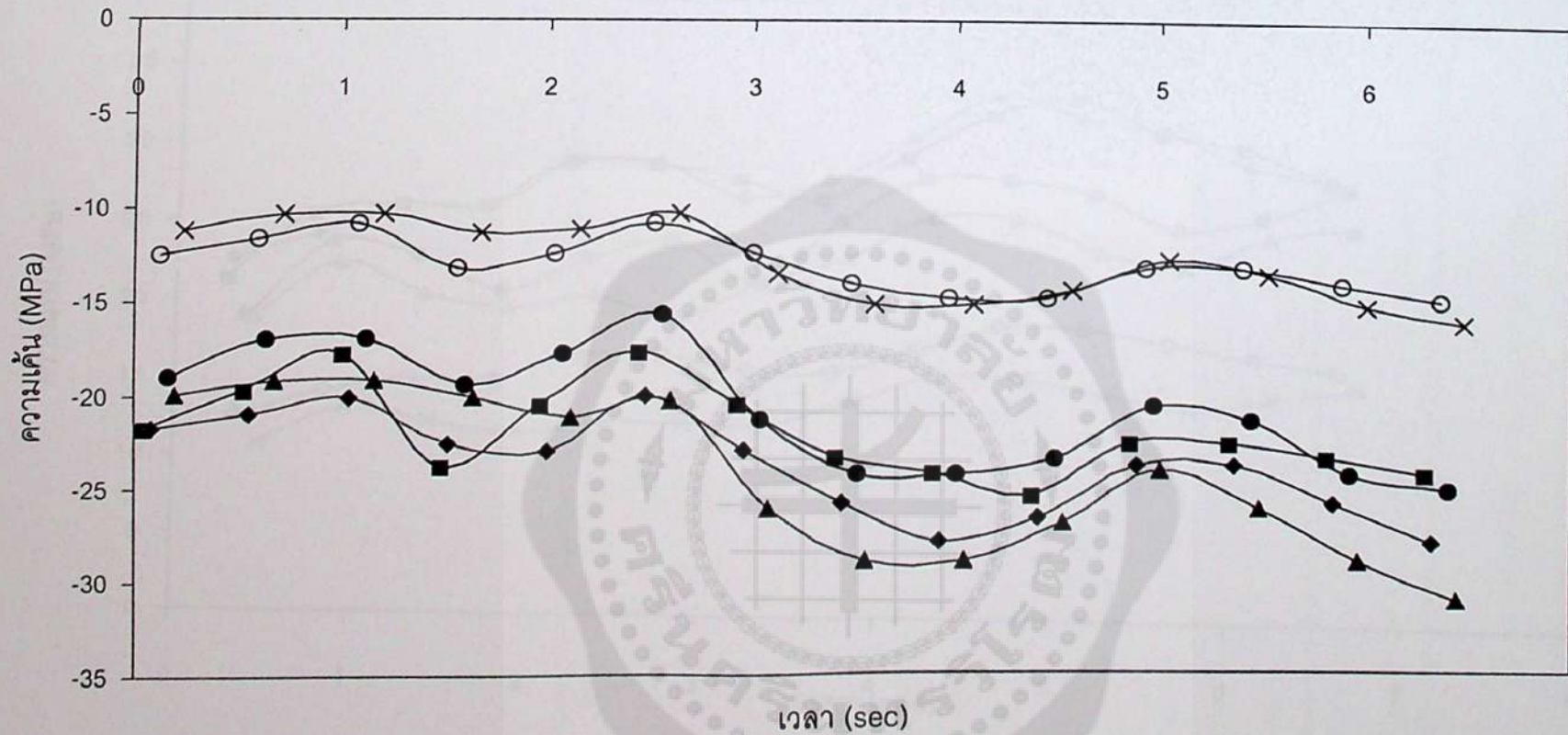
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.16 - 0.24	-18.995	-19.976	-11.146	0.570
0.64 - 0.72	-16.949	-19.156	-10.326	1.210
1.12 - 1.20	-16.949	-19.156	-10.326	1.454
1.60 - 1.68	-19.404	-20.140	-11.309	0.403
2.08 - 2.16	-17.768	-21.202	-11.146	1.804
2.56 - 2.64	-15.722	-20.383	-10.326	2.937
3.04 - 3.12	-21.453	-26.114	-13.604	2.454
3.52 - 3.60	-24.319	-28.979	-15.243	2.454
4.00 - 4.08	-24.319	-28.979	-15.243	2.454
4.48 - 4.56	-23.499	-26.933	-14.424	1.804
4.96 - 5.04	-20.634	-24.068	-12.785	1.804
5.44 - 5.52	-21.453	-26.114	-13.604	2.583
5.92 - 6.00	-24.319	-28.979	-15.243	2.454
6.40 - 6.48	-25.138	-31.025	-16.063	3.072

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

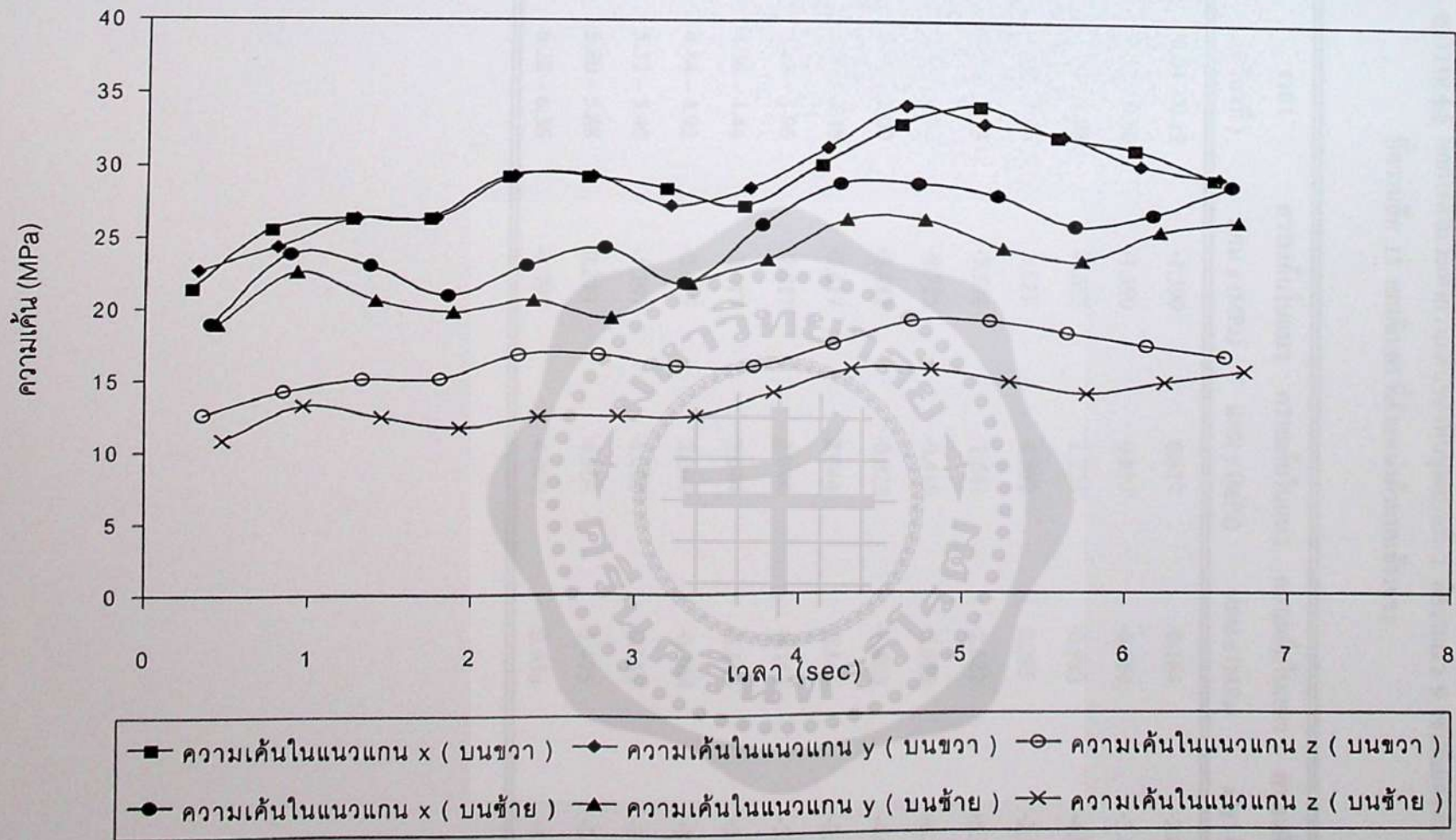
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.28 - 0.36	21.451	22.677	12.621	-0.902
0.76 - 0.84	25.543	24.316	14.260	2.017
1.24 - 1.32	26.362	26.362	15.079	0.000
1.72 - 1.80	26.362	26.362	15.079	0.000
2.20 - 2.28	29.228	29.228	16.718	0.000
2.68 - 2.76	29.228	29.228	16.718	0.000
3.16 - 3.24	28.408	27.182	15.899	0.902
3.64 - 3.72	27.182	28.408	15.899	-0.902
4.12 - 4.20	30.047	31.274	17.538	-0.902
4.60 - 4.68	32.913	34.139	19.177	-0.902
5.08 - 5.16	34.139	32.913	19.177	0.902
5.56 - 5.64	32.093	32.093	18.357	0.000
6.04 - 6.12	31.274	30.047	17.538	0.902
6.52 - 6.60	29.228	29.228	16.718	0.000

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.40 - 0.48	18.912	18.912	10.818	0.000
0.88 - 0.96	23.824	22.597	13.276	1.777
1.36 - 1.44	23.004	20.551	12.457	1.301
1.84 - 1.92	20.958	19.732	11.637	0.744
2.32 - 2.40	23.004	20.551	12.457	2.626
2.80 - 2.88	24.230	19.325	12.457	3.432
3.28 - 3.36	21.778	21.778	12.457	0.000
3.76 - 3.84	25.870	23.417	14.096	1.633
4.24 - 4.32	28.735	26.282	15.735	1.633
4.72 - 4.80	28.735	26.282	15.735	1.633
5.20 - 5.28	27.915	24.236	14.915	1.951
5.68 - 5.76	25.870	23.417	14.096	3.792
6.16 - 6.24	26.689	25.463	14.915	0.744
6.64 - 6.72	28.735	26.282	15.735	1.633



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.04 – 0.12	-1.390	0.817	-0.164	-2.017
0.52 – 0.60	-1.390	0.817	-0.164	-3.150
1.00 – 1.08	-4.663	1.224	-0.983	-4.704
1.48 – 1.56	3.521	4.502	2.295	-2.352
1.96 – 2.04	-7.528	-1.641	-2.622	-5.733
2.44 – 2.52	-8.755	-0.415	-2.622	-6.504
2.92 – 3.00	-5.482	-0.822	-1.803	-4.857
3.40 – 3.48	-2.617	2.044	-0.164	-2.937
3.88 – 3.96	-2.617	2.044	-0.164	-3.805
4.36 – 4.44	-2.617	2.044	-0.164	-3.805
4.84 – 4.92	-2.617	2.044	-0.164	-3.805
5.32 – 5.40	-1.797	4.090	0.656	-3.827
5.80 – 5.88	0.249	4.909	1.475	-2.937
6.28 – 6.36	-1.797	4.090	0.656	-3.827

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

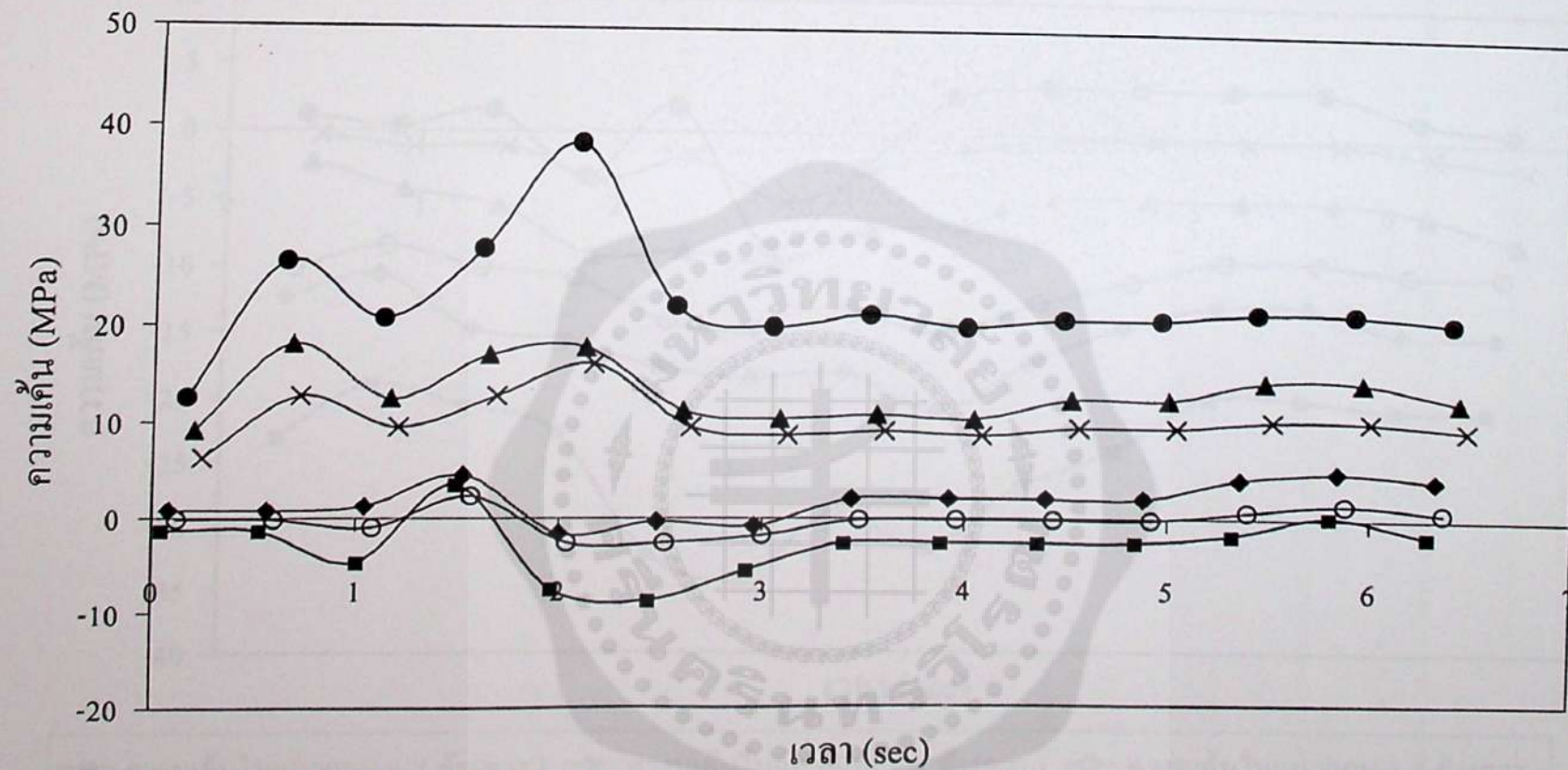
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.16 - 0.24	12.606	9.172	6.228	1.943
0.64 - 0.72	26.521	18.181	12.785	4.690
1.12 - 1.20	20.790	12.450	9.506	4.404
1.60 - 1.68	27.747	16.954	12.785	5.890
2.08 - 2.16	38.384	17.780	16.063	11.216
2.56 - 2.64	22.016	11.223	9.506	6.519
3.04 - 3.12	19.970	10.404	8.687	5.650
3.52 - 3.60	21.198	10.896	9.179	5.454
4.00 - 4.08	19.970	10.404	8.687	5.169
4.48 - 4.56	20.790	12.450	9.506	4.404
4.96 - 5.04	20.790	12.450	9.506	4.404
5.44 - 5.52	21.609	14.496	10.326	3.701
5.92 - 6.00	21.609	14.496	10.326	3.701
6.40 - 6.48	20.790	12.450	9.506	4.404

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.28 - 0.36	-23.162	-12.370	-10.162	-5.704
0.76 - 0.84	-19.070	-10.731	-8.523	-4.344
1.24 - 1.32	-20.709	-14.823	-10.162	-3.227
1.72 - 1.80	-22.755	-15.642	-10.982	-3.805
2.20 - 2.28	-32.166	-17.694	-14.260	-7.578
2.68 - 2.76	-34.211	-18.513	-15.079	-8.306
3.16 - 3.24	-28.893	-18.101	-13.440	-6.275
3.64 - 3.72	-31.759	-20.966	-15.079	-5.817
4.12 - 4.20	-26.847	-17.281	-12.621	-5.054
4.60 - 4.68	-23.982	-14.416	-10.982	-4.989
5.08 - 5.16	-19.890	-12.777	-9.343	-3.719
5.56 - 5.64	-19.890	-12.777	-9.343	-3.719
6.04 - 6.12	-20.709	-14.823	-10.162	-3.072
6.52 - 6.60	-20.709	-14.823	-10.162	-3.227

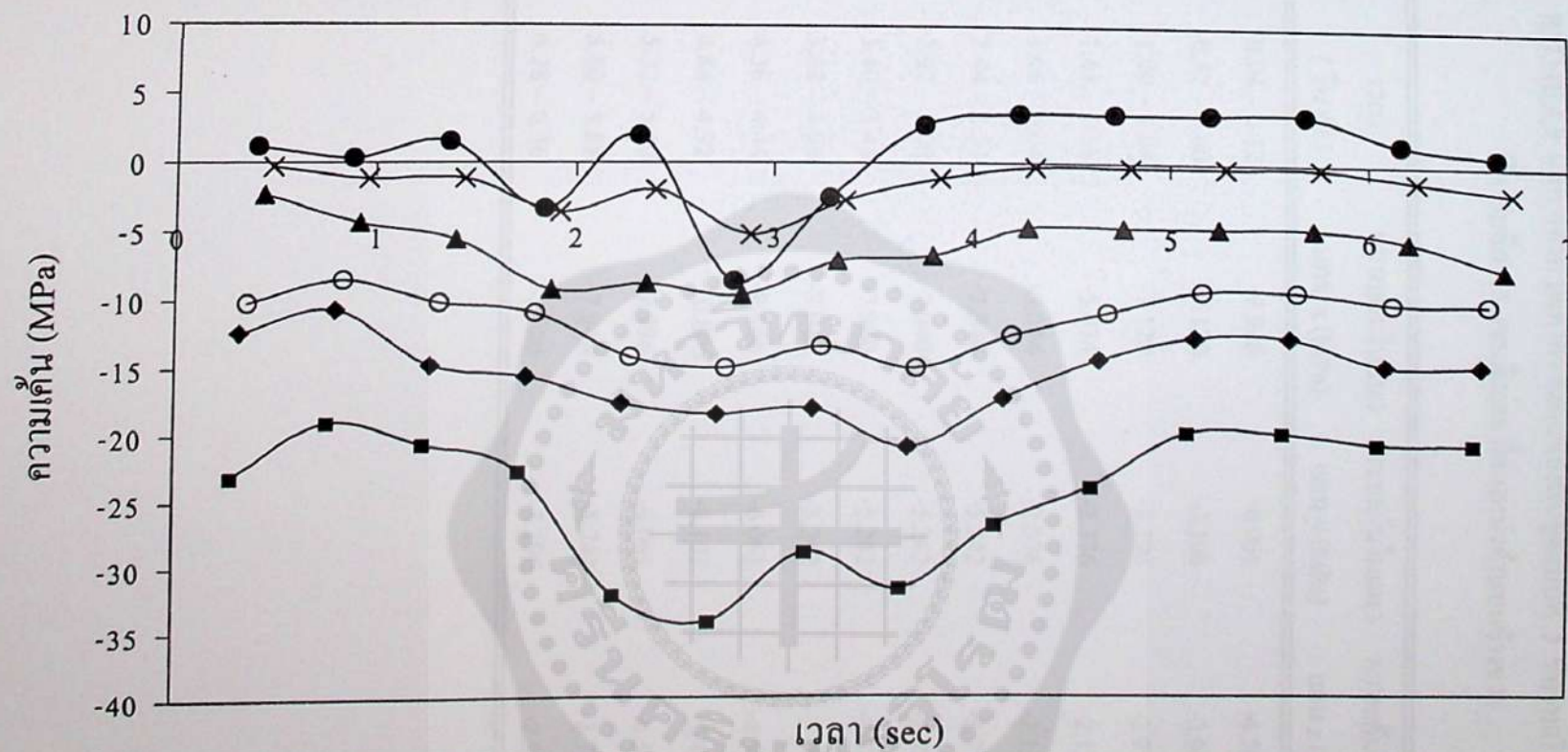
ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	1.144	-2.290	-0.328	1.943
0.88 - 0.96	0.324	-4.336	-1.147	2.682
1.36 - 1.44	1.551	-5.562	-1.147	3.701
1.84 - 1.92	-3.361	-9.247	-3.606	3.156
2.32 - 2.40	1.958	-8.835	-1.967	5.890
2.80 - 2.88	-8.679	-9.660	-5.245	0.920
3.28 - 3.36	-2.541	-7.202	-2.786	2.682
3.76 - 3.84	2.777	-6.789	-1.147	4.976
4.24 - 4.32	3.597	-4.743	-0.328	4.367
4.72 - 4.80	3.597	-4.743	-0.328	4.367
5.20 - 5.28	3.597	-4.743	-0.328	4.367
5.68 - 5.76	3.597	-4.743	-0.328	4.367
6.16 - 6.24	1.551	-5.562	-1.147	3.701
6.64 - 6.72	0.731	-7.608	-1.967	4.404



■ ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ♦ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	-9.986	-6.061	-4.589	-2.104
0.52 – 0.60	-7.120	-3.196	-2.950	-2.180
1.00 – 1.08	-7.120	-3.196	-2.950	-2.180
1.48 – 1.56	-5.074	-2.376	-2.131	-1.409
1.96 – 2.04	-5.074	-2.376	-2.131	-1.984
2.44 – 2.52	-7.940	-5.242	-3.770	-1.409
2.92 – 3.00	-7.940	-5.242	-3.770	-1.984
3.40 – 3.48	-7.940	-5.242	-3.770	-1.984
3.88 – 3.96	-7.940	-5.242	-3.770	-1.984
4.36 – 4.44	-9.986	-6.061	-4.589	-2.180
4.84 – 4.92	-10.805	-8.107	-5.409	-1.409
5.32 – 5.40	-9.986	-6.061	-4.589	-2.104
5.80 – 5.88	-7.940	-5.242	-3.770	-1.813
6.28 – 6.36	-7.120	-3.196	-2.950	-2.104

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

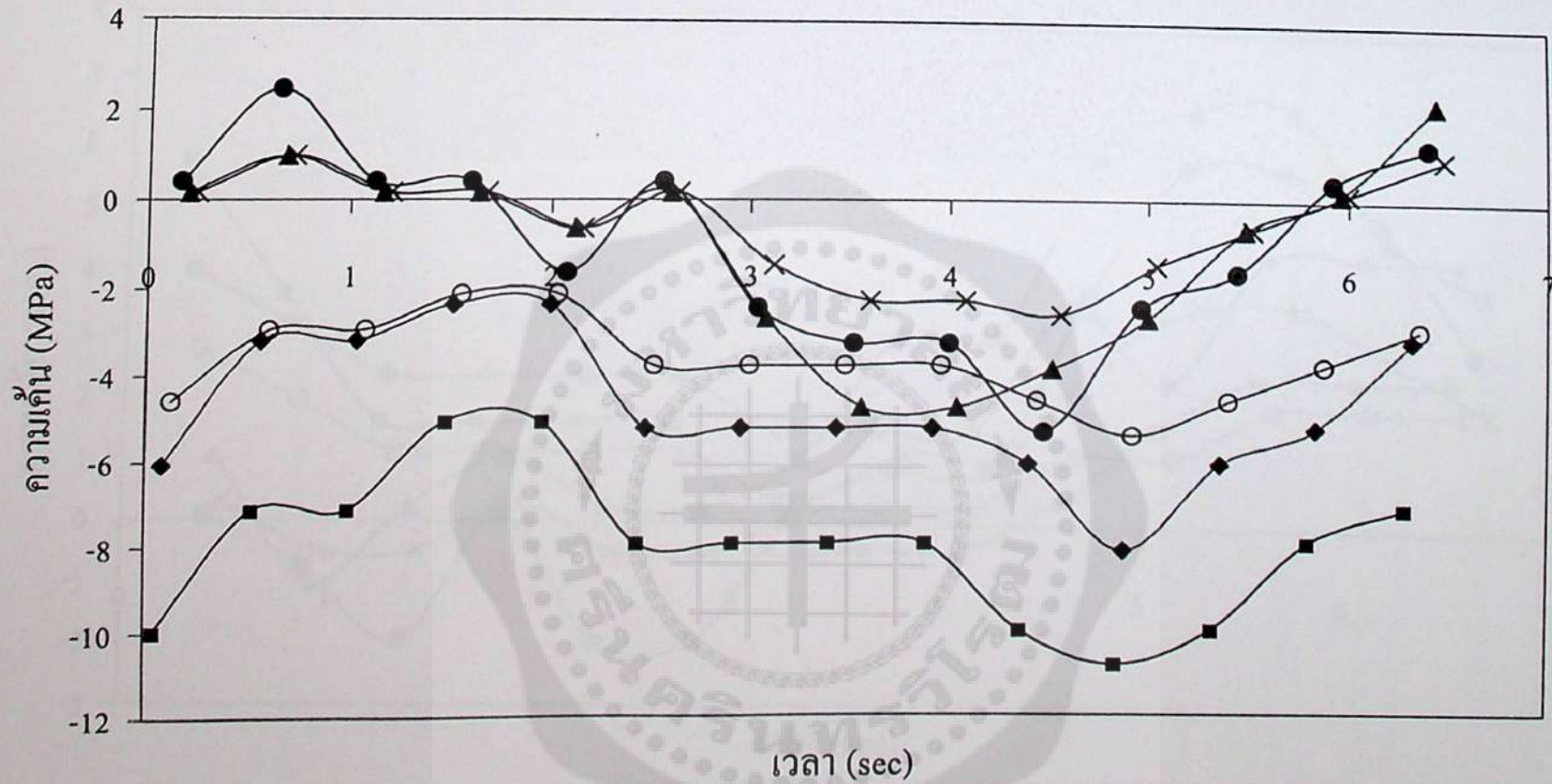
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.16 - 0.24	0.409	0.164	0.164	0.403
0.64 - 0.72	2.455	0.983	0.983	1.276
1.12 - 1.20	0.409	0.164	0.164	1.663
1.60 - 1.68	0.409	0.164	0.164	0.403
2.08 - 2.16	-1.637	-0.656	-0.656	-1.141
2.56 - 2.64	0.409	0.164	0.164	1.663
3.04 - 3.12	-2.456	-2.702	-1.475	1.663
3.52 - 3.60	-3.276	-4.748	-2.295	1.276
4.00 - 4.08	-3.276	-4.748	-2.295	1.276
4.48 - 4.56	-5.321	-3.849	-2.622	-1.082
4.96 - 5.04	-2.456	-2.702	-1.475	1.663
5.44 - 5.52	-1.637	-0.656	-0.656	-0.570
5.92 - 6.00	0.409	0.164	0.164	0.403
6.40 - 6.48	1.229	2.210	0.983	-1.141

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.28 - 0.36	5.730	4.013	2.786	1.263
0.76 - 0.84	3.684	3.193	1.967	1.552
1.24 - 1.32	1.638	2.374	1.147	-2.202
1.72 - 1.80	1.638	2.374	1.147	-2.202
2.20 - 2.28	1.638	2.374	1.147	-0.971
2.68 - 2.76	1.638	2.374	1.147	-0.971
3.16 - 3.24	-0.408	1.554	0.328	-1.840
3.64 - 3.72	-0.408	1.554	0.328	-1.840
4.12 - 4.20	-0.408	1.554	0.328	-1.840
4.60 - 4.68	0.411	3.600	1.147	-2.730
5.08 - 5.16	1.638	2.374	1.147	-2.202
5.56 - 5.64	2.457	4.420	1.967	-2.986
6.04 - 6.12	2.457	4.420	1.967	-2.986
6.52 - 6.60	2.457	4.420	1.967	-1.840

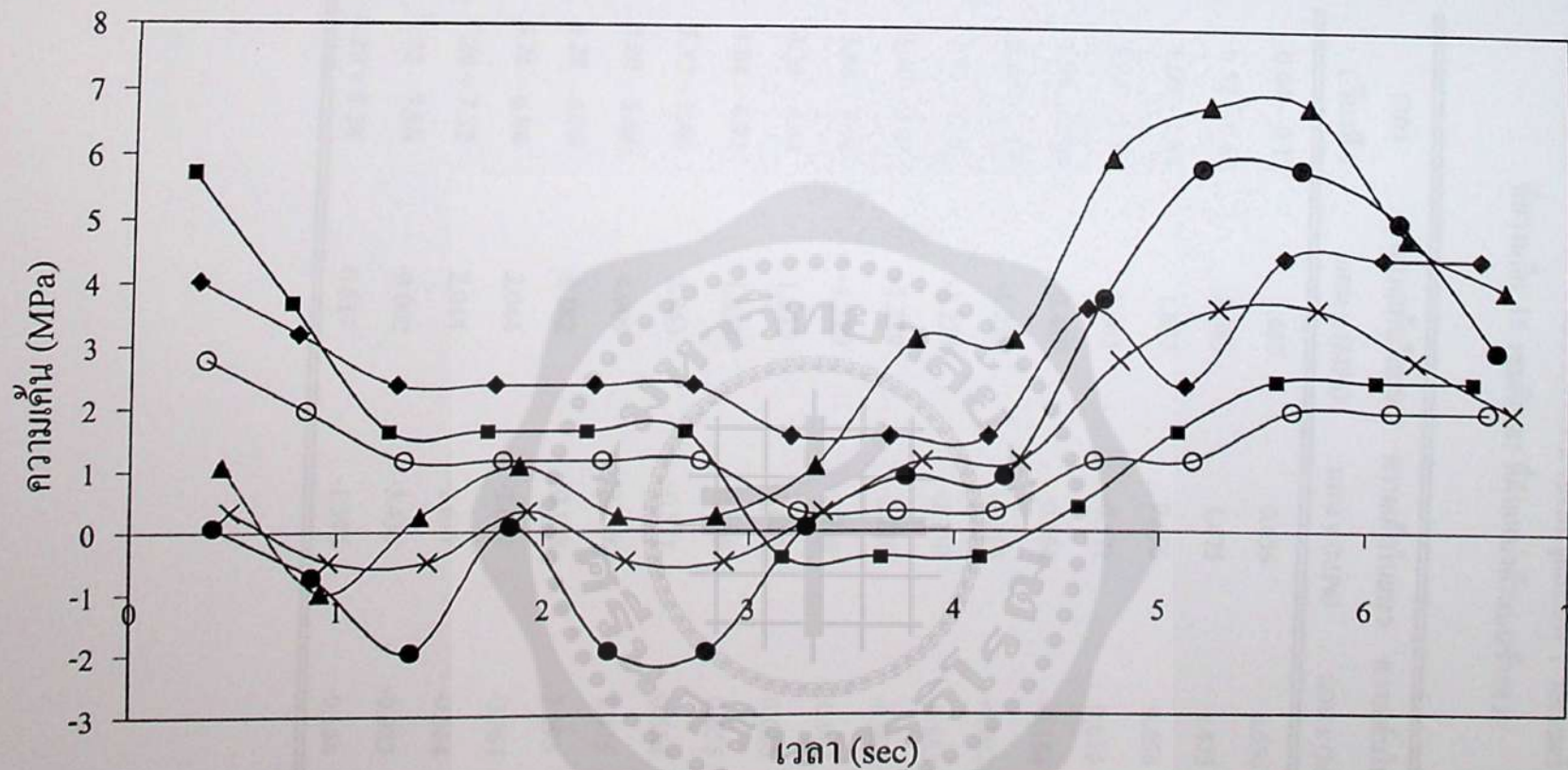
ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	0.083	1.064	0.328	-1.141
0.88 - 0.96	-0.737	-0.982	-0.492	0.403
1.36 - 1.44	-1.963	0.244	-0.492	-1.210
1.84 - 1.92	0.083	1.064	0.328	-0.570
2.32 - 2.40	-1.963	0.244	-0.492	-2.017
2.80 - 2.88	-1.963	0.244	-0.492	-1.210
3.28 - 3.36	0.083	1.064	0.328	-1.141
3.76 - 3.84	0.902	3.110	1.147	-1.210
4.24 - 4.32	0.902	3.110	1.147	-2.017
4.72 - 4.80	3.768	5.975	2.786	-1.210
5.20 - 5.28	5.813	6.795	3.606	-1.141
5.68 - 5.76	5.813	6.795	3.606	-2.352
6.16 - 6.24	4.994	4.749	2.786	1.663
6.64 - 6.72	2.948	3.929	1.967	-1.141



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ♦ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) × ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่ 1 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	1.637	0.656	0.656	3.104
0.52 – 0.60	3.683	1.475	1.475	2.682
1.00 – 1.08	1.637	0.656	0.656	1.857
1.48 – 1.56	2.863	-0.571	0.656	2.525
1.96 – 2.04	-0.409	-0.164	-0.164	-2.427
2.44 – 2.52	-1.229	-2.210	-0.983	3.104
2.92 – 3.00	-1.229	-2.210	-0.983	3.104
3.40 – 3.48	-1.229	-2.210	-0.983	3.104
3.88 – 3.96	-1.229	-2.210	-0.983	3.104
4.36 – 4.44	1.637	0.656	0.656	3.104
4.84 – 4.92	1.637	0.656	0.656	3.104
5.32 – 5.40	2.863	-0.571	0.656	4.690
5.80 – 5.88	4.909	0.249	1.475	4.422
6.28 – 6.36	8.182	-0.158	2.295	7.093
6.76 – 6.84	2.044	-2.617	-0.164	5.534
7.24 – 7.32	2.044	-2.617	-0.164	4.422
7.72 – 7.80	-0.002	-3.436	-0.983	4.690
8.20 – 8.28	0.817	-1.390	-0.164	3.873

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

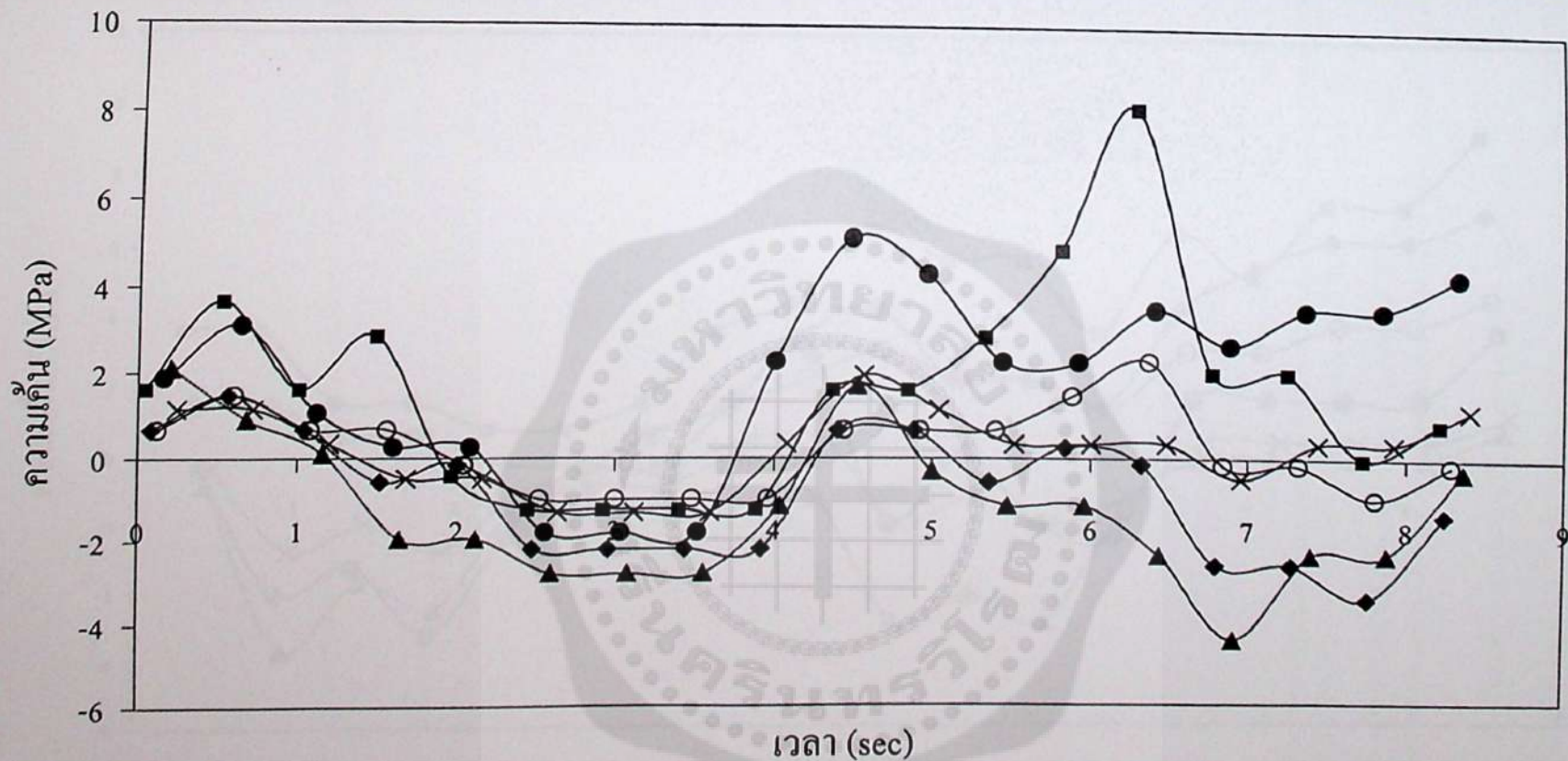
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.16 - 0.24	1.883	2.128	1.147	-1.663
0.64 - 0.72	3.110	0.902	1.147	1.210
1.12 - 1.20	1.064	0.083	0.328	1.141
1.60 - 1.68	0.244	-1.963	-0.492	2.017
2.08 - 2.16	0.244	-1.963	-0.492	2.017
2.56 - 2.64	-1.802	-2.783	-1.311	2.352
3.04 - 3.12	-1.802	-2.783	-1.311	2.352
3.52 - 3.60	-1.802	-2.783	-1.311	2.352
4.00 - 4.08	2.290	-1.144	0.328	2.909
4.48 - 4.56	5.156	1.722	1.967	2.909
4.96 - 5.04	4.336	-0.324	1.147	3.805
5.44 - 5.52	2.290	-1.144	0.328	2.909
5.92 - 6.00	2.290	-1.144	0.328	3.993
6.40 - 6.48	3.517	-2.370	0.328	5.733
6.88 - 6.96	2.697	-4.416	-0.492	4.721
7.36 - 7.44	3.517	-2.370	0.328	3.827
7.84 - 7.92	3.517	-2.370	0.328	3.827
8.32 - 8.40	4.336	-0.324	1.147	3.805

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่แบบที่ 1 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xly1 (MPa)
0.28 - 0.36	3.683	1.475	1.475	1.623
0.76 - 0.84	3.683	1.475	1.475	1.623
1.24 - 1.32	1.637	0.656	0.656	0.722
1.72 - 1.80	1.637	0.656	0.656	0.722
2.20 - 2.28	0.817	-1.390	-0.164	1.155
2.68 - 2.76	0.817	-1.390	-0.164	1.155
3.16 - 3.24	1.637	0.656	0.656	0.722
3.64 - 3.72	3.683	1.475	1.475	1.623
4.12 - 4.20	4.502	3.521	2.295	0.920
4.60 - 4.68	6.548	4.341	3.114	1.623
5.08 - 5.16	5.729	2.295	2.295	1.857
5.56 - 5.64	5.729	2.295	2.295	1.857
6.04 - 6.12	3.683	1.475	1.475	1.155
6.52 - 6.60	6.548	4.341	3.114	1.155
7.00 - 7.08	5.322	5.567	3.114	-1.409
7.48 - 7.56	7.368	6.387	3.934	0.920
7.96 - 8.04	7.368	6.387	3.934	0.920
8.44 - 8.52	9.414	7.206	4.753	1.155

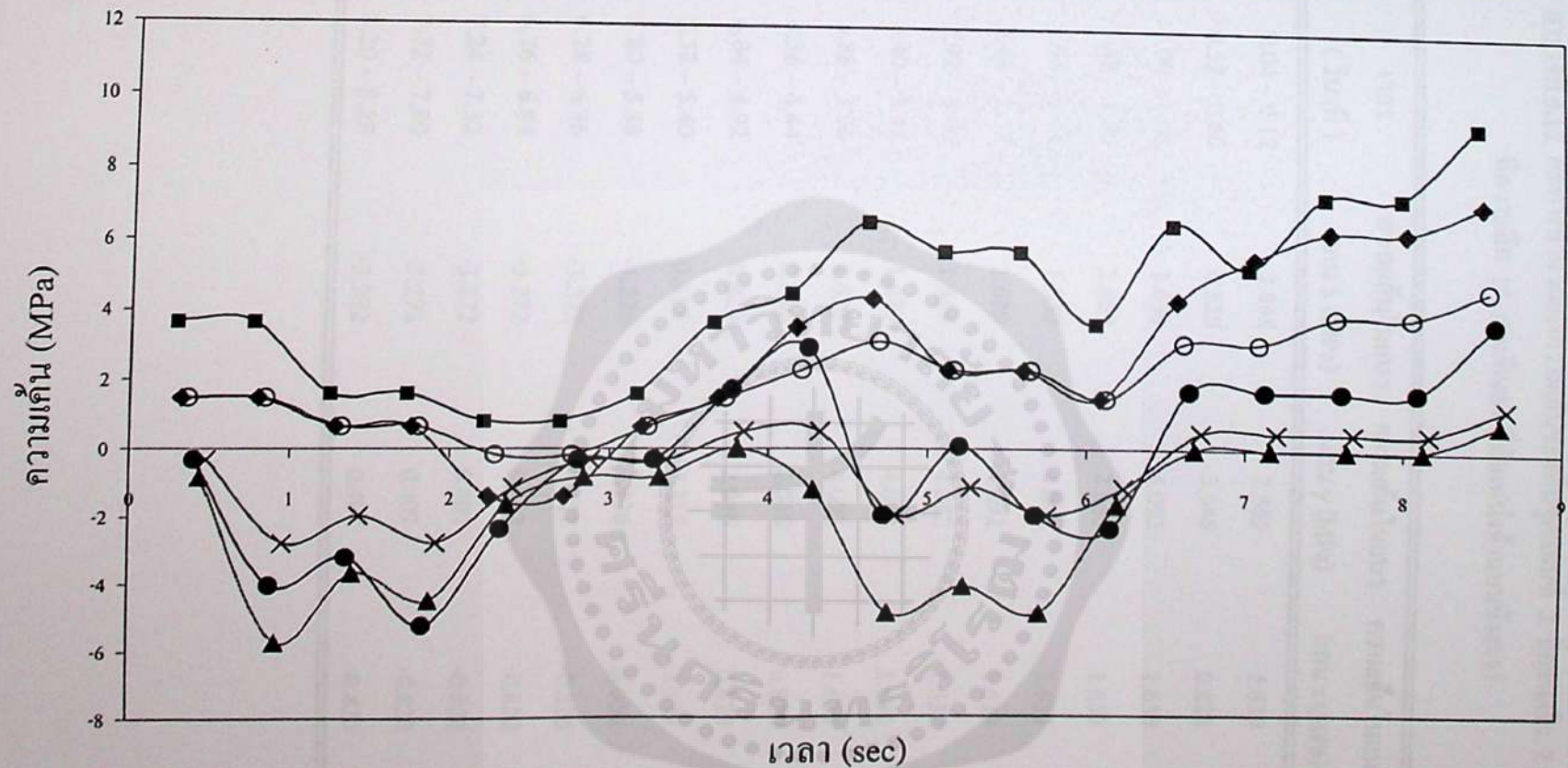
ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	-0.328	-0.818	-0.328	0.570
0.88 - 0.96	-4.013	-5.730	-2.786	0.902
1.36 - 1.44	-3.193	-3.684	-1.967	0.807
1.84 - 1.92	-5.239	-4.503	-2.786	-0.403
2.32 - 2.40	-2.374	-1.638	-1.147	-1.210
2.80 - 2.88	-0.328	-0.818	-0.328	0.570
3.28 - 3.36	-0.328	-0.818	-0.328	0.570
3.76 - 3.84	1.718	0.001	0.492	0.902
4.24 - 4.32	2.945	-1.225	0.492	2.583
4.72 - 4.80	-1.967	-4.910	-1.967	1.711
5.20 - 5.28	0.079	-4.091	-1.147	2.172
5.68 - 5.76	-1.967	-4.910	-1.967	2.551
6.16 - 6.24	-2.374	-1.638	-1.147	-2.706
6.64 - 6.72	1.718	0.001	0.492	0.902
7.12 - 7.20	1.718	0.001	0.492	1.663
7.60 - 7.68	1.718	0.001	0.492	1.663
8.08 - 8.16	1.718	0.001	0.492	2.824
8.56 - 8.64	3.764	0.821	1.311	2.551



■ ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ⊖ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นผิวด้านที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	2.865	2.865	1.639	0.000
0.52 – 0.60	0.820	2.046	0.820	-4.510
1.00 – 1.08	1.639	4.092	1.639	-4.034
1.48 – 1.56	2.865	2.865	1.639	0.000
1.96 – 2.04	1.639	4.092	1.639	-4.034
2.44 – 2.52	1.639	4.092	1.639	-4.034
2.92 – 3.00	1.639	4.092	1.639	-5.259
3.40 – 3.48	1.639	4.092	1.639	-5.259
3.88 – 3.96	1.639	4.092	1.639	-5.259
4.36 – 4.44	0.820	2.046	0.820	-4.510
4.84 – 4.92	0.820	2.046	0.820	-4.510
5.32 – 5.40	0.413	5.318	1.639	-3.608
5.80 – 5.88	-1.226	1.226	0.000	-5.259
6.28 – 6.36	-3.272	0.407	-0.820	-4.857
6.76 – 6.84	-3.272	0.407	-0.820	-4.857
7.24 – 7.32	-3.272	0.407	-0.820	-4.857
7.72 – 7.80	-3.272	0.407	-0.820	-4.857
8.20 – 8.28	-3.272	0.407	-0.820	-4.857

ตารางที่ 4.18 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนบนข้างซ้าย

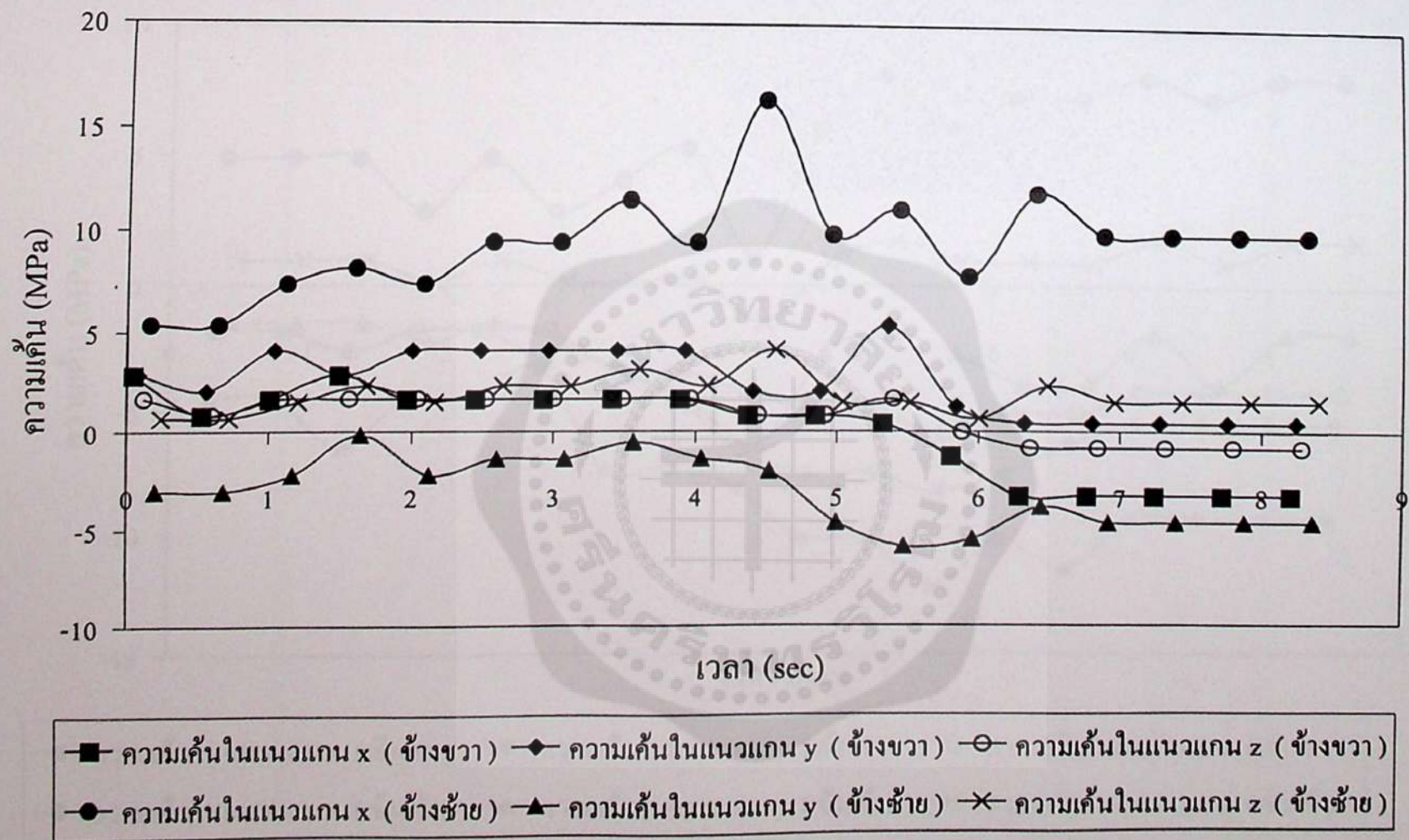
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.16 - 0.24	5.316	-3.024	0.656	5.460
0.64 - 0.72	5.316	-3.024	0.656	5.460
1.12 - 1.20	7.362	-2.204	1.475	5.650
1.60 - 1.68	8.182	-0.158	2.295	4.793
2.08 - 2.16	7.362	-2.204	1.475	6.355
2.56 - 2.64	9.408	-1.385	2.295	6.519
3.04 - 3.12	9.408	-1.385	2.295	5.972
3.52 - 3.60	11.454	-0.565	3.114	6.800
4.00 - 4.08	9.408	-1.385	2.295	6.519
4.48 - 4.56	16.362	-2.034	4.098	10.084
4.96 - 5.04	9.815	-4.657	1.475	7.988
5.44 - 5.52	11.041	-5.883	1.475	9.649
5.92 - 6.00	7.769	-5.476	0.656	7.645
6.40 - 6.48	11.861	-3.837	2.295	8.811
6.88 - 6.96	9.815	-4.657	1.475	8.501
7.36 - 7.44	9.815	-4.657	1.475	7.988
7.84 - 7.92	9.815	-4.657	1.475	7.988
8.32 - 8.40	9.815	-4.657	1.475	8.501

ตารางที่ 4.19 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

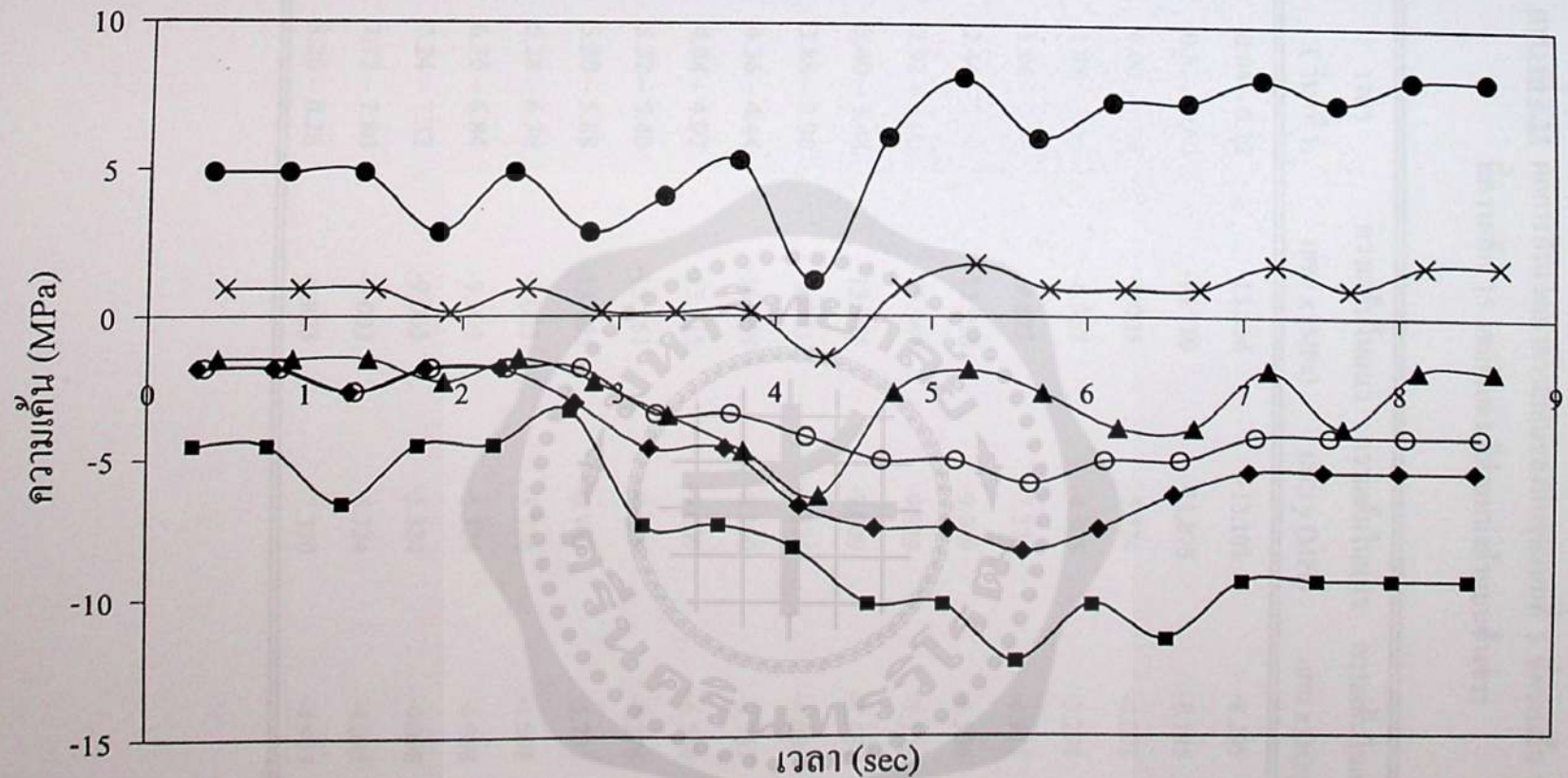
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.28 - 0.36	-4.501	-1.803	-1.803	-2.172
0.76 - 0.84	-4.501	-1.803	-1.803	-3.252
1.24 - 1.32	-6.547	-2.622	-2.622	-2.282
1.72 - 1.80	-4.501	-1.803	-1.803	-1.454
2.20 - 2.28	-4.501	-1.803	-1.803	-3.252
2.68 - 2.76	-3.275	-3.029	-1.803	-1.663
3.16 - 3.24	-7.367	-4.668	-3.442	-3.252
3.64 - 3.72	-7.367	-4.668	-3.442	-2.172
4.12 - 4.20	-8.186	-6.714	-4.262	-2.420
4.60 - 4.68	-10.232	-7.534	-5.081	-3.252
5.08 - 5.16	-10.232	-7.534	-5.081	-2.172
5.56 - 5.64	-12.278	-8.353	-5.901	-3.072
6.04 - 6.12	-10.232	-7.534	-5.081	-2.172
6.52 - 6.60	-11.458	-6.307	-5.081	-3.973
7.00 - 7.08	-9.413	-5.488	-4.262	-3.072
7.48 - 7.56	-9.413	-5.488	-4.262	-3.072
7.96 - 8.04	-9.413	-5.488	-4.262	-3.072
8.44 - 8.52	-9.413	-5.488	-4.262	-3.072

ตารางที่ 4.20 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	4.908	-1.469	0.983	3.355
0.88 - 0.96	4.908	-1.469	0.983	3.404
1.36 - 1.44	4.908	-1.469	0.983	3.355
1.84 - 1.92	2.862	-2.289	0.164	2.682
2.32 - 2.40	4.908	-1.469	0.983	3.355
2.80 - 2.88	2.862	-2.289	0.164	2.682
3.28 - 3.36	4.088	-3.515	0.164	3.956
3.76 - 3.84	5.315	-4.742	0.164	5.231
4.24 - 4.32	1.223	-6.381	-1.475	4.196
4.72 - 4.80	6.134	-2.696	0.983	4.620
5.20 - 5.28	8.180	-1.876	1.803	5.764
5.68 - 5.76	6.134	-2.696	0.983	4.620
6.16 - 6.24	7.361	-3.922	0.983	5.890
6.64 - 6.72	7.361	-3.922	0.983	5.890
7.12 - 7.20	8.180	-1.876	1.803	5.231
7.60 - 7.68	7.361	-3.922	0.983	5.917
8.08 - 8.16	8.180	-1.876	1.803	5.231
8.56 - 8.64	8.180	-1.876	1.803	5.231



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ♦ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) × ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.21 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	-15.554	-13.101	-8.195	-1.992
0.52 – 0.60	-16.780	-11.875	-8.195	-2.975
1.00 – 1.08	-9.003	-5.324	-4.098	-2.892
1.48 – 1.56	-6.957	-4.505	-3.278	-3.082
1.96 – 2.04	-9.823	-7.370	-4.917	-3.082
2.44 – 2.52	-13.915	-9.009	-6.556	-2.975
2.92 – 3.00	-15.961	-9.829	-7.376	-3.856
3.40 – 3.48	-13.915	-9.009	-6.556	-3.792
3.88 – 3.96	-9.003	-5.324	-4.098	-2.892
4.36 – 4.44	-11.869	-8.190	-5.737	-2.892
4.84 – 4.92	-13.915	-9.009	-6.556	-2.975
5.32 – 5.40	-15.961	-9.829	-7.376	-3.856
5.80 – 5.88	-13.095	-6.963	-5.737	-3.856
6.28 – 6.36	-9.003	-5.324	-4.098	-2.111
6.76 – 6.84	-9.003	-5.324	-4.098	-2.111
7.24 – 7.32	-9.003	-5.324	-4.098	-2.892
7.72 – 7.80	-9.003	-5.324	-4.098	-2.111
8.20 – 8.28	-9.823	-7.370	-4.917	-1.992

ตารางที่ 4.22 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่ 3 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

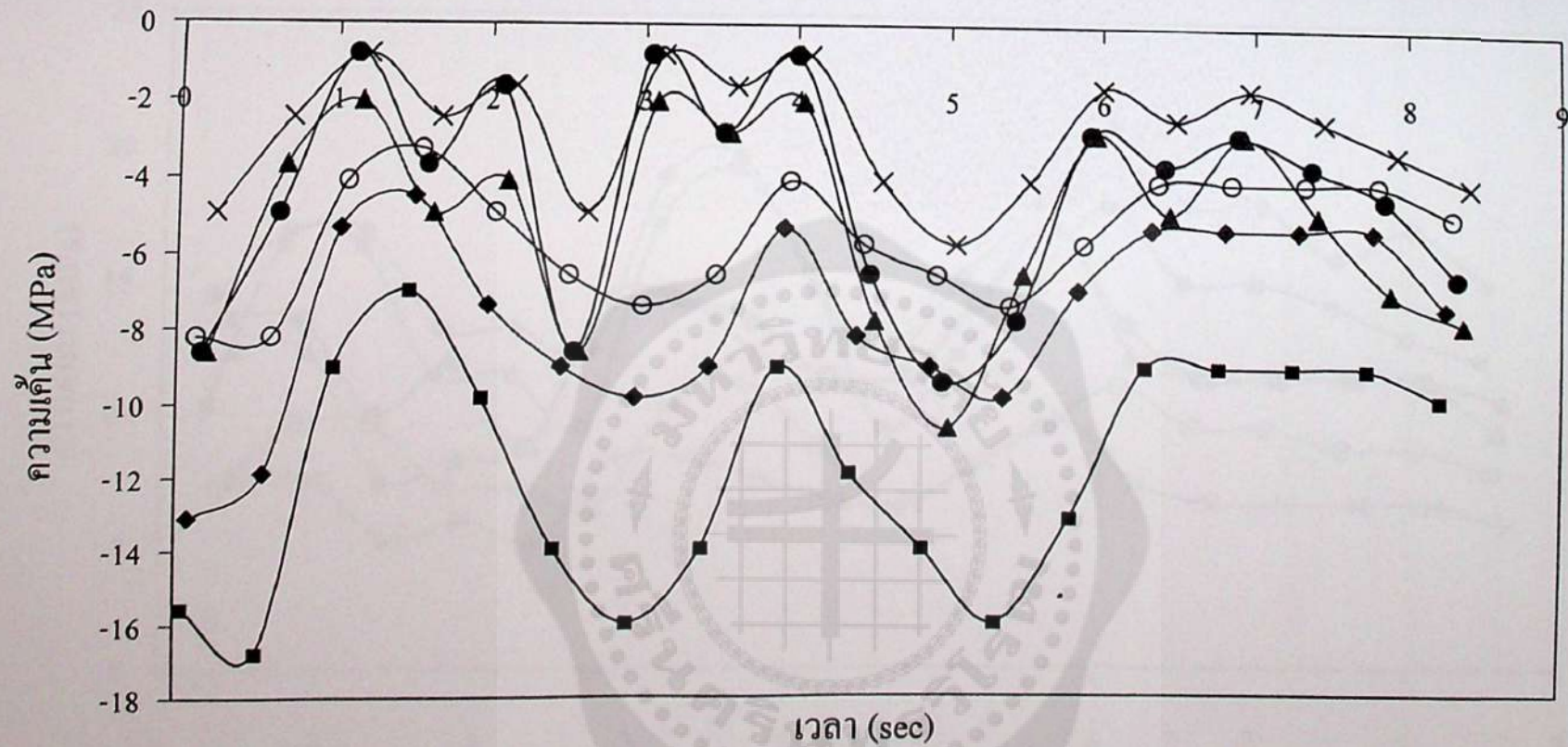
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.16 - 0.24	-8.596	-8.596	-4.917	0.000
0.64 - 0.72	-4.911	-3.685	-2.459	-0.744
1.12 - 1.20	-0.820	-2.046	-0.820	0.744
1.60 - 1.68	-3.685	-4.911	-2.459	0.744
2.08 - 2.16	-1.639	-4.092	-1.639	1.633
2.56 - 2.64	-8.596	-8.596	-4.917	0.000
3.04 - 3.12	-0.820	-2.046	-0.820	1.777
3.52 - 3.60	-2.865	-2.865	-1.639	0.000
4.00 - 4.08	-0.820	-2.046	-0.820	0.744
4.48 - 4.56	-6.550	-7.777	-4.098	0.744
4.96 - 5.04	-9.416	-10.642	-5.737	1.097
5.44 - 5.52	-7.777	-6.550	-4.098	-0.744
5.92 - 6.00	-2.865	-2.865	-1.639	0.000
6.40 - 6.48	-3.685	-4.911	-2.459	1.097
6.88 - 6.96	-2.865	-2.865	-1.639	0.000
7.36 - 7.44	-3.685	-4.911	-2.459	1.097
7.84 - 7.92	-4.505	-6.957	-3.278	1.992
8.32 - 8.40	-6.550	-7.777	-4.098	1.097

ตารางที่ 4.23 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.28 - 0.36	10.237	14.406	7.048	-2.345
0.76 - 0.84	16.374	16.865	9.506	-0.361
1.24 - 1.32	16.374	16.865	9.506	-1.052
1.72 - 1.80	11.463	13.180	7.048	-1.883
2.20 - 2.28	11.463	13.180	7.048	-1.883
2.68 - 2.76	9.417	12.361	6.228	-1.840
3.16 - 3.24	17.194	18.911	10.326	-0.971
3.64 - 3.72	19.240	19.731	11.146	-1.052
4.12 - 4.20	15.555	14.819	8.687	1.702
4.60 - 4.68	9.417	12.361	6.228	-1.552
5.08 - 5.16	12.283	15.226	7.867	-1.552
5.56 - 5.64	15.148	18.091	9.506	-1.552
6.04 - 6.12	18.014	20.957	11.146	-1.840
6.52 - 6.60	15.148	18.091	9.506	-1.840
7.00 - 7.08	15.148	18.091	9.506	-1.552
7.48 - 7.56	14.329	16.046	8.687	-0.971
7.96 - 8.04	13.102	17.272	8.687	-2.202
8.44 - 8.52	12.283	15.226	7.867	-1.552

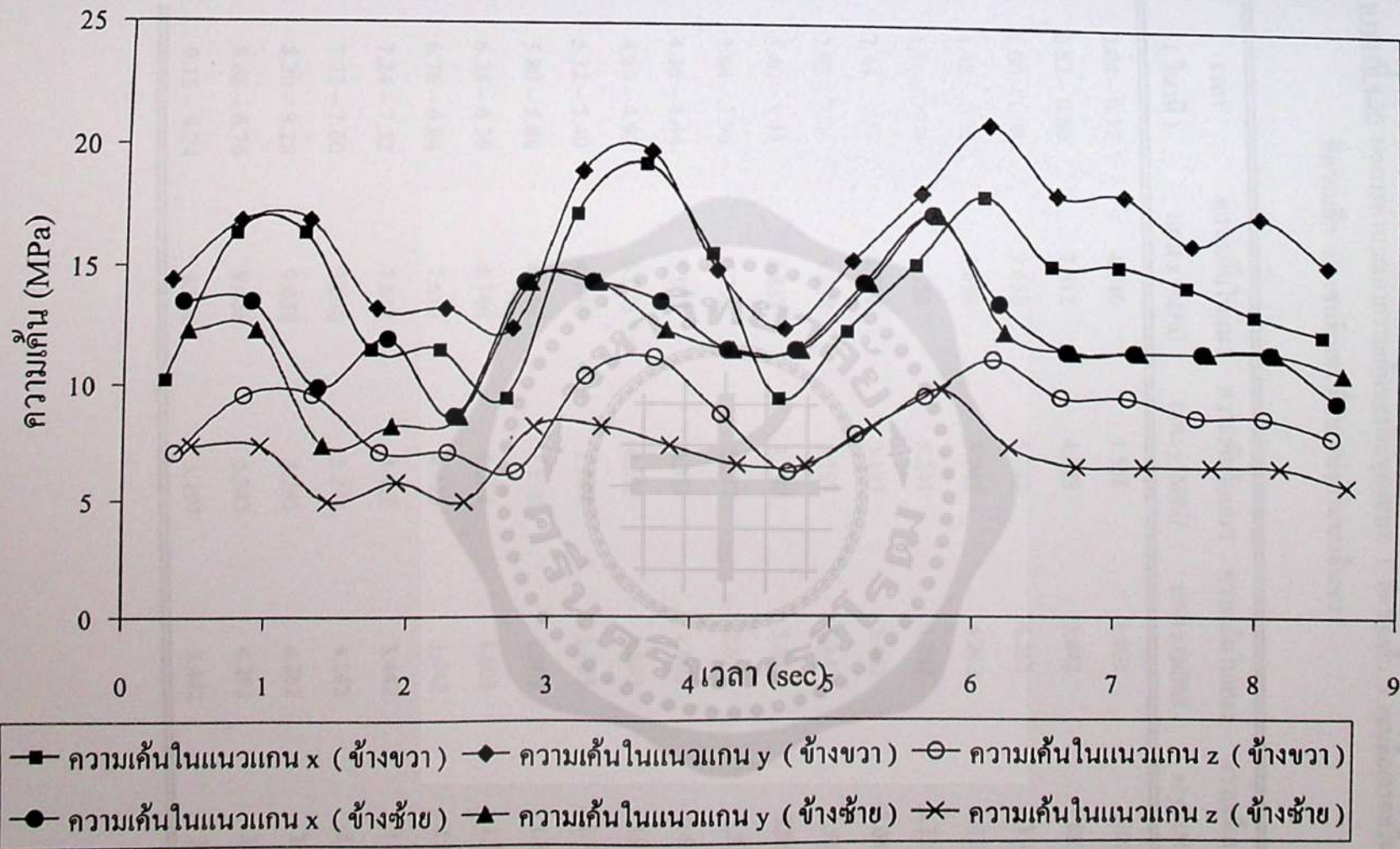
ตารางที่ 4.24 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 7 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.40 - 0.48	13.508	12.281	7.376	0.902
0.88 - 0.96	13.508	12.281	7.376	0.902
1.36 - 1.44	9.823	7.370	4.917	1.276
1.84 - 1.92	11.869	8.190	5.737	2.706
2.32 - 2.40	8.596	8.596	4.917	0.000
2.80 - 2.88	14.327	14.327	8.195	0.000
3.28 - 3.36	14.327	14.327	8.195	0.000
3.76 - 3.84	13.508	12.281	7.376	0.902
4.24 - 4.32	11.462	11.462	6.556	0.000
4.72 - 4.80	11.462	11.462	6.556	0.000
5.20 - 5.28	14.327	14.327	8.195	0.000
5.68 - 5.76	17.193	17.193	9.834	0.000
6.16 - 6.24	13.508	12.281	7.376	0.902
6.64 - 6.72	11.462	11.462	6.556	0.000
7.12 - 7.20	11.462	11.462	6.556	0.000
7.60 - 7.68	11.462	11.462	6.556	0.000
8.08 - 8.16	11.462	11.462	6.556	0.000
8.56 - 8.64	9.416	10.642	5.737	-0.902



■ ความเค้นในแนวแกน x (ช้างขวา) ♦ ความเค้นในแนวแกน y (ช้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ช้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ช้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ช้างซ้าย) × ความเค้นในแนวแกน z (ช้างซ้าย)

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.25 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.04 – 0.12	4.746	1.558	1.803	1.702
0.52 – 0.60	7.612	4.423	3.442	1.883
1.00 – 1.08	9.658	5.243	4.262	2.310
1.48 – 1.56	9.658	5.243	4.262	2.310
1.96 – 2.04	9.658	5.243	4.262	2.310
2.44 – 2.52	8.838	3.197	3.442	3.067
2.92 – 3.00	8.838	3.197	3.442	2.959
3.40 – 3.48	8.838	3.197	3.442	2.959
3.88 – 3.96	6.792	2.377	2.622	2.310
4.36 – 4.44	5.973	0.331	1.803	2.959
4.84 – 4.92	5.973	0.331	1.803	2.959
5.32 – 5.40	4.746	1.558	1.803	1.702
5.80 – 5.88	4.746	1.558	1.803	1.883
6.28 – 6.36	4.746	1.558	1.803	1.702
6.76 – 6.84	7.612	4.423	3.442	1.883
7.24 – 7.32	7.612	4.423	3.442	1.702
7.72 – 7.80	9.658	5.243	4.262	2.310
8.20 – 8.28	9.658	5.243	4.262	2.310
8.68 – 8.76	9.658	5.243	4.262	2.310
9.16 – 9.24	8.838	3.197	3.442	3.067

ตารางที่ 4.26 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่จุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

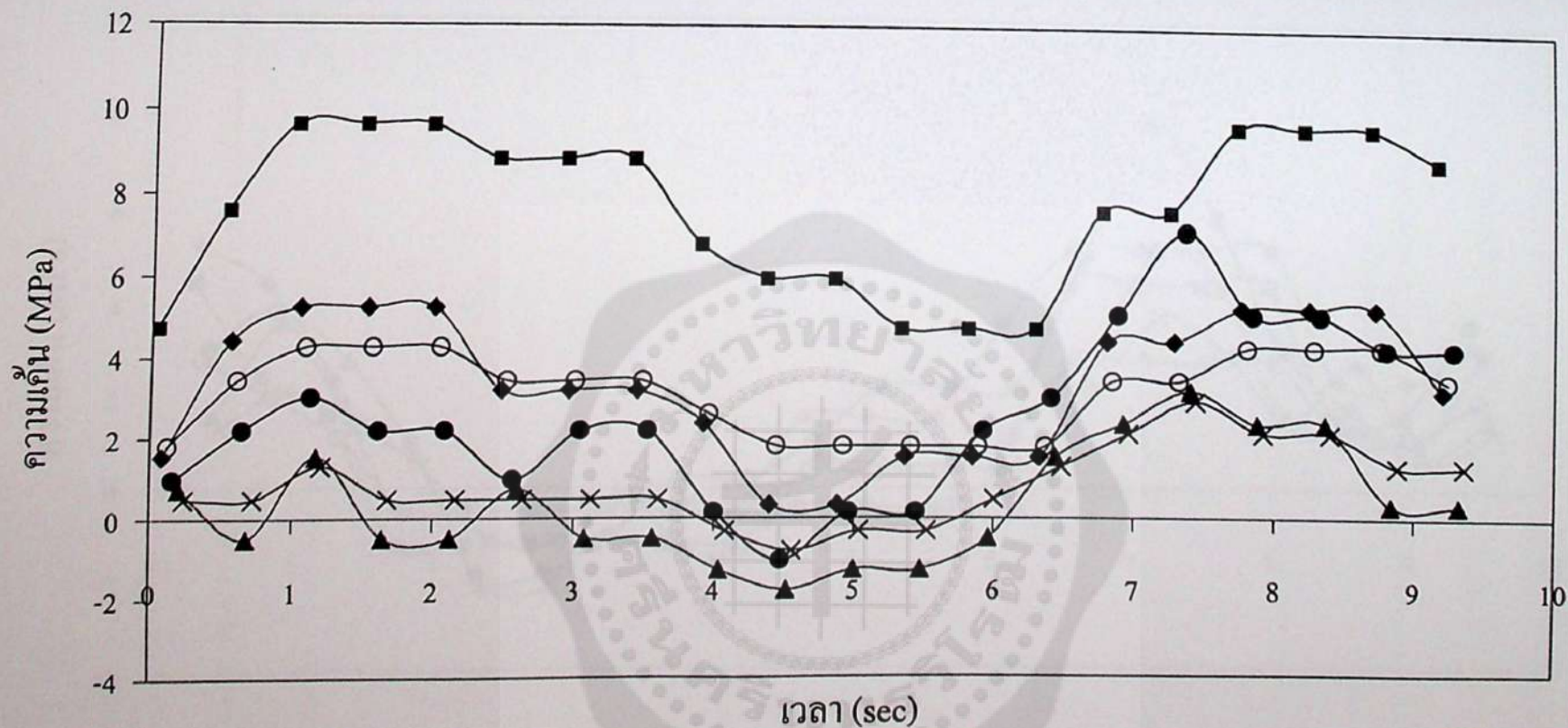
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.16 - 0.24	0.982	0.737	0.492	1.155
0.64 - 0.72	2.209	-0.489	0.492	1.409
1.12 - 1.20	3.028	1.557	1.311	1.943
1.60 - 1.68	2.209	-0.489	0.492	1.813
2.08 - 2.16	2.209	-0.489	0.492	1.813
2.56 - 2.64	0.982	0.737	0.492	1.155
3.04 - 3.12	2.209	-0.489	0.492	1.813
3.52 - 3.60	2.209	-0.489	0.492	1.813
4.00 - 4.08	0.163	-1.309	-0.328	1.943
4.48 - 4.56	-1.065	-1.801	-0.820	1.454
4.96 - 5.04	0.163	-1.309	-0.328	1.943
5.44 - 5.52	0.163	-1.309	-0.328	1.943
5.92 - 6.00	2.209	-0.489	0.492	1.813
6.40 - 6.48	3.028	1.557	1.311	1.943
6.88 - 6.96	5.074	2.376	2.131	1.813
7.36 - 7.44	7.120	3.196	2.950	2.104
7.84 - 7.92	5.074	2.376	2.131	1.409
8.32 - 8.40	5.074	2.376	2.131	1.409
8.80 - 8.88	4.255	0.330	1.311	2.180
9.28 - 9.36	4.255	0.330	1.311	2.104

ตารางที่ 4.27 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

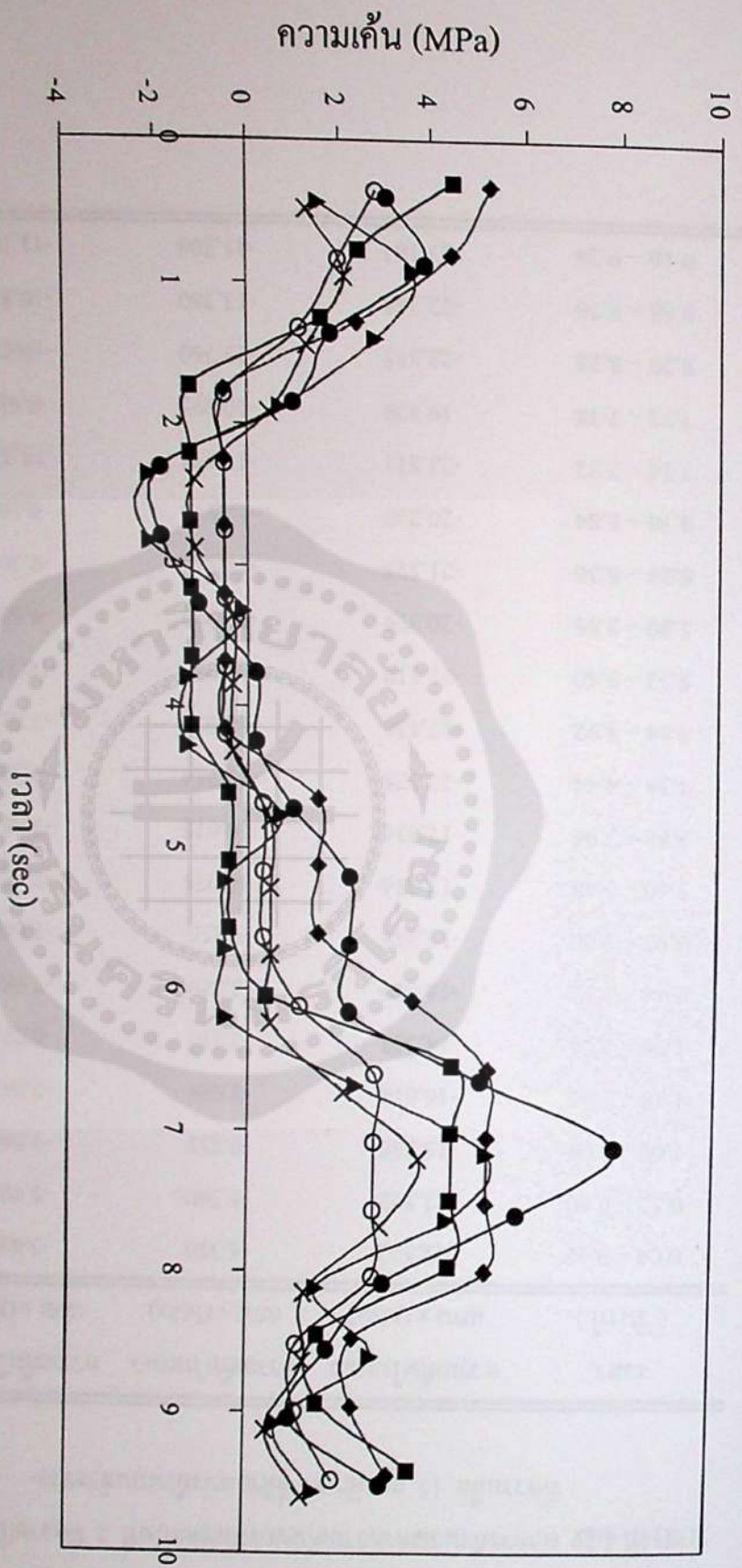
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.28 - 0.36	4.503	5.239	2.786	-1.210
0.76 - 0.84	2.457	4.420	1.967	-1.141
1.24 - 1.32	1.638	2.374	1.147	-1.210
1.72 - 1.80	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
2.20 - 2.28	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
2.68 - 2.76	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
3.16 - 3.24	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
3.64 - 3.72	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
4.12 - 4.20	-1.228	-0.492	-0.492	-0.403
4.60 - 4.68	-0.408	1.554	0.328	-1.141
5.08 - 5.16	-0.408	1.554	0.328	-1.141
5.56 - 5.64	-0.408	1.554	0.328	-1.141
6.04 - 6.12	0.411	3.600	1.147	-1.663
6.52 - 6.60	4.503	5.239	2.786	-1.210
7.00 - 7.08	4.503	5.239	2.786	-0.403
7.48 - 7.56	4.503	5.239	2.786	-1.210
7.96 - 8.04	4.503	5.239	2.786	-1.210
8.44 - 8.52	1.638	2.374	1.147	-1.454
8.92 - 9.00	1.638	2.374	1.147	-0.403
9.40 - 9.48	3.684	3.193	1.967	0.570

ตารางที่ 4.28 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 1 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	3.028	1.557	1.311	1.082
0.88 - 0.96	3.848	3.602	2.131	0.180
1.36 - 1.44	1.802	2.783	1.311	-0.920
1.84 - 1.92	0.982	0.737	0.492	1.409
2.32 - 2.40	-1.883	-2.128	-1.147	1.409
2.80 - 2.88	-1.883	-2.128	-1.147	2.682
3.28 - 3.36	-1.064	-0.083	-0.328	-2.104
3.76 - 3.84	0.163	-1.309	-0.328	2.180
4.24 - 4.32	0.163	-1.309	-0.328	2.180
4.72 - 4.80	0.982	0.737	0.492	1.409
5.20 - 5.28	2.209	-0.489	0.492	1.984
5.68 - 5.76	2.209	-0.489	0.492	1.984
6.16 - 6.24	2.209	-0.489	0.492	3.024
6.64 - 6.72	5.074	2.376	2.131	1.984
7.12 - 7.20	7.940	5.242	3.770	1.984
7.60 - 7.68	5.894	4.422	2.950	1.082
8.08 - 8.16	3.028	1.557	1.311	1.082
8.56 - 8.64	1.802	2.783	1.311	-0.920
9.04 - 9.12	0.982	0.737	0.492	1.409
9.52 - 9.60	3.028	1.557	1.311	2.180



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) —◆— ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) —○— ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) —▲— ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) —×— ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเค้นพื้นที่ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นที่จุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.29 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	-12.522	-6.390	-5.409	-3.191
0.52 – 0.60	-12.522	-6.390	-5.409	-3.191
1.00 – 1.08	-15.388	-9.255	-7.048	-3.389
1.48 – 1.56	-16.614	-8.029	-7.048	-4.610
1.96 – 2.04	-14.568	-7.210	-6.228	-3.902
2.44 – 2.52	-18.660	-8.849	-7.867	-5.128
2.92 – 3.00	-15.388	-9.255	-7.048	-3.191
3.40 – 3.48	-17.434	-10.075	-7.867	-3.902
3.88 – 3.96	-17.434	-10.075	-7.867	-3.860
4.36 – 4.44	-21.525	-11.714	-9.506	-5.128
4.84 – 4.92	-17.434	-10.075	-7.867	-3.902
5.32 – 5.40	-21.119	-14.986	-10.326	-3.389
5.80 – 5.88	-20.299	-12.940	-9.506	-3.860
6.28 – 6.36	-21.525	-11.714	-9.506	-5.128
6.76 – 6.84	-20.299	-12.940	-9.506	-3.860
7.24 – 7.32	-23.571	-12.534	-10.326	-5.741
7.72 – 7.78	-19.479	-10.895	-8.687	-4.466
8.20 – 8.28	-22.345	-13.760	-10.326	-4.466
8.68 – 8.76	-22.345	-13.760	-10.326	-4.610
9.16 – 9.24	-23.164	-15.806	-11.146	-4.223

ตารางที่ 4.30 ผลการคำนวณค่าความเค้นของพื้นที่ 2 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

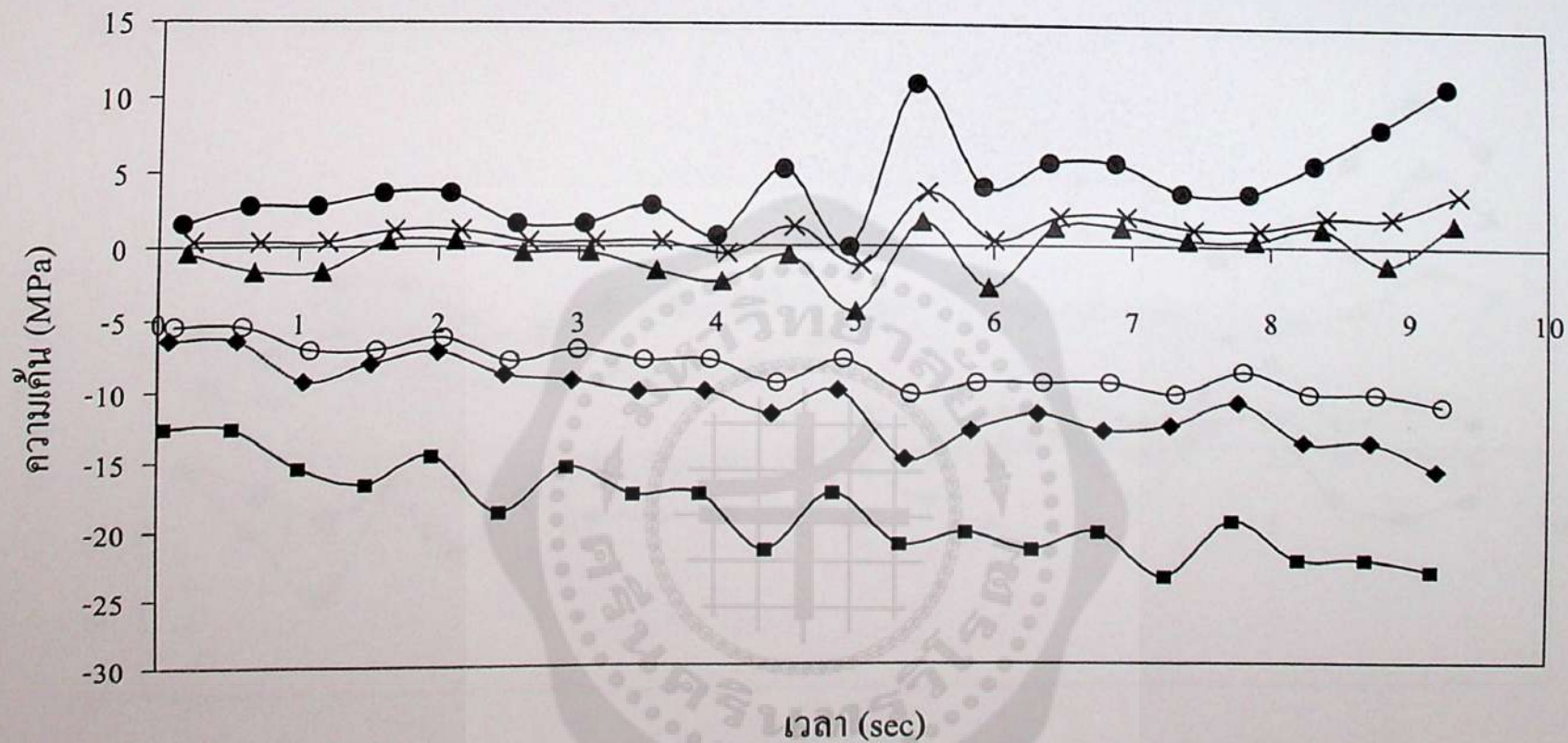
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.16 - 0.24	1.554	-0.408	0.328	1.443
0.64 - 0.72	2.781	-1.634	0.328	2.513
1.12 - 1.20	2.781	-1.634	0.328	3.247
1.60 - 1.68	3.600	0.411	1.147	2.345
2.08 - 2.16	3.600	0.411	1.147	2.345
2.56 - 2.64	1.554	-0.408	0.328	1.443
3.04 - 3.12	1.554	-0.408	0.328	1.443
3.52 - 3.60	2.781	-1.634	0.328	2.513
4.00 - 4.08	0.735	-2.454	-0.492	2.345
4.48 - 4.56	5.236	-0.651	1.311	3.104
4.96 - 5.04	-0.085	-4.500	-1.311	2.513
5.44 - 5.52	10.964	1.644	3.606	4.854
5.92 - 6.00	4.007	-2.861	0.328	3.581
6.40 - 6.48	5.646	1.231	1.967	3.247
6.88 - 6.96	5.646	1.231	1.967	2.513
7.36 - 7.44	3.600	0.411	1.147	2.345
7.84 - 7.92	3.600	0.411	1.147	2.345
8.32 - 8.40	5.646	1.231	1.967	2.513
8.80 - 8.88	8.099	-1.222	1.967	4.953
9.28 - 9.36	10.964	1.644	3.606	5.363

ตารางที่ 4.31 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.28 - 0.36	-0.737	-0.982	-0.492	1.155
0.76 - 0.84	-4.829	-2.621	-2.131	-1.623
1.24 - 1.32	-8.921	-4.260	-3.770	-2.427
1.72 - 1.80	-2.783	-1.802	-1.311	-0.920
2.20 - 2.28	-6.055	-1.395	-2.131	-2.682
2.68 - 2.76	-2.783	-1.802	-1.311	-0.920
3.16 - 3.24	-4.009	-0.575	-1.311	-1.943
3.64 - 3.72	-4.009	-0.575	-1.311	-1.943
4.12 - 4.20	-4.009	-0.575	-1.311	-1.943
4.60 - 4.68	-4.009	-0.575	-1.311	-1.857
5.08 - 5.16	-1.144	2.290	0.328	-1.857
5.56 - 5.64	-3.190	1.471	-0.492	-2.427
6.04 - 6.12	-1.144	2.290	0.328	-1.943
6.52 - 6.60	0.902	3.110	1.147	-1.155
7.00 - 7.08	-3.190	1.471	-0.492	-2.800
7.48 - 7.56	0.902	3.110	1.147	-1.155
7.96 - 8.04	1.722	5.156	1.967	-1.943
8.44 - 8.52	-3.190	1.471	-0.492	-2.427
8.92 - 9.00	-4.416	2.697	-0.492	-3.873
9.40 - 9.48	-3.190	1.471	-0.492	-2.427

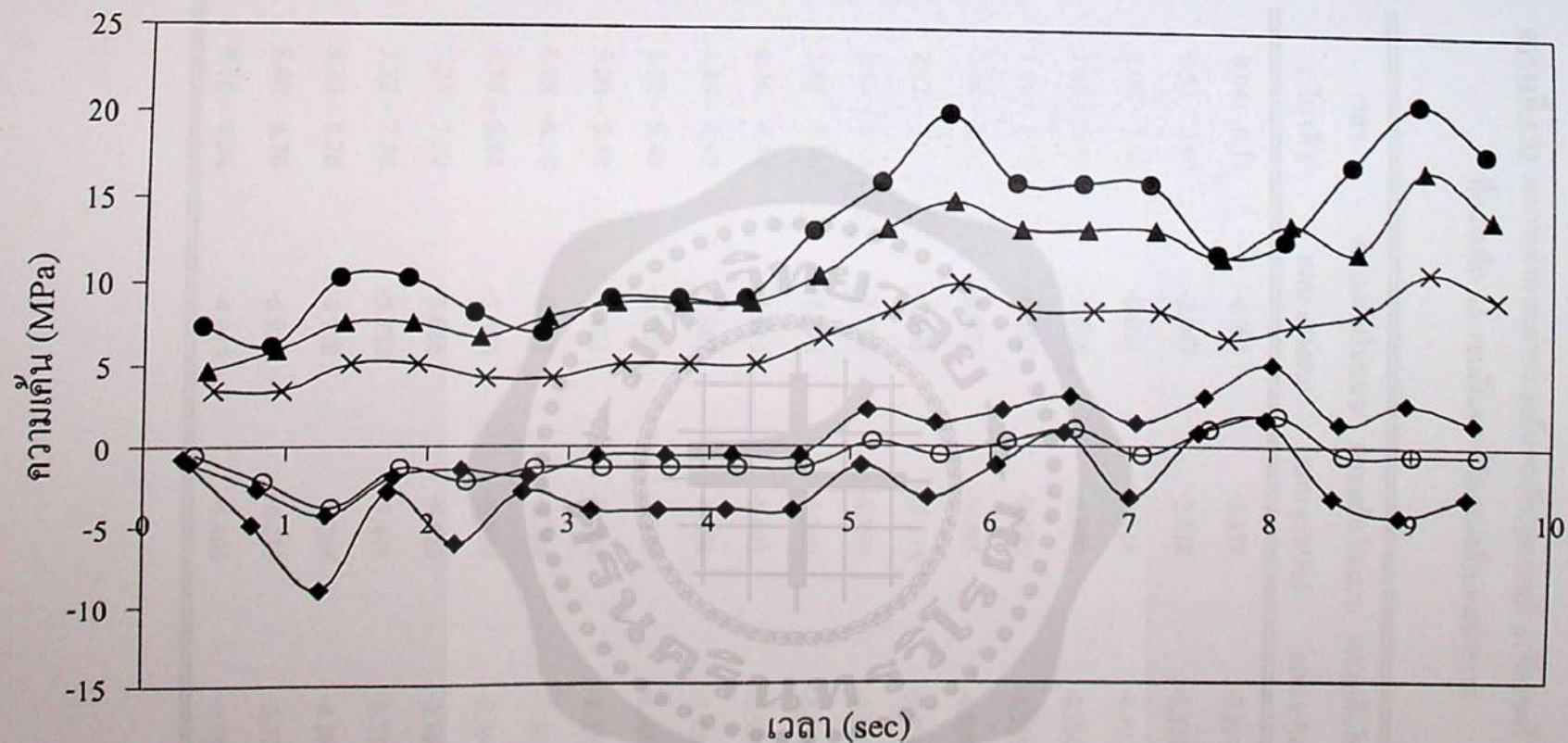
ตารางที่ 4.32 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 2 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.40 - 0.48	7.367	4.668	3.442	2.373
0.88 - 0.96	6.140	5.895	3.442	1.918
1.36 - 1.44	10.232	7.534	5.081	3.484
1.84 - 1.92	10.232	7.534	5.081	2.373
2.32 - 2.40	8.186	6.714	4.262	1.488
2.80 - 2.88	6.960	7.941	4.262	-1.374
3.28 - 3.36	9.006	8.760	5.081	1.918
3.76 - 3.84	9.006	8.760	5.081	1.918
4.24 - 4.32	9.006	8.760	5.081	1.918
4.72 - 4.80	13.098	10.399	6.720	3.484
5.20 - 5.28	15.963	13.265	8.359	3.484
5.68 - 5.76	20.055	14.904	9.998	5.206
6.16 - 6.24	15.963	13.265	8.359	3.484
6.64 - 6.72	15.963	13.265	8.359	3.484
7.12 - 7.20	15.963	13.265	8.359	3.484
7.60 - 7.68	11.871	11.626	6.720	1.918
8.08 - 8.16	12.691	13.672	7.540	-3.860
8.56 - 8.64	17.189	12.038	8.359	4.165
9.04 - 9.12	20.874	16.950	10.818	4.337
9.52 - 9.60	18.009	14.084	9.179	3.267



- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ♦ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) × ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



- ◆ ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ⊖ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) ✕ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

ตารางที่ 4.33 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน xlyl (MPa)
0.04 – 0.12	-4.093	-3.357	-2.131	-0.541
0.52 – 0.60	-2.047	-2.538	-1.311	0.361
1.00 – 1.08	-0.001	-1.718	-0.492	1.263
1.48 – 1.56	-3.686	-6.630	-2.950	1.840
1.96 – 2.04	-6.552	-9.495	-4.589	2.759
2.44 – 2.52	-6.552	-9.495	-4.589	2.759
2.92 – 3.00	-8.598	-10.315	-5.409	0.971
3.40 – 3.48	-7.778	-8.269	-4.589	1.052
3.88 – 3.96	-7.778	-8.269	-4.589	1.052
4.36 – 4.44	-4.913	-5.403	-2.950	1.052
4.84 – 4.92	-2.867	-4.584	-2.131	0.971
5.32 – 5.40	-0.001	-1.718	-0.492	0.971
5.80 – 5.88	-0.821	-3.764	-1.311	1.840
6.28 – 6.36	-0.821	-3.764	-1.311	1.840
6.76 – 6.84	-3.686	-6.630	-2.950	1.840
7.24 – 7.32	-3.686	-6.630	-2.950	1.840
7.72 – 7.78	-5.732	-7.449	-3.770	1.883
8.20 – 8.28	-7.778	-8.269	-4.589	2.310
8.68 – 8.76	-6.959	-6.223	-3.770	-1.702
9.16 – 9.24	-4.913	-5.403	-2.950	1.052

ตารางที่ 4.34 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านบนข้างซ้าย

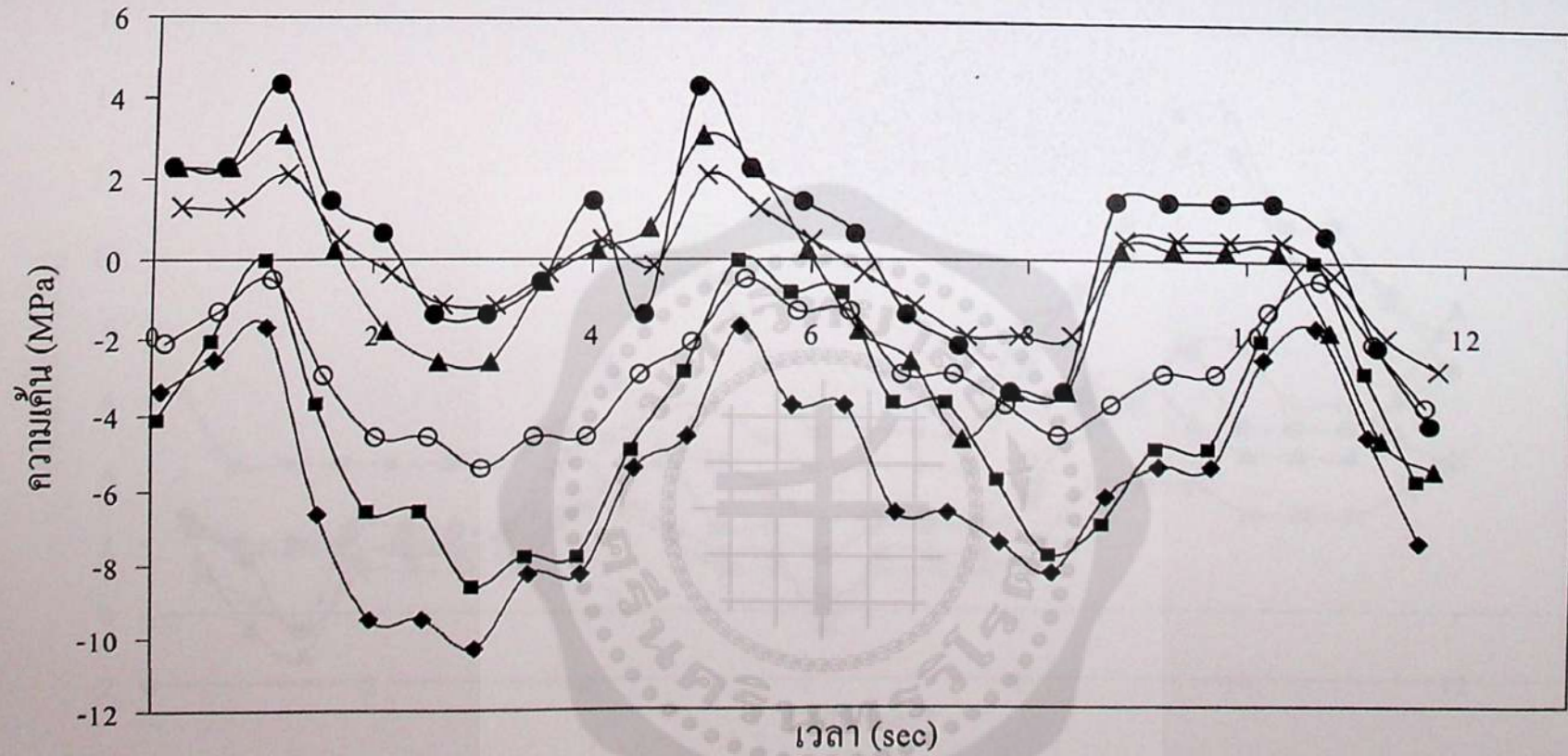
เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.16 - 0.24	2.292	2.292	1.311	0.000
0.64 - 0.72	2.292	2.292	1.311	0.000
1.12 - 1.20	4.338	3.112	2.131	2.754
1.60 - 1.68	1.473	0.246	0.492	2.754
2.08 - 2.16	0.653	-1.800	-0.328	2.407
2.56 - 2.64	-1.393	-2.619	-1.147	0.996
3.04 - 3.12	-1.393	-2.619	-1.147	1.541
3.52 - 3.60	-0.573	-0.573	-0.328	0.000
4.00 - 4.08	1.473	0.246	0.492	2.754
4.48 - 4.56	-1.390	0.817	-0.164	-1.454
4.96 - 5.04	4.338	3.112	2.131	2.754
5.44 - 5.52	2.292	2.292	1.311	0.000
5.92 - 6.00	1.473	0.246	0.492	1.541
6.40 - 6.48	0.653	-1.800	-0.328	1.488
6.88 - 6.96	-1.393	-2.619	-1.147	1.541
7.36 - 7.44	-2.212	-4.665	-1.967	2.407
7.84 - 7.92	-3.439	-3.439	-1.967	0.000
8.32 - 8.40	-3.439	-3.439	-1.967	0.000
8.80 - 8.88	1.473	0.246	0.492	1.541
9.28 - 9.36	1.473	0.246	0.492	1.541

ตารางที่ 4.35 ผลการคำนวณค่าความเค้นของฟันชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที
ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างขวา

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.28 - 0.36	6.302	2.868	2.622	2.525
0.76 - 0.84	4.256	2.048	1.803	1.623
1.24 - 1.32	4.256	2.048	1.803	1.623
1.72 - 1.80	4.256	2.048	1.803	1.623
2.20 - 2.28	4.256	2.048	1.803	1.623
2.68 - 2.76	4.256	2.048	1.803	2.682
3.16 - 3.24	4.256	2.048	1.803	1.623
3.64 - 3.72	5.075	4.094	2.622	1.857
4.12 - 4.20	7.121	4.914	3.442	1.623
4.60 - 4.68	9.167	5.733	4.262	1.857
5.08 - 5.16	9.167	5.733	4.262	1.857
5.56 - 5.64	7.121	4.914	3.442	1.623
6.04 - 6.12	5.075	4.094	2.622	0.722
6.52 - 6.60	5.075	4.094	2.622	1.857
7.00 - 7.08	5.075	4.094	2.622	0.722
7.48 - 7.56	5.075	4.094	2.622	0.722
7.96 - 8.04	7.941	6.960	4.262	0.722
8.44 - 8.52	8.760	9.006	5.081	-0.180
8.92 - 9.00	10.806	9.825	5.901	0.722
9.40 - 9.48	13.672	12.691	7.540	0.920

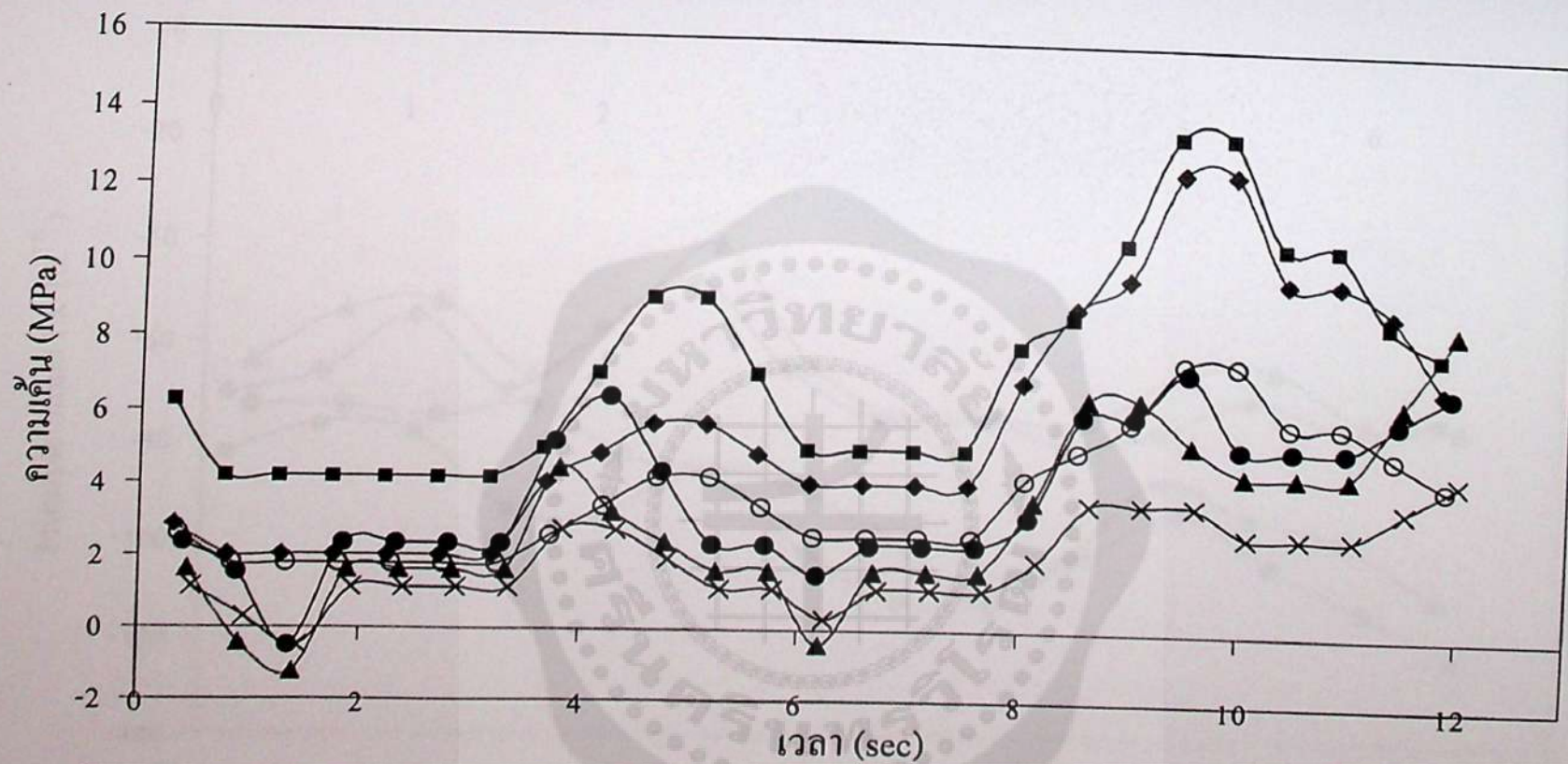
ตารางที่ 4.36 ผลการคำนวณค่าความเค้นของหินชุดแบบที่ 3 ที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 15 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งด้านล่างข้างซ้าย

เวลา (วินาที)	ความเค้นในแนว แกน x (MPa)	ความเค้นในแนว แกน y (MPa)	ความเค้นในแนว แกน z (MPa)	ความเค้นเฉือน x1y1 (MPa)
0.40 - 0.48	2.374	1.638	1.147	0.971
0.88 - 0.96	1.554	-0.408	0.328	1.840
1.36 - 1.44	-0.492	-1.228	-0.492	0.971
1.84 - 1.92	2.374	1.638	1.147	2.202
2.32 - 2.40	2.374	1.638	1.147	2.202
2.80 - 2.88	2.374	1.638	1.147	0.971
3.28 - 3.36	2.374	1.638	1.147	0.971
3.76 - 3.84	5.239	4.503	2.786	0.971
4.24 - 4.32	6.466	3.277	2.786	1.883
4.72 - 4.80	4.420	2.457	1.967	1.840
5.20 - 5.28	2.374	1.638	1.147	0.971
5.68 - 5.76	2.374	1.638	1.147	2.202
6.16 - 6.24	1.554	-0.408	0.328	1.840
6.64 - 6.72	2.374	1.638	1.147	0.971
7.12 - 7.20	2.374	1.638	1.147	0.971
7.60 - 7.68	2.374	1.638	1.147	0.541
8.08 - 8.16	3.193	3.684	1.967	-1.052
8.56 - 8.64	6.059	6.549	3.606	-1.052
9.04 - 9.12	6.059	6.549	3.606	-1.052
9.52 - 9.60	7.285	5.323	3.606	1.443



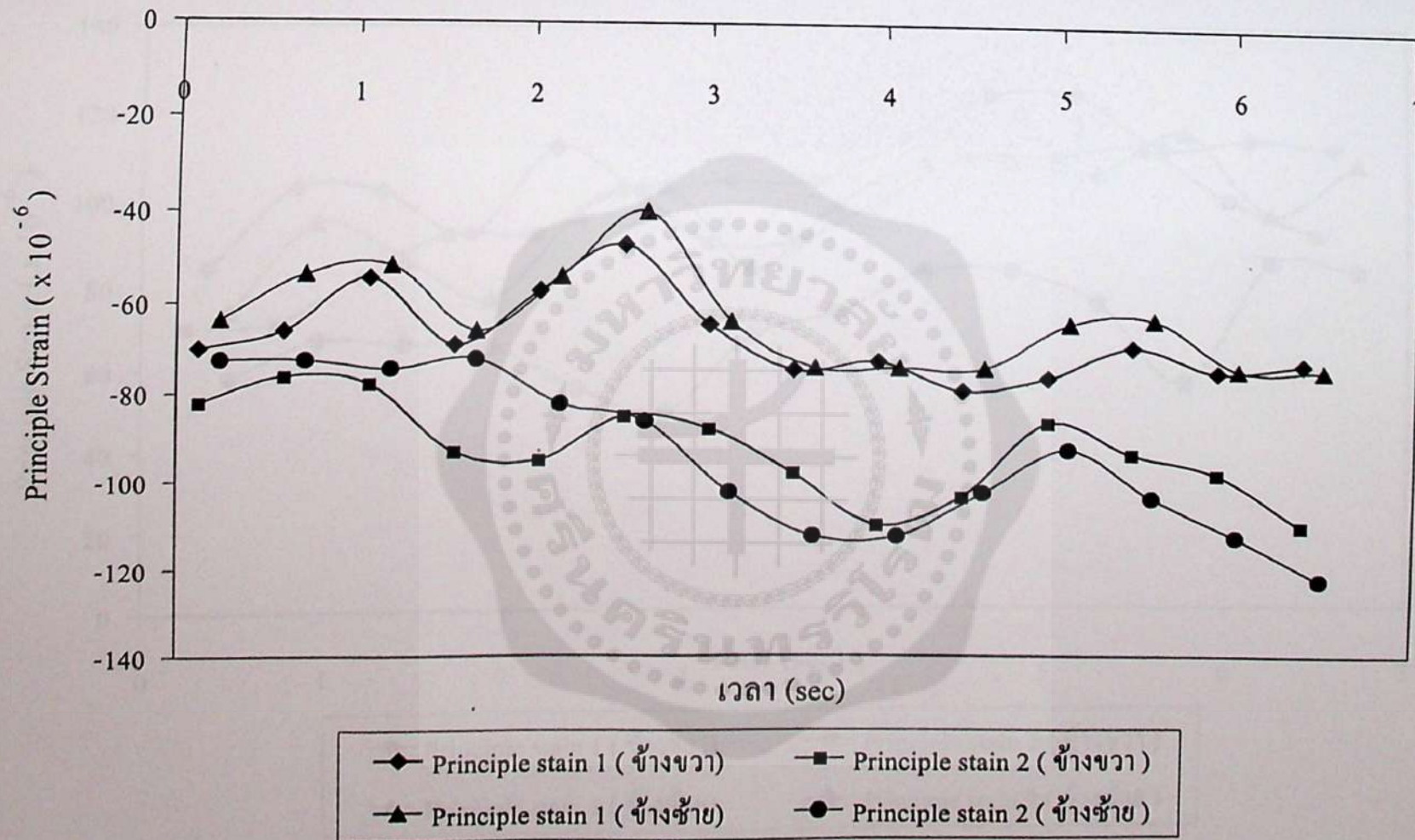
- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) —◆— ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) —○— ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 —●— ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) —▲— ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) —×— ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นพหุชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน

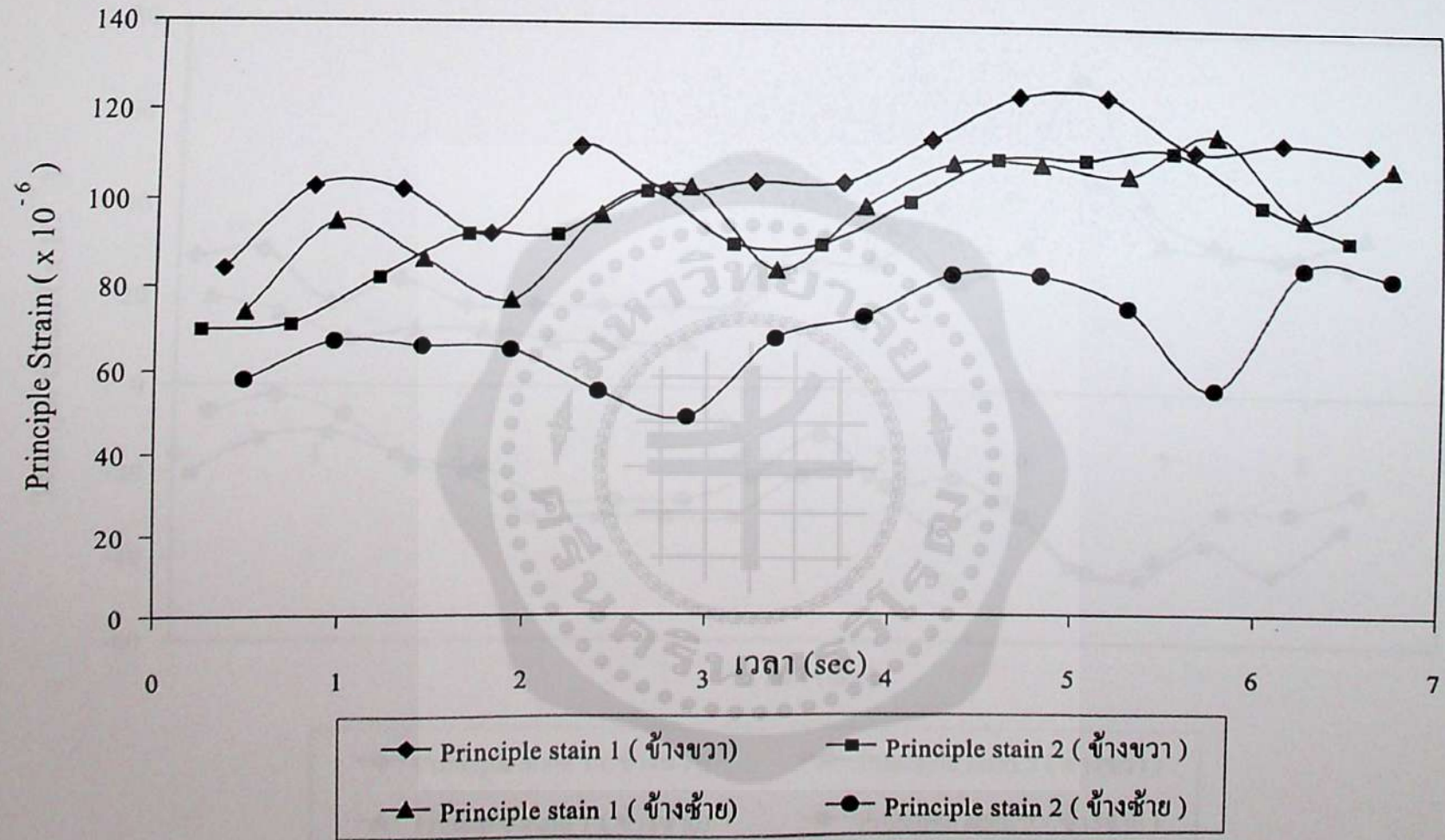


- ความเค้นในแนวแกน x (ข้างขวา) ◆ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างขวา) ○ ความเค้นในแนวแกน z (ข้างขวา)
 ● ความเค้นในแนวแกน x (ข้างซ้าย) ▲ ความเค้นในแนวแกน y (ข้างซ้าย) × ความเค้นในแนวแกน z (ข้างซ้าย)

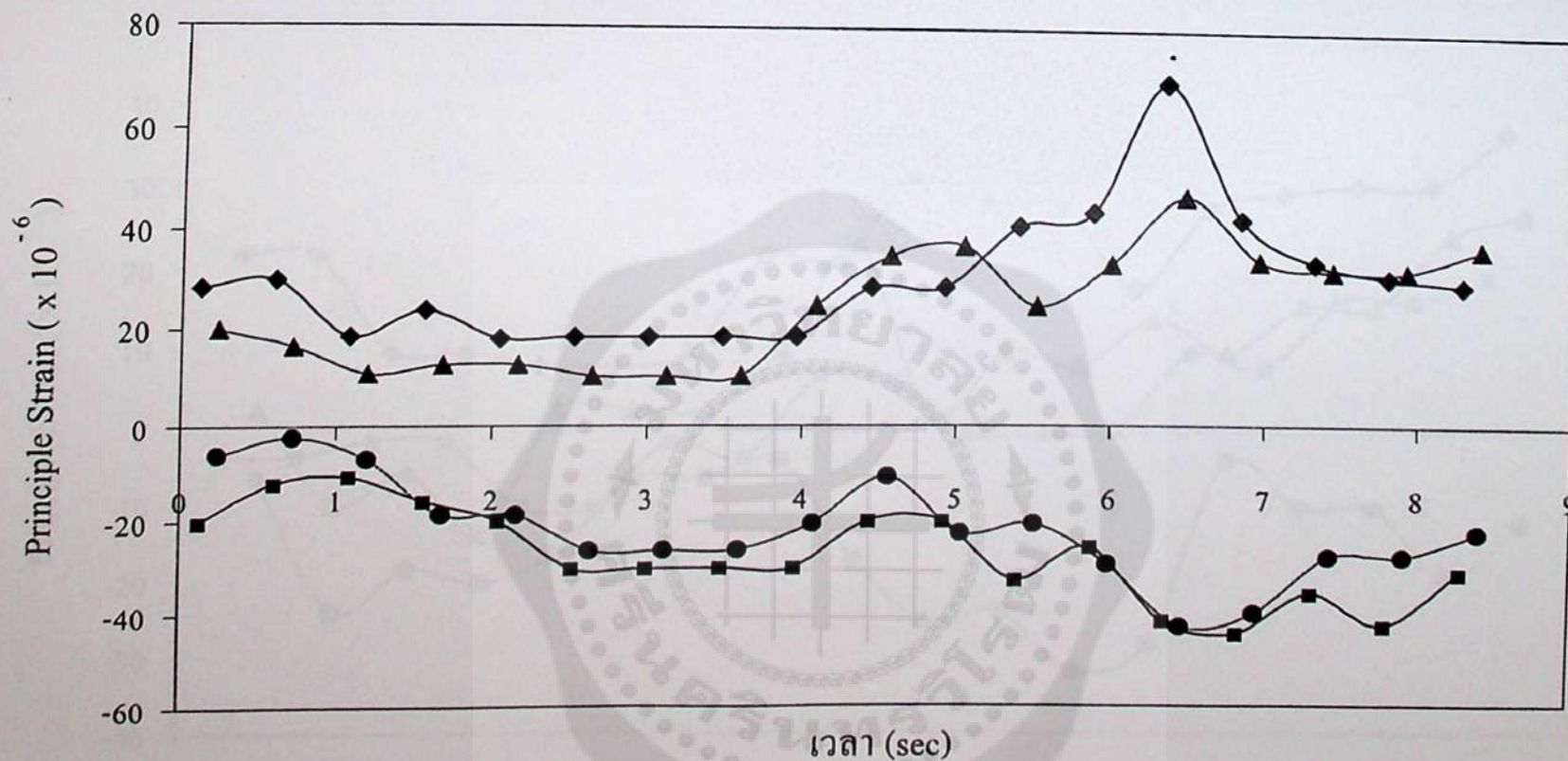
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในแนวแกนต่างๆกับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



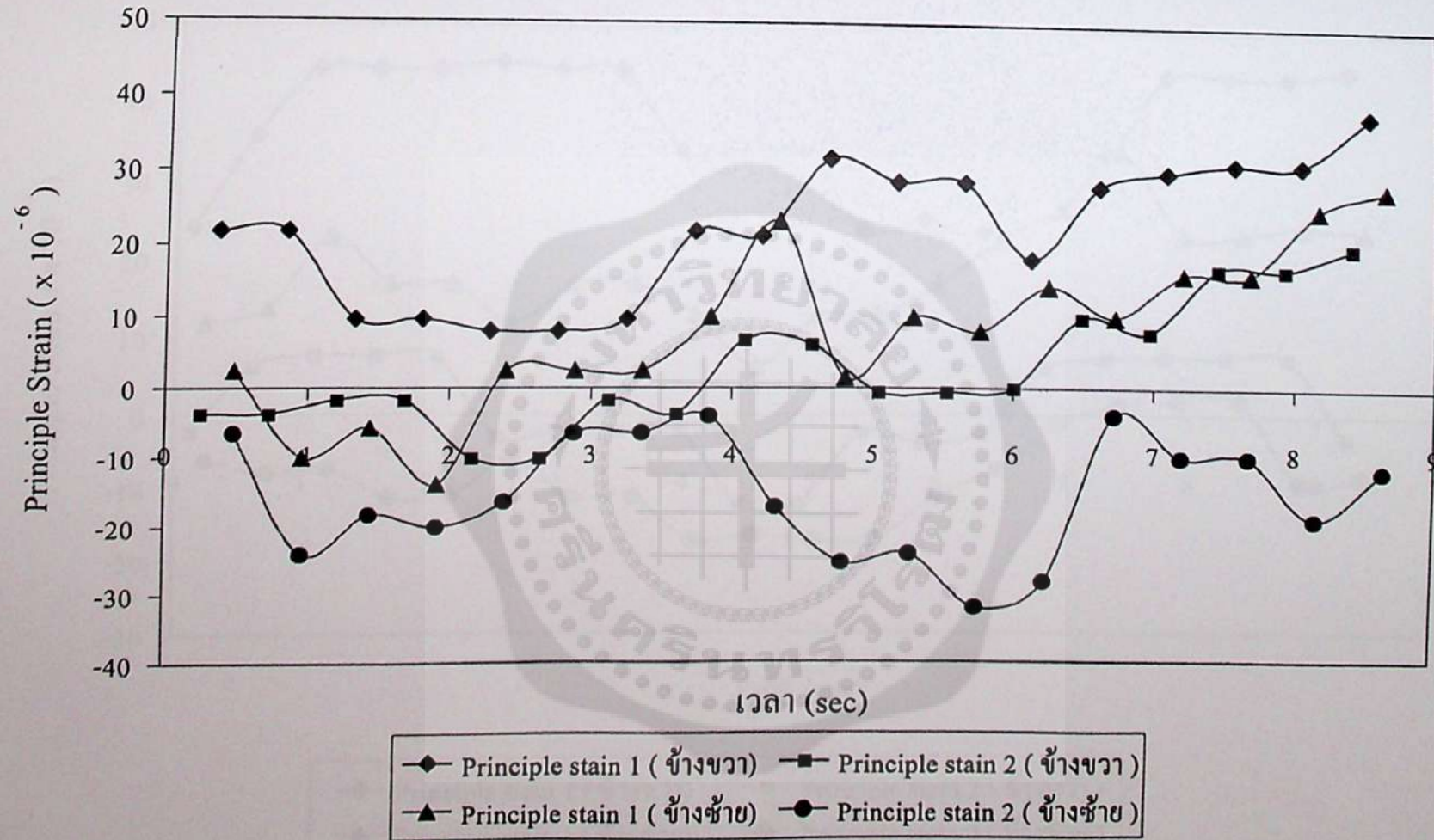
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



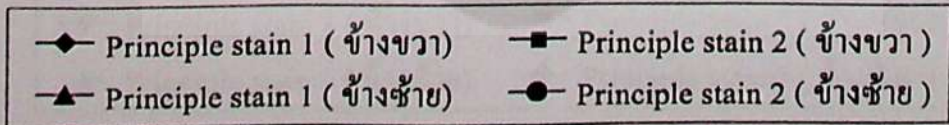
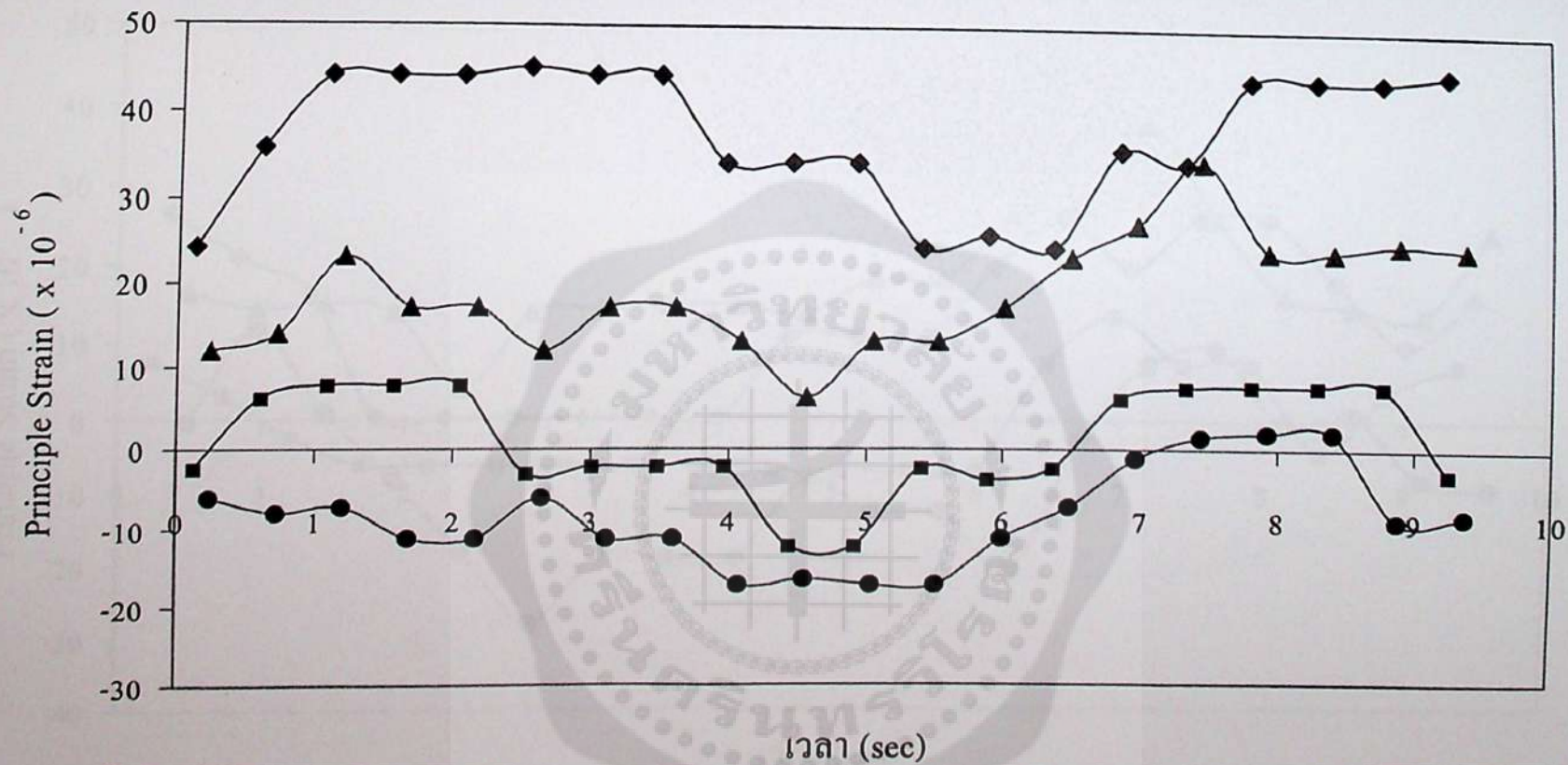
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



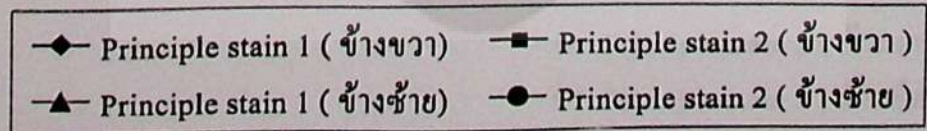
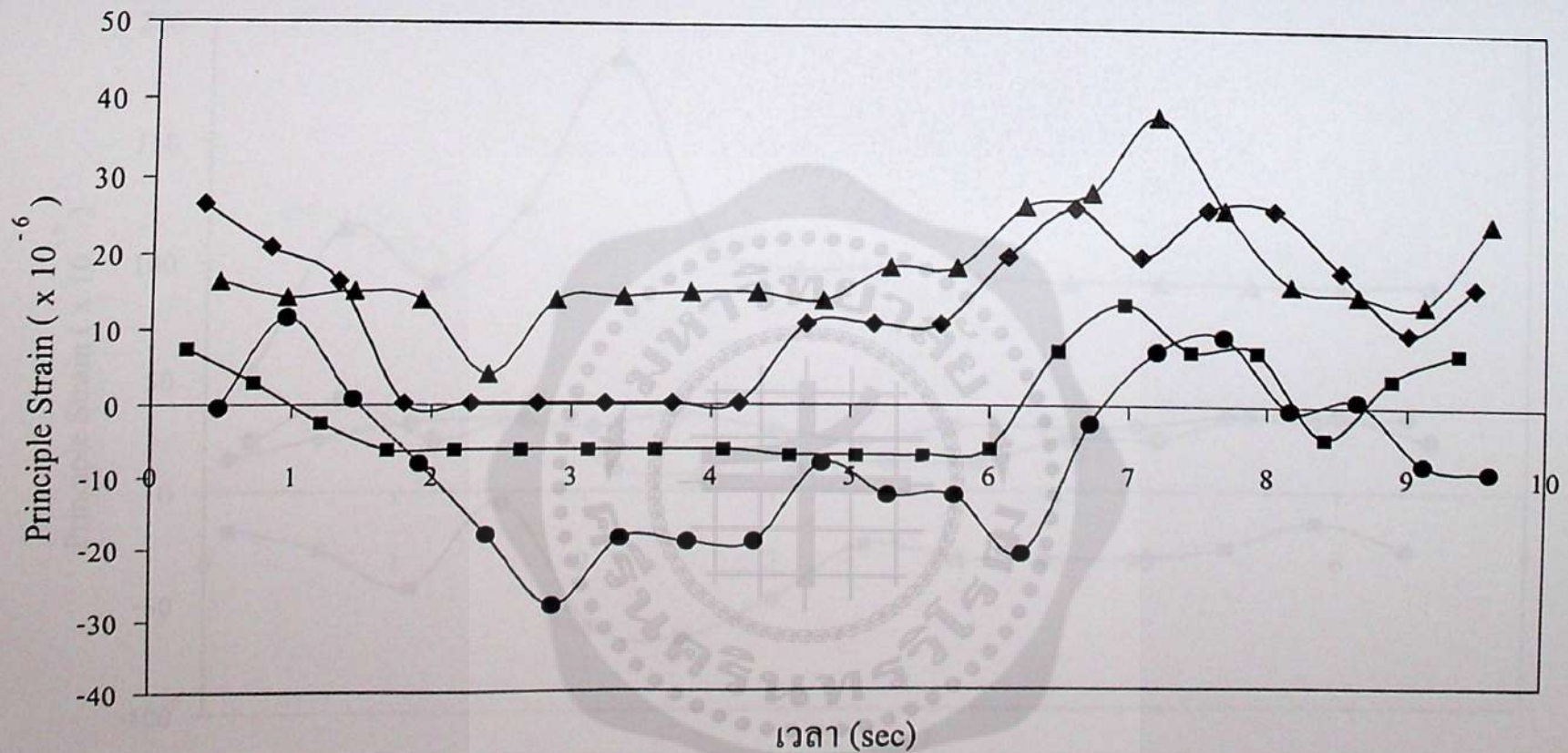
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



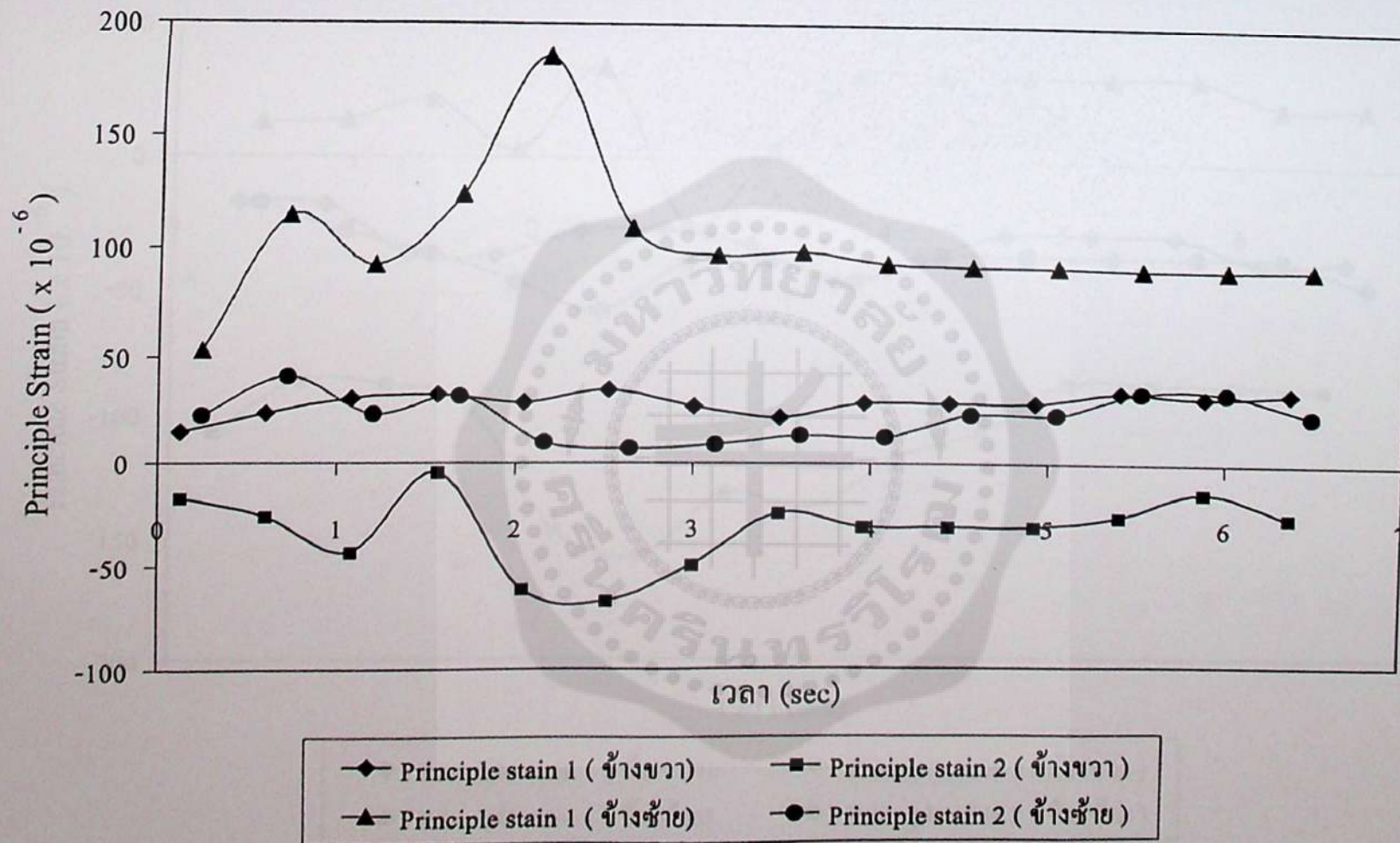
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



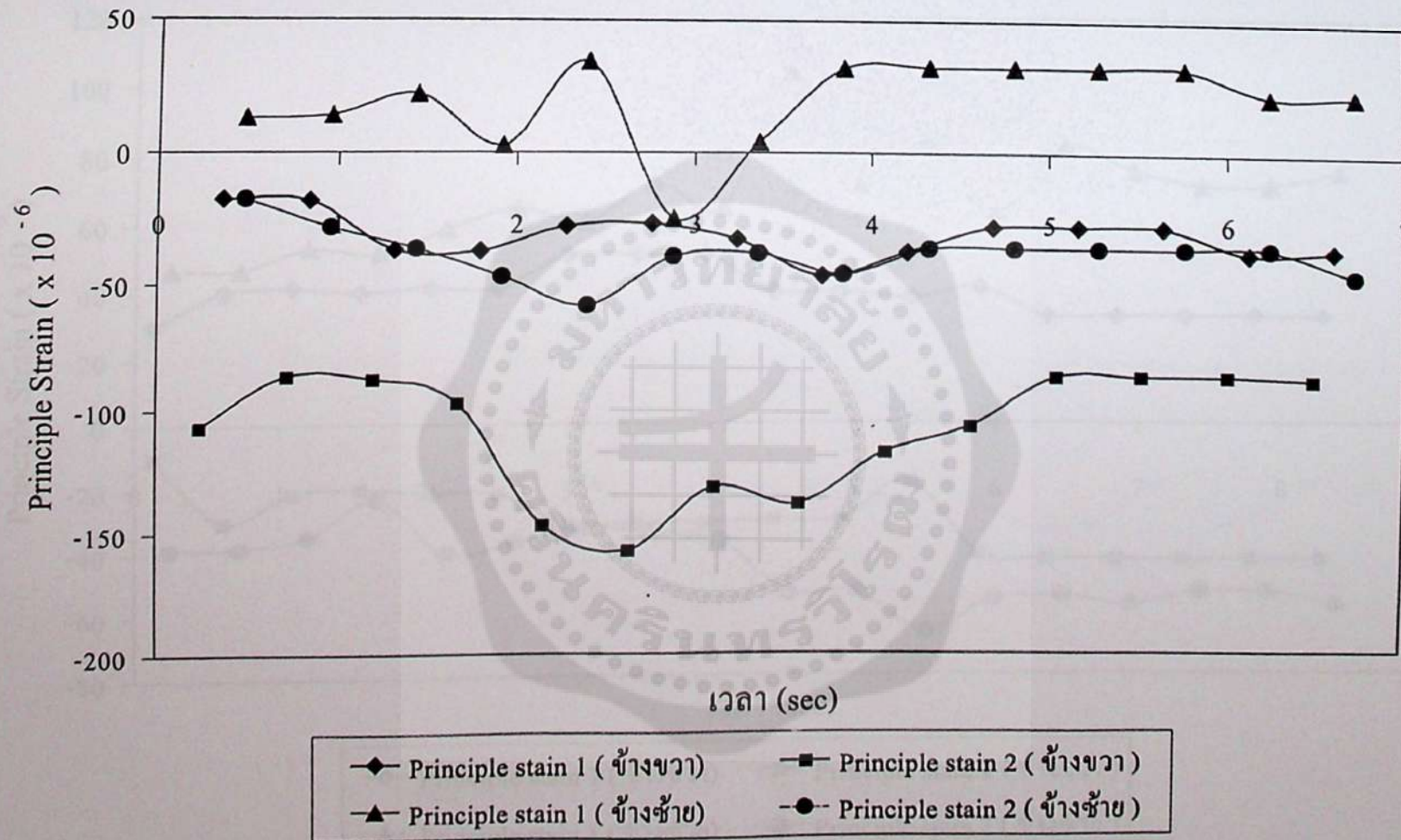
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชนิดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



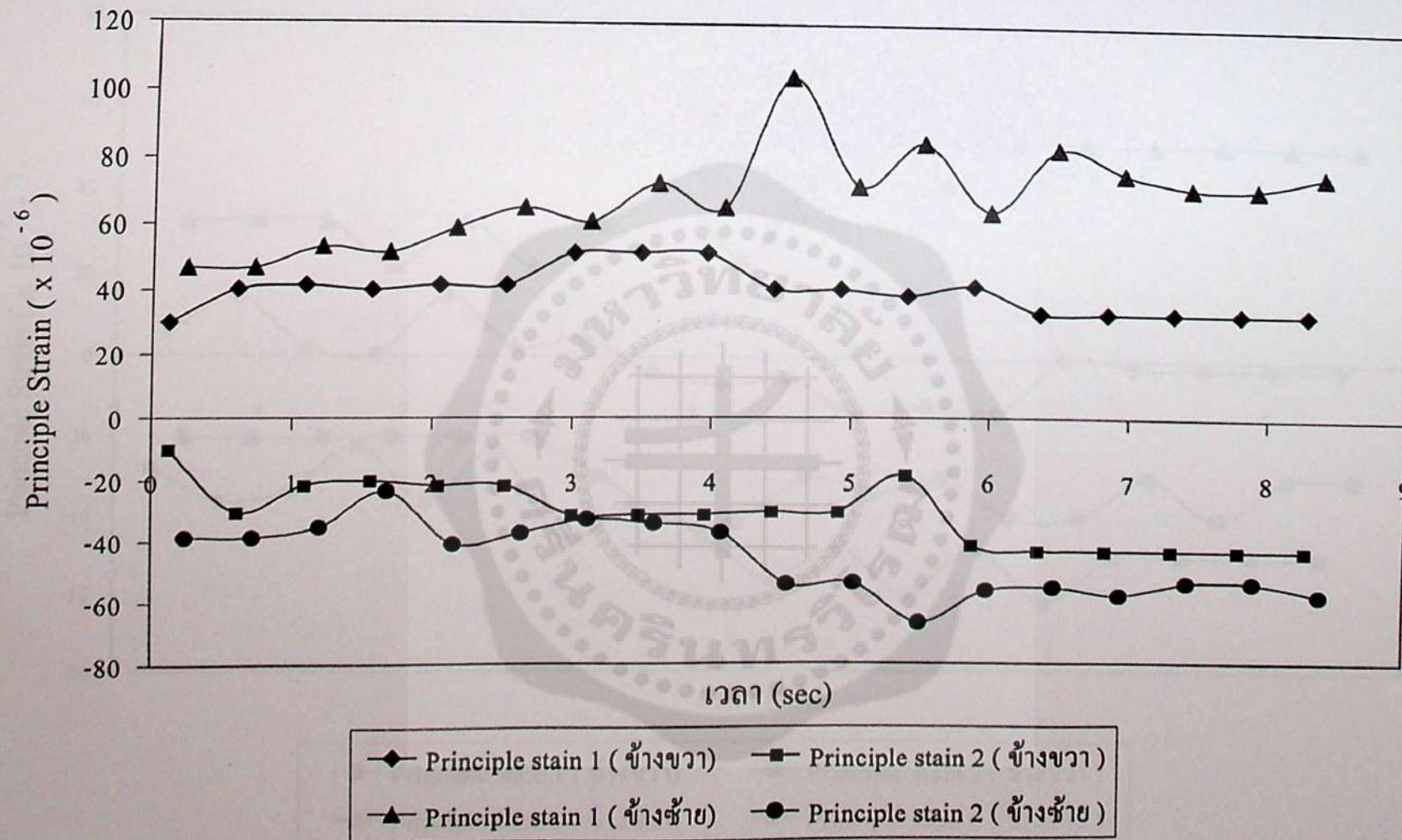
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



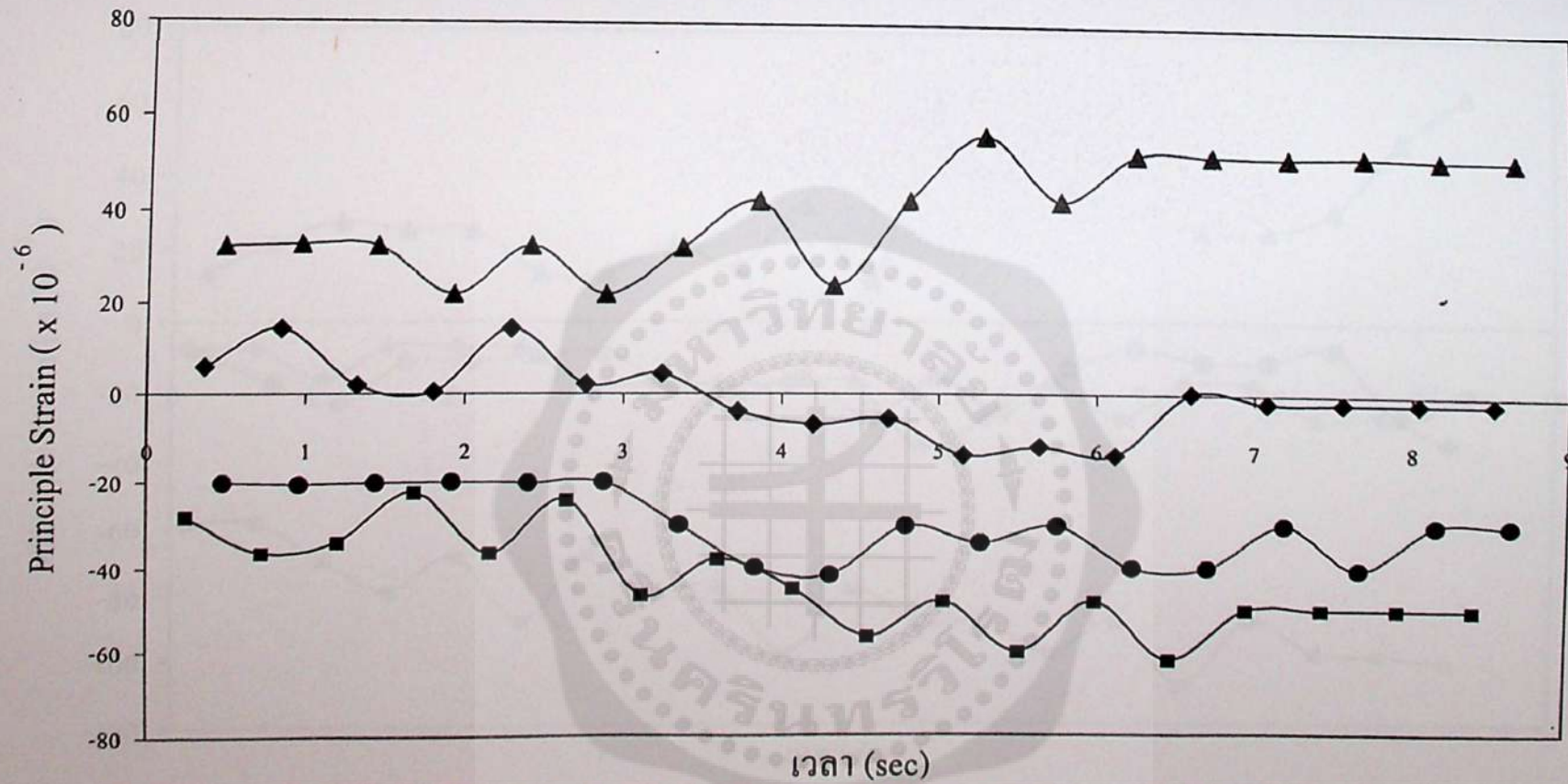
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง

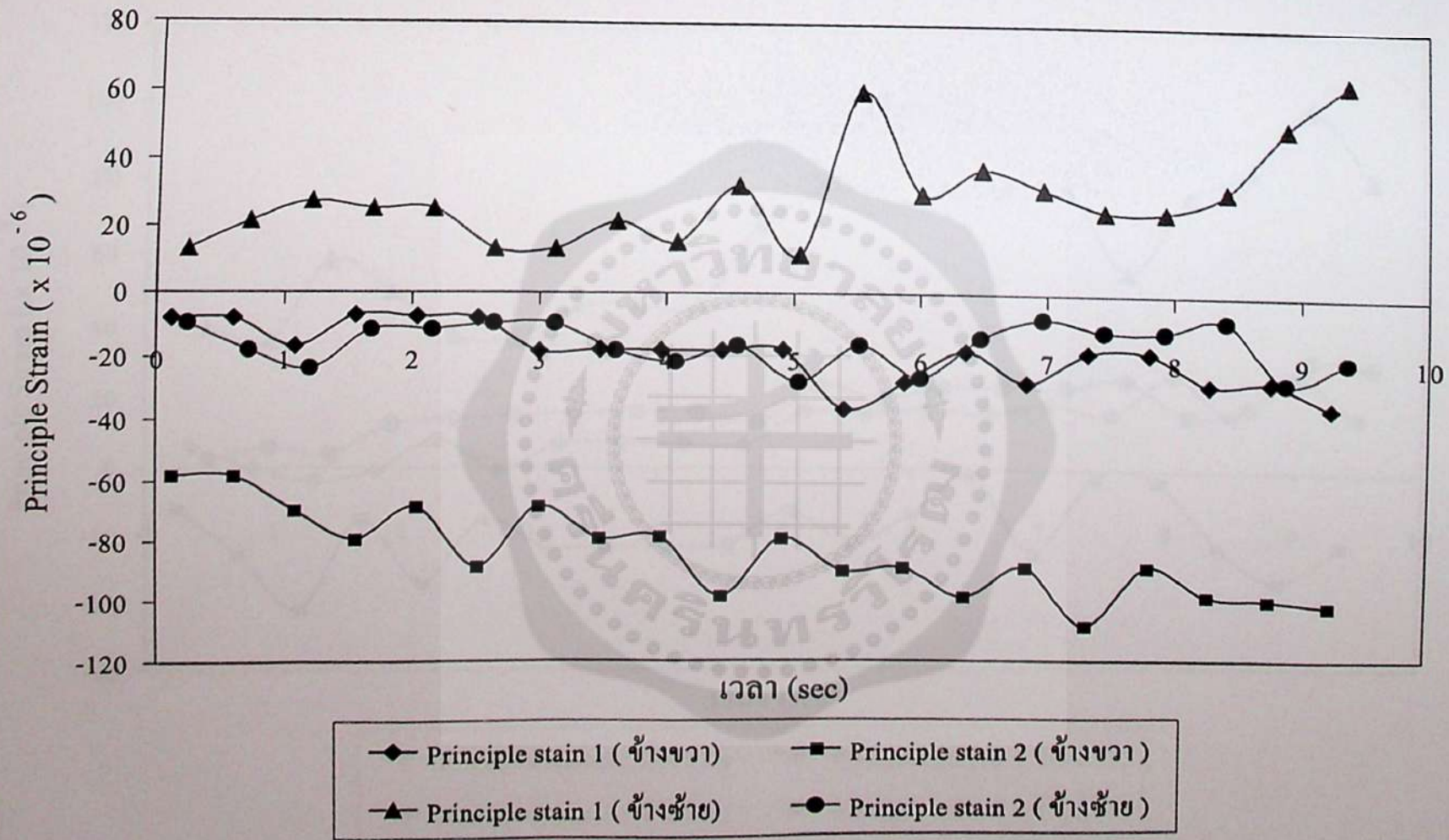


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน

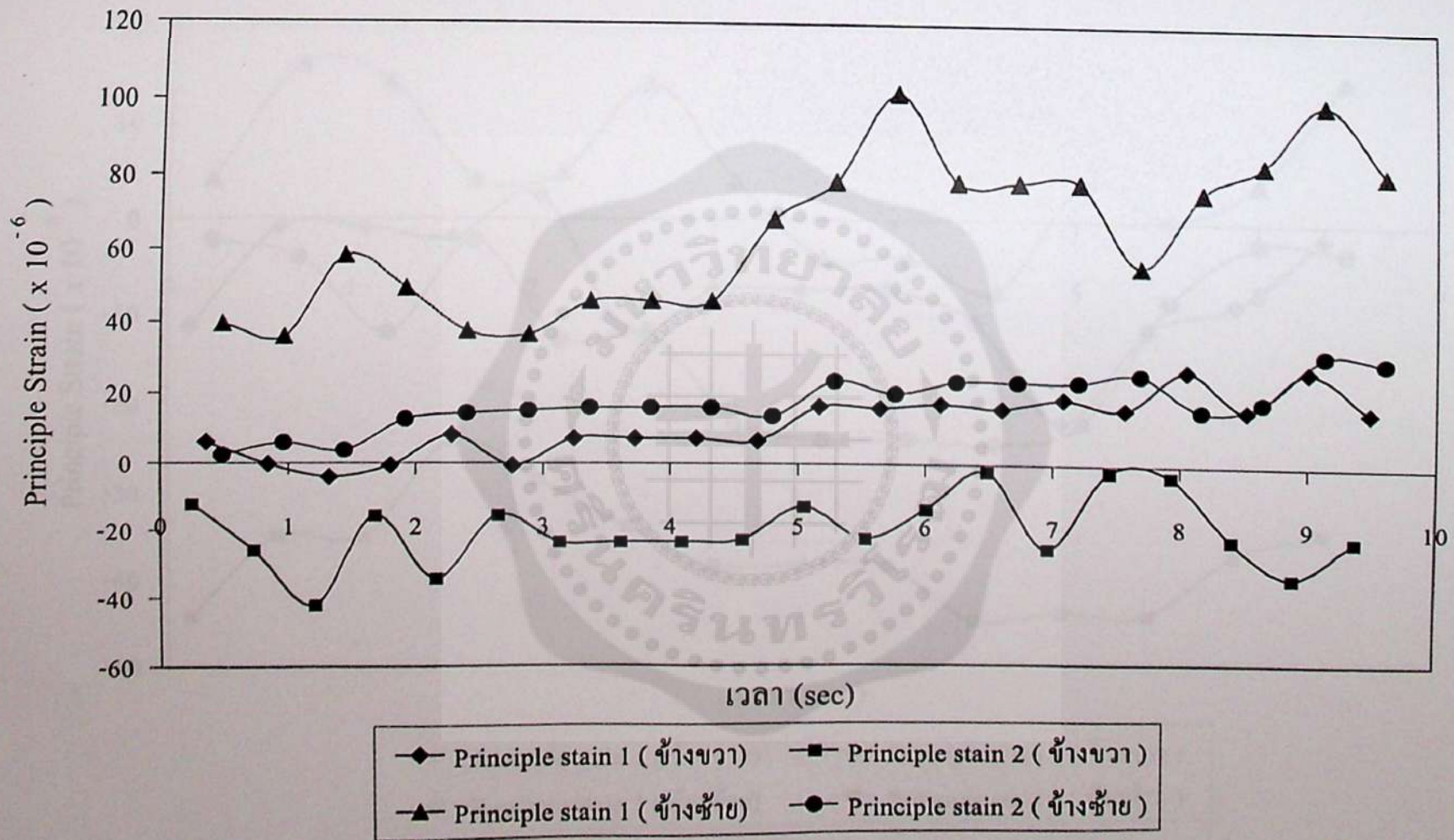


- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ◆ Principle stain 1 (ข้างขวา) | ■ Principle stain 2 (ข้างขวา) |
| ▲ Principle stain 1 (ข้างซ้าย) | ● Principle stain 2 (ข้างซ้าย) |

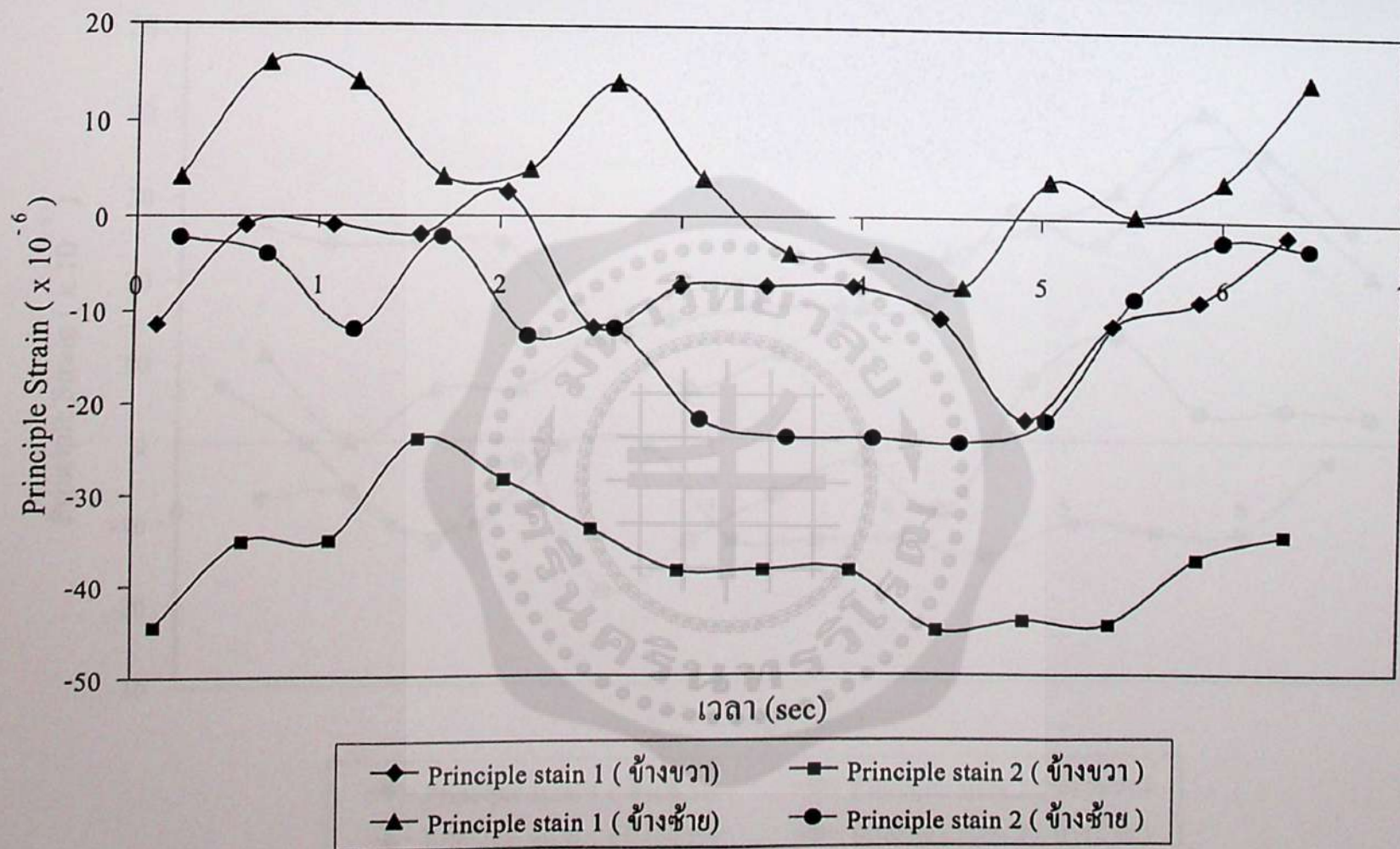
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



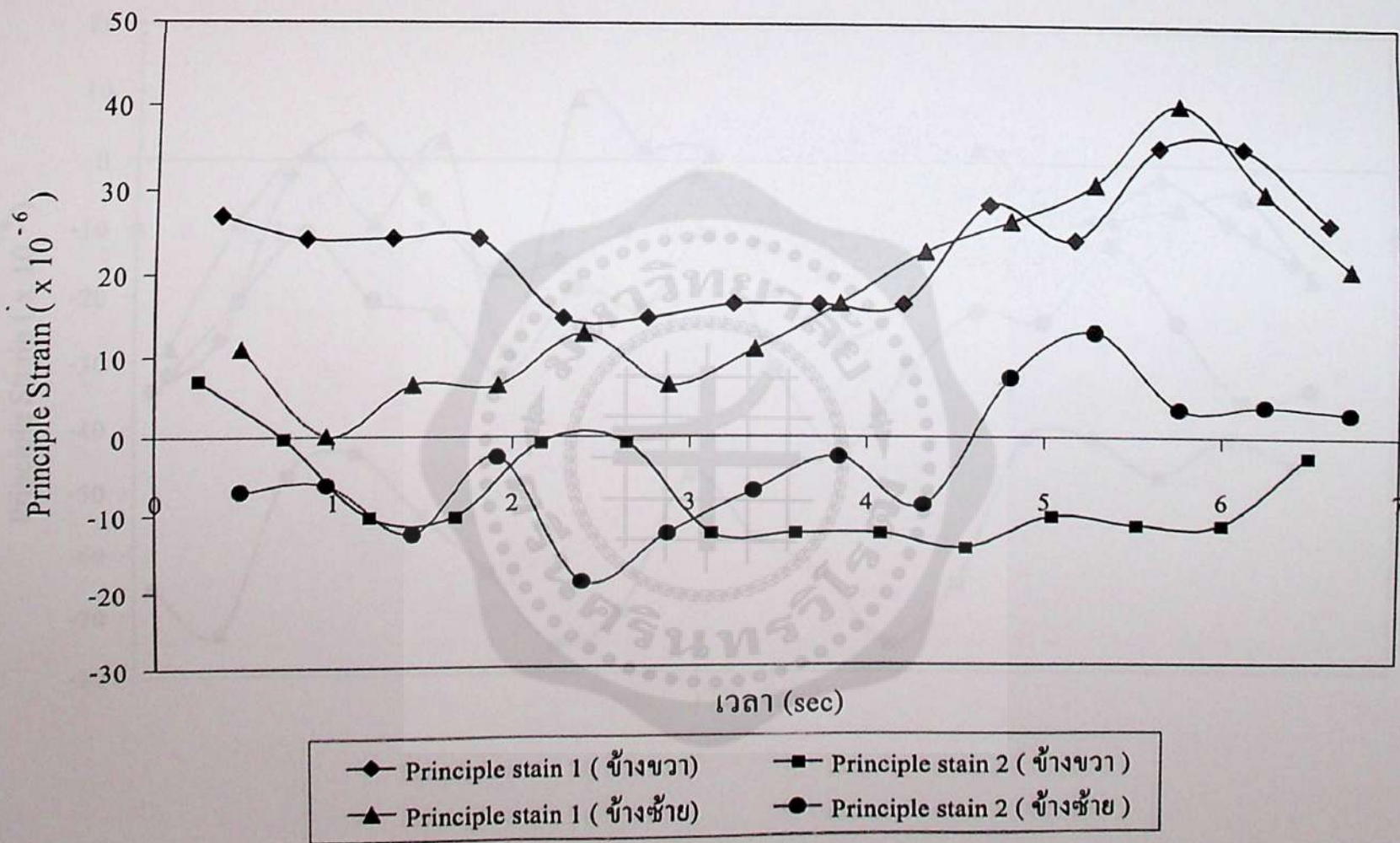
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นผิวด้านที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



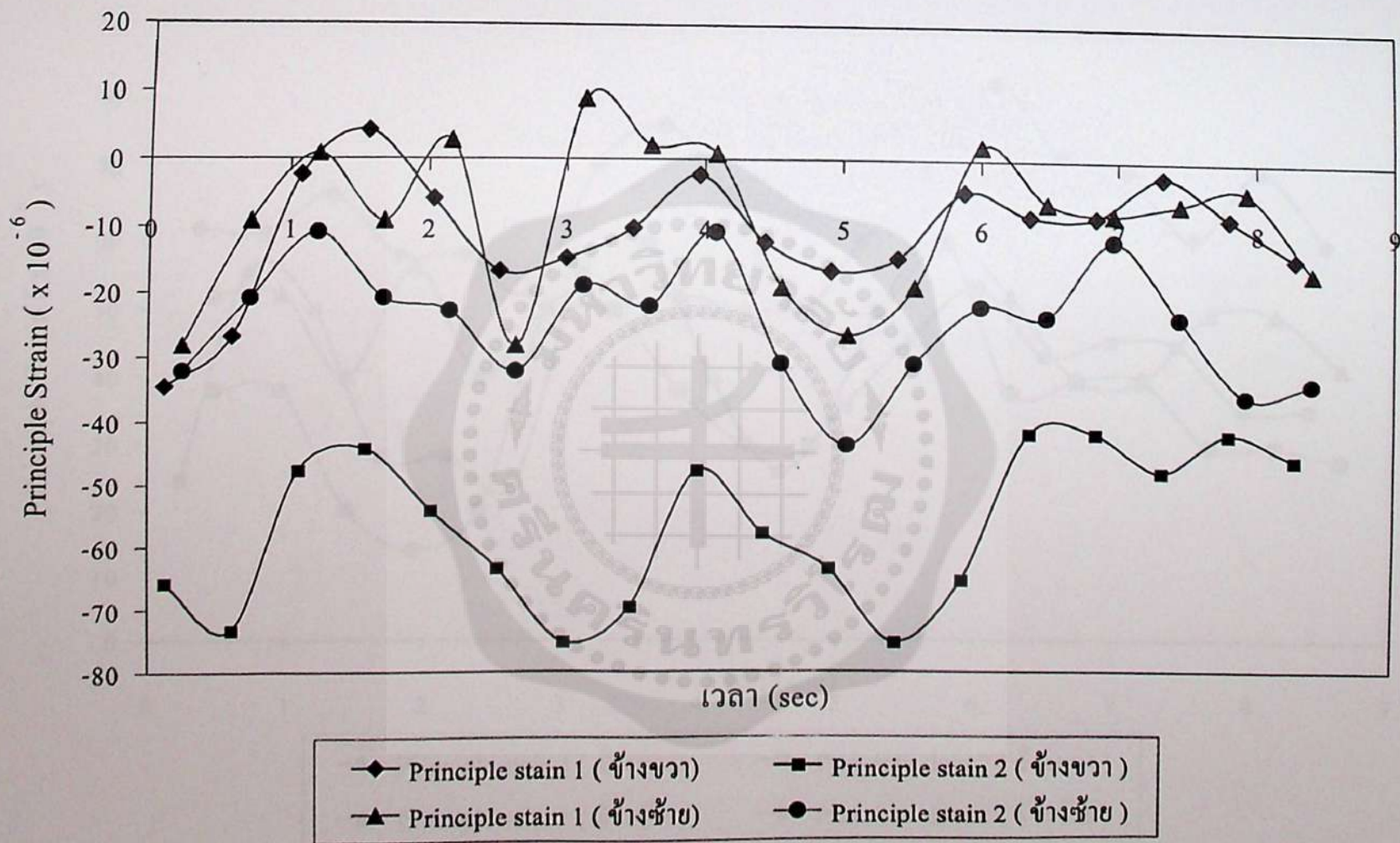
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



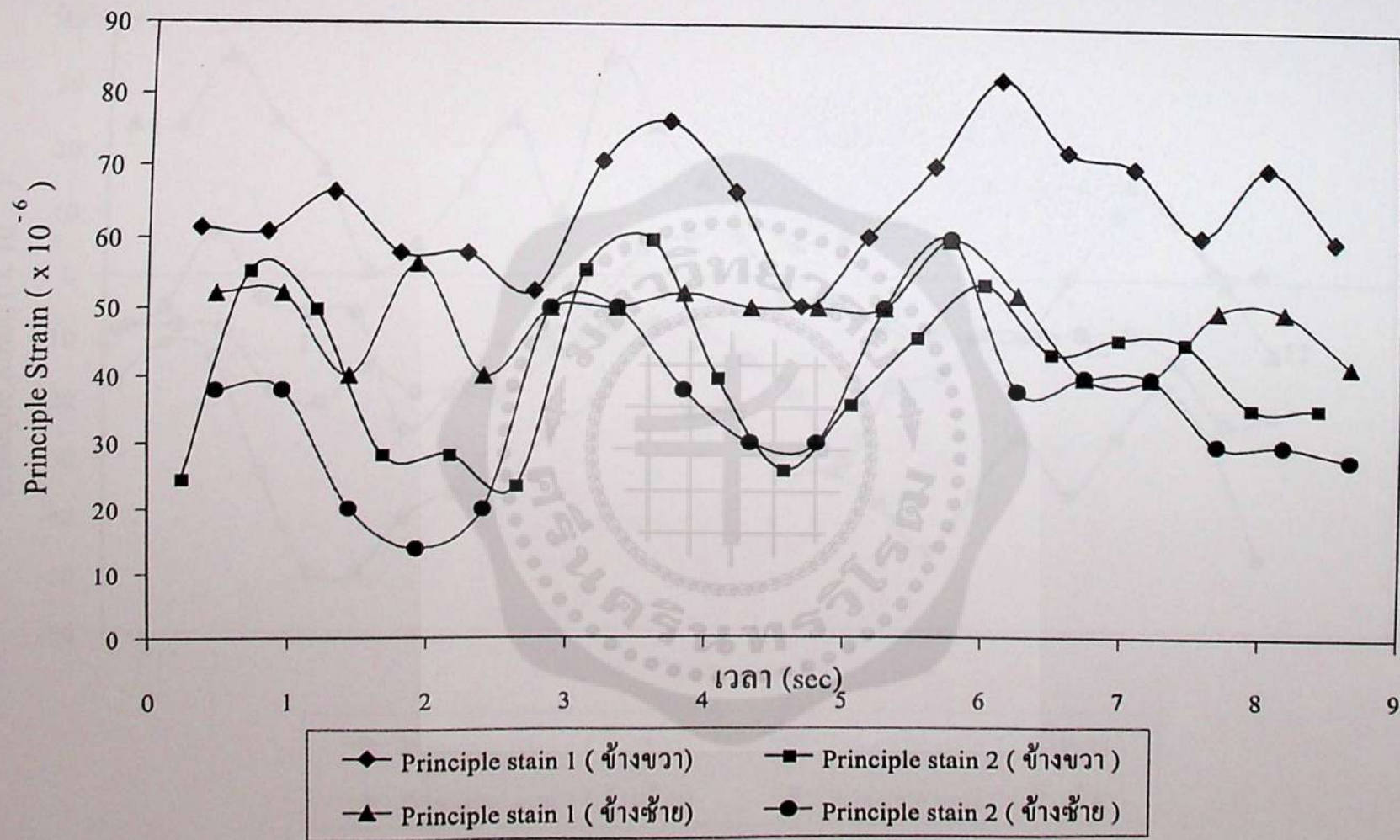
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



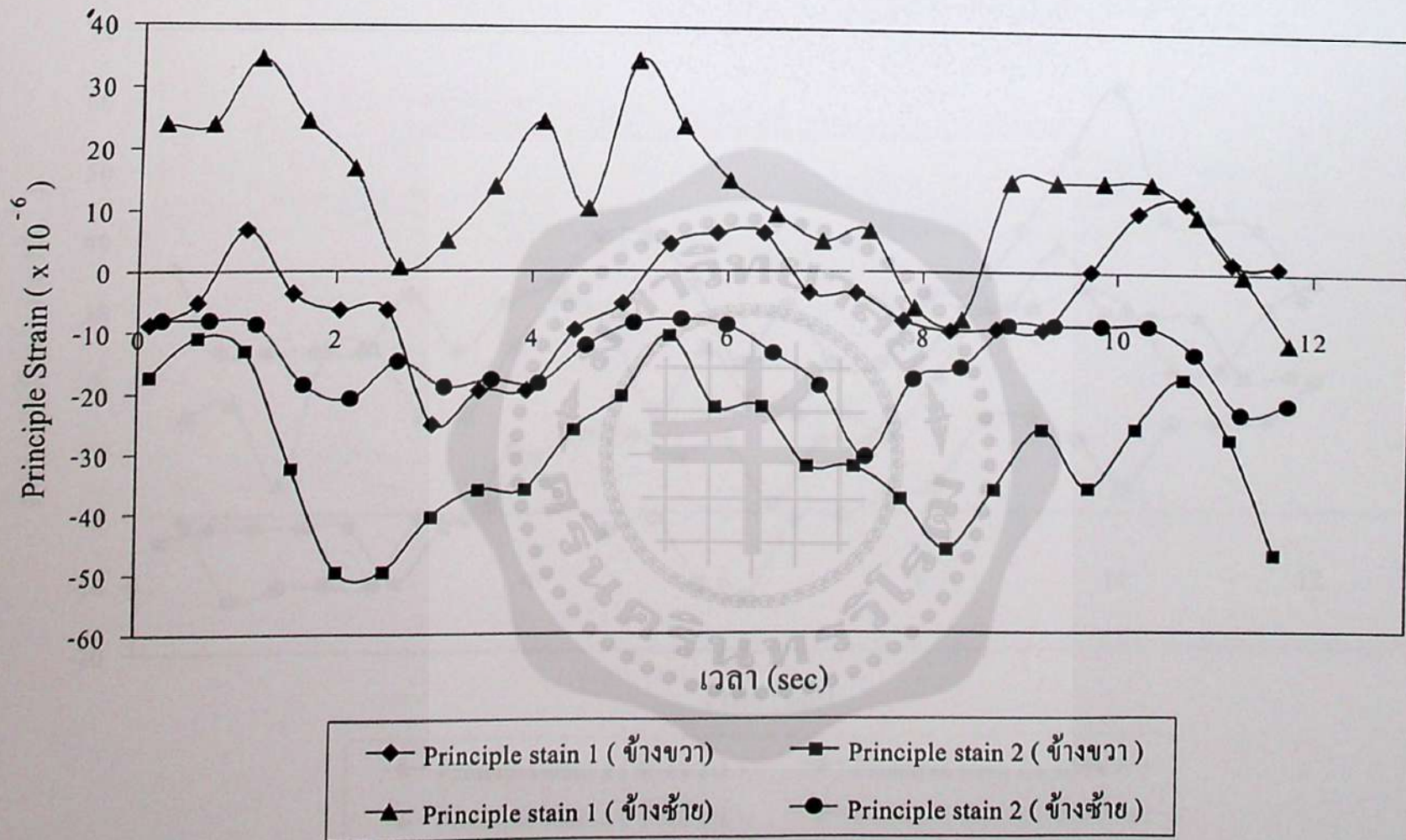
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 9 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



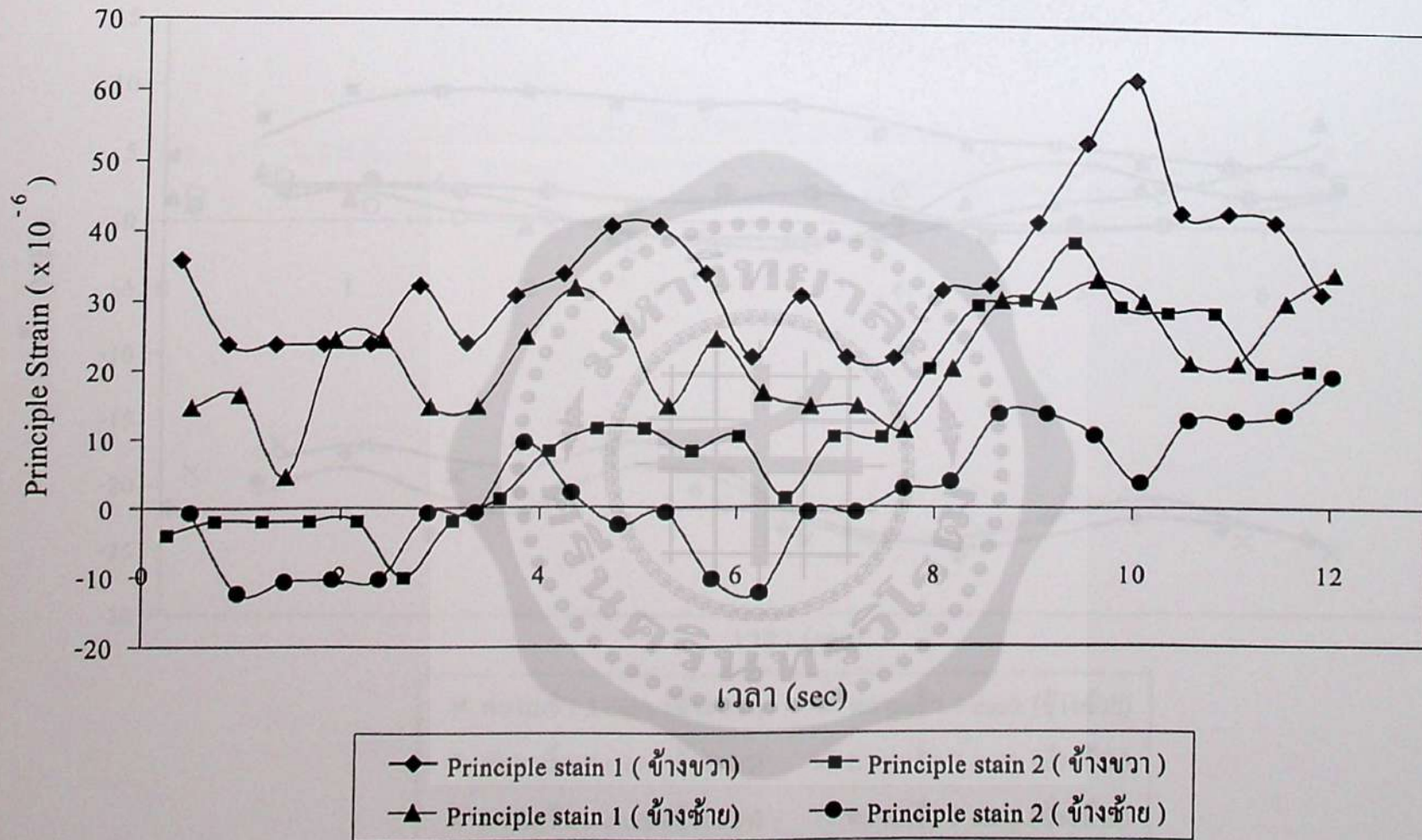
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นผิวนูนชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



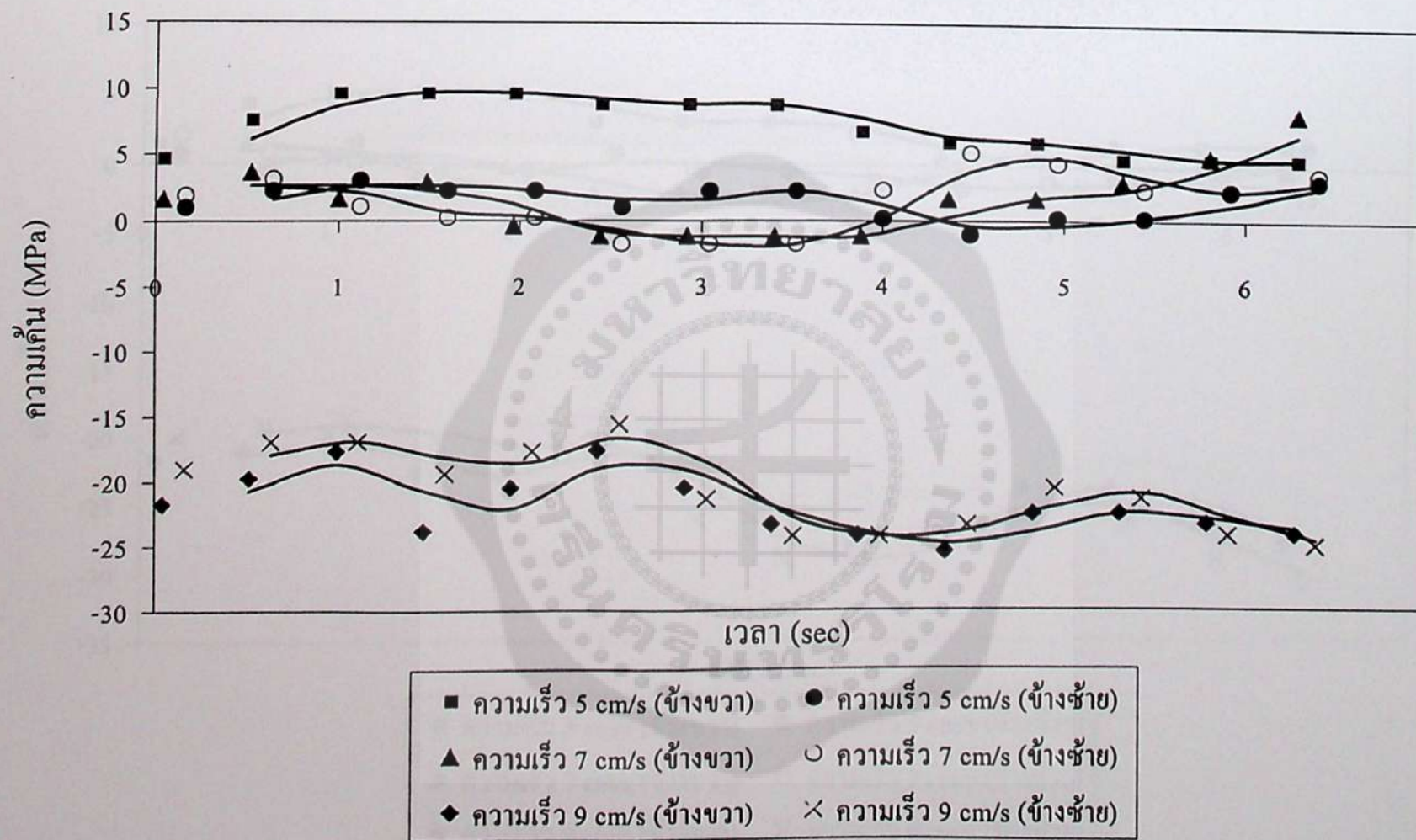
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 7 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



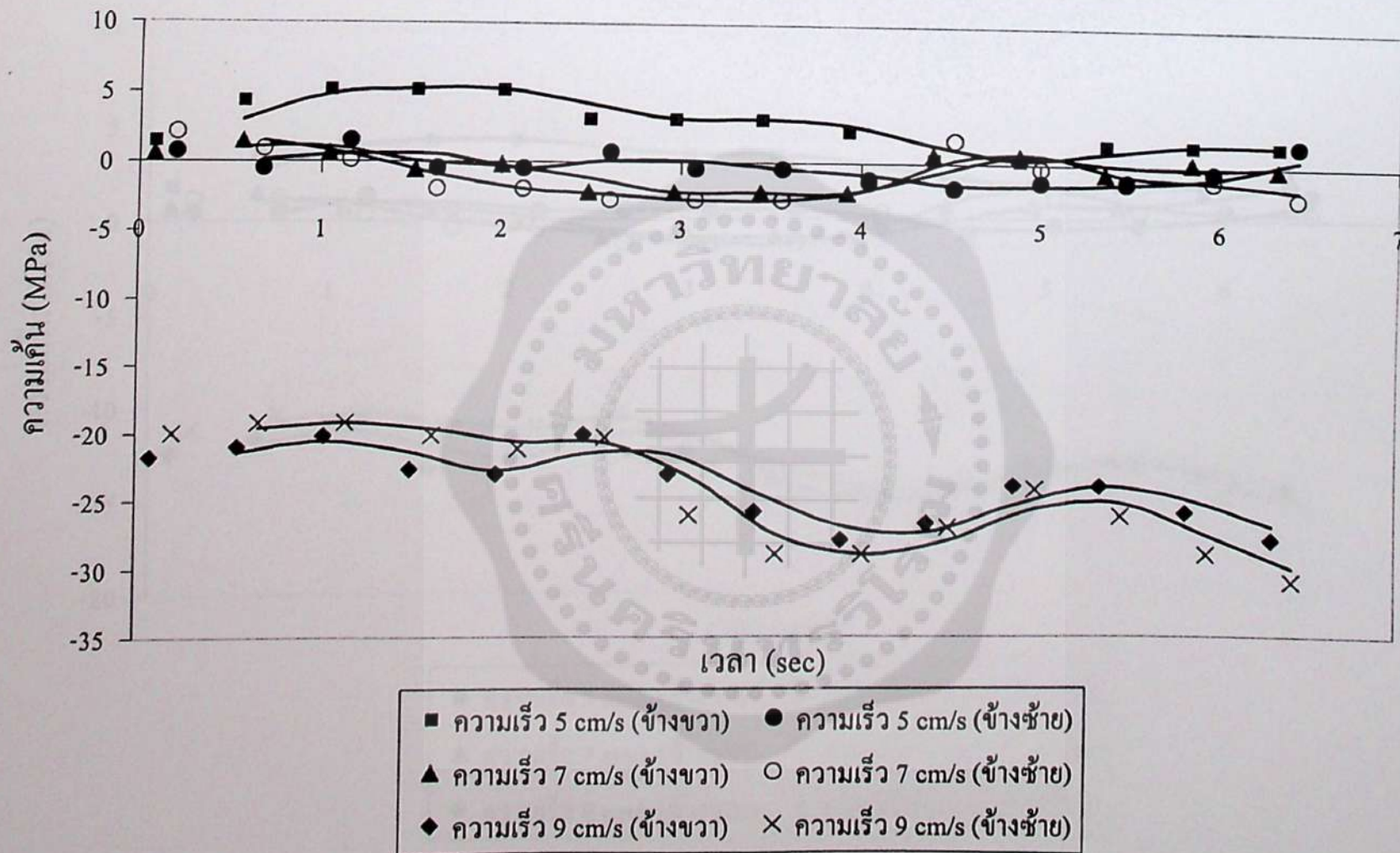
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านบน



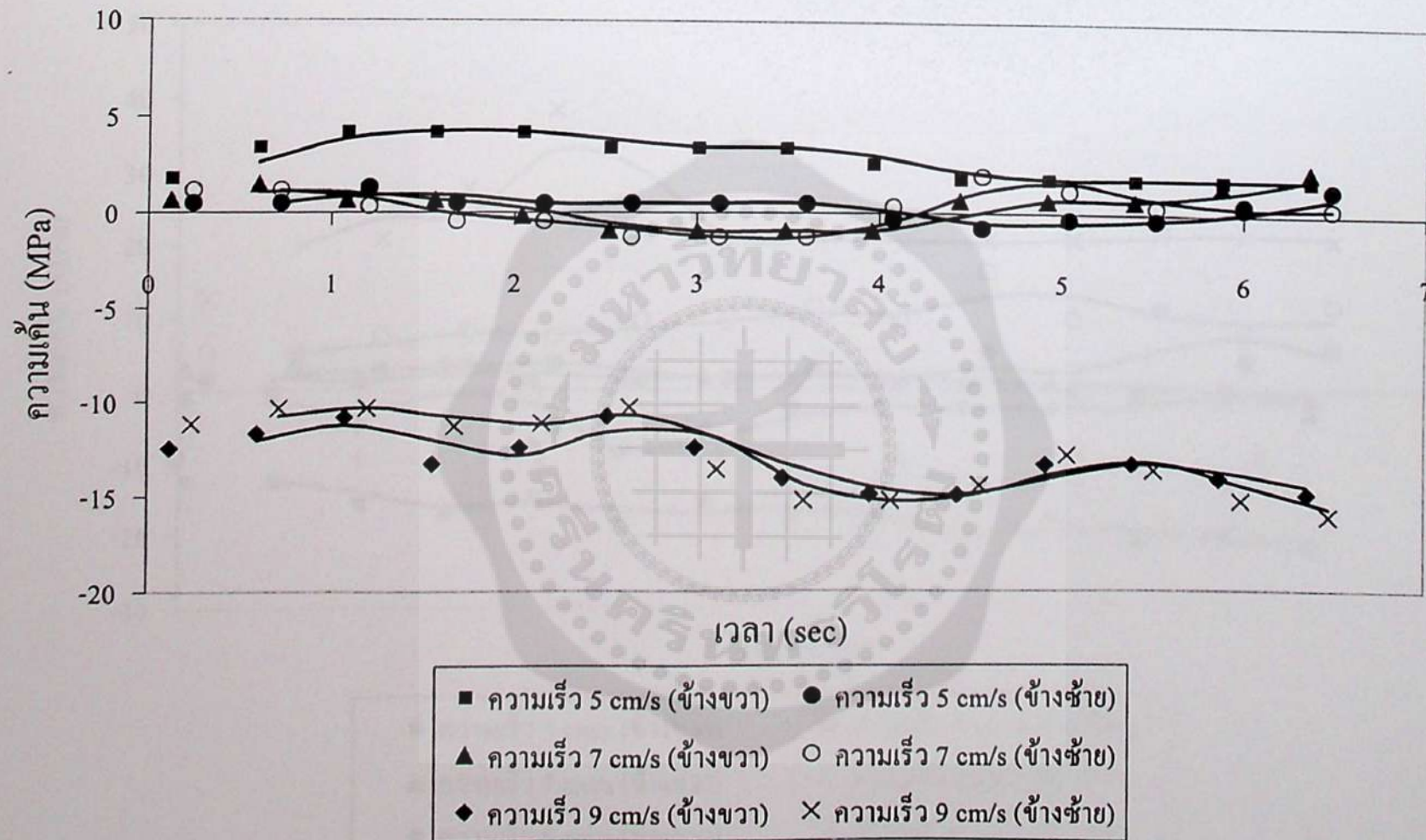
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Principle Strain กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็ว 5 cm/s ที่ความลึก 15 cm ที่ตำแหน่งด้านล่าง



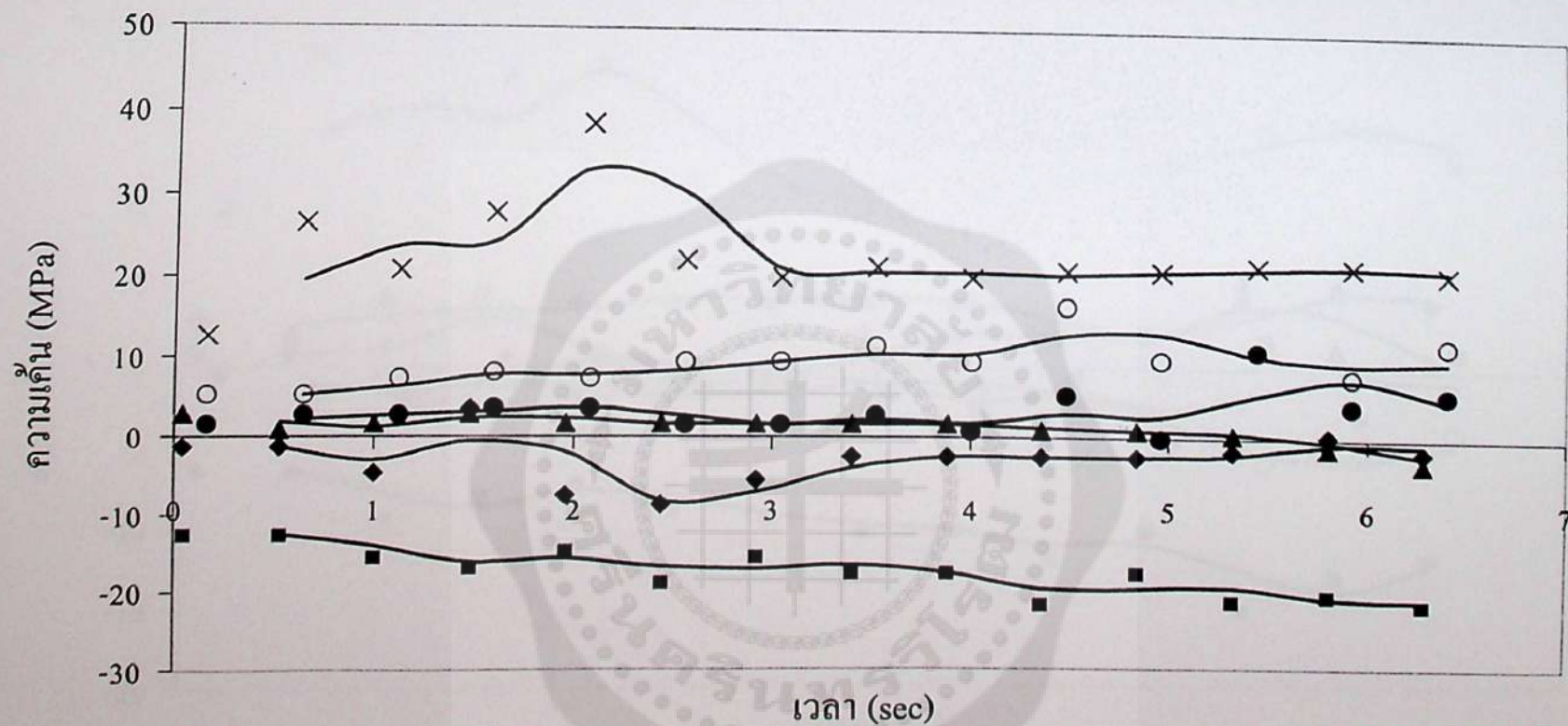
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 1 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm

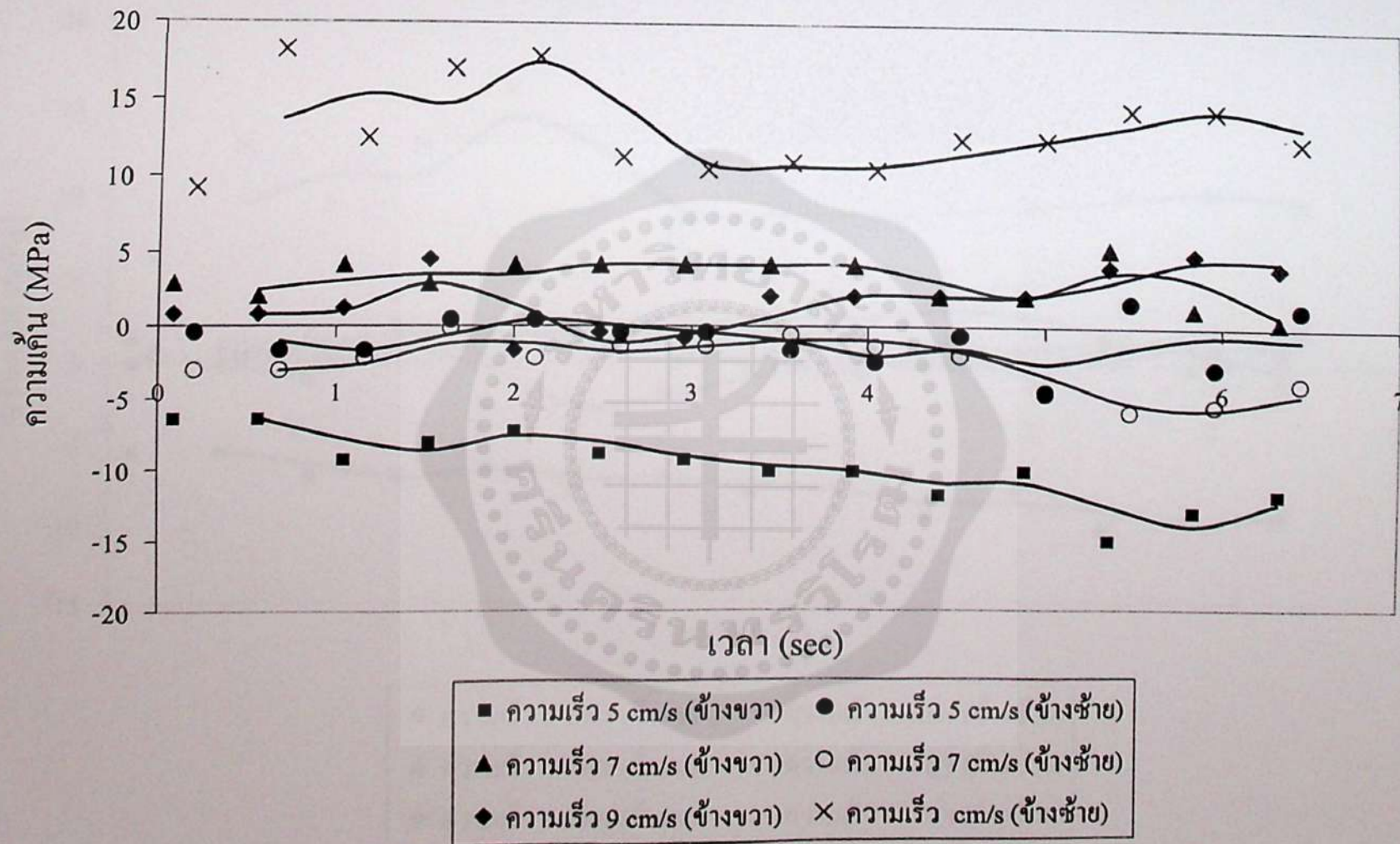


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นผิวด้านที่ 1 ที่ความเร็วต่างๆ ที่ความลึก 15 cm

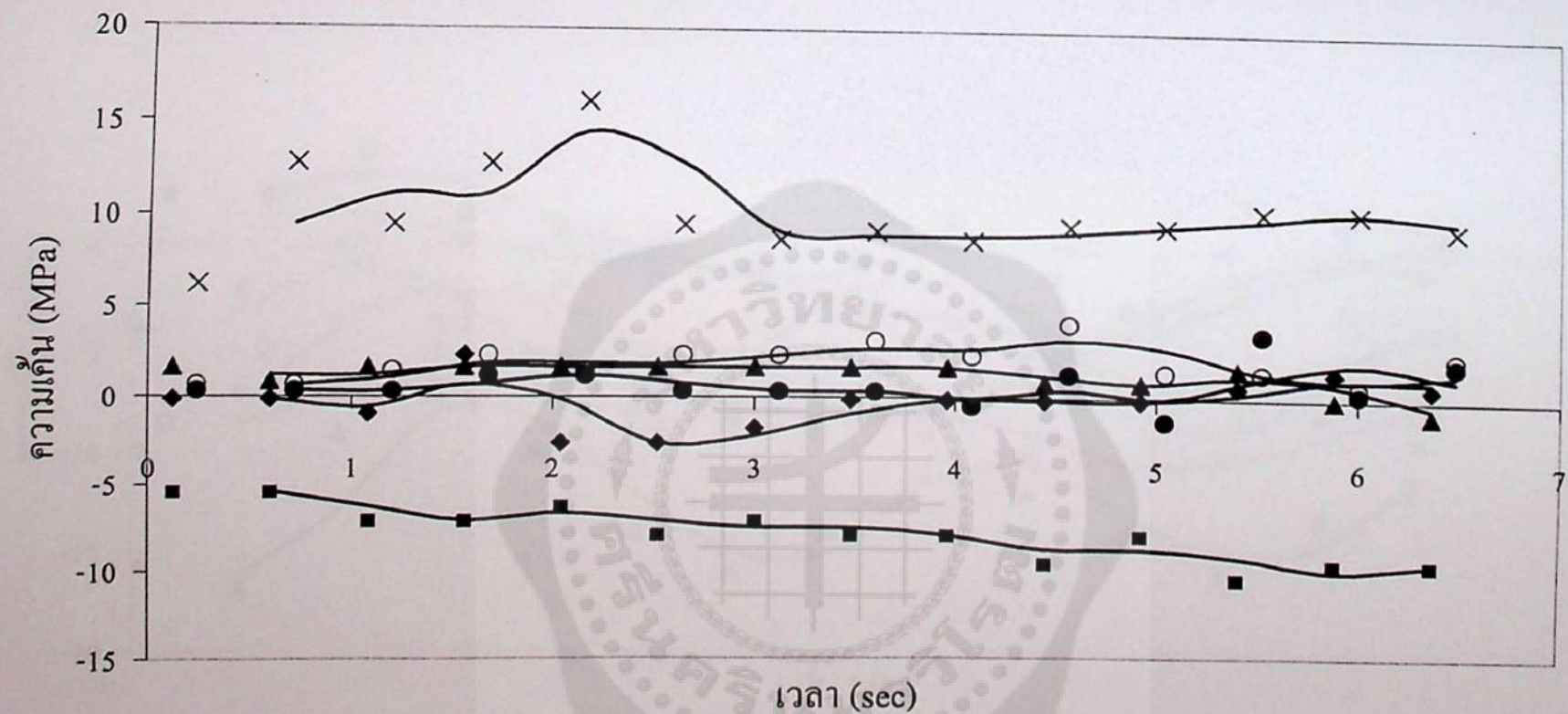


- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| ■ ความเร็ว 5 cm/s (ข้างขวา) | ● ความเร็ว 5 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ▲ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างขวา) | ○ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ◆ ความเร็ว 9 cm/s (ข้างขวา) | × ความเร็ว 9 cm/s (ข้างซ้าย) |

รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm

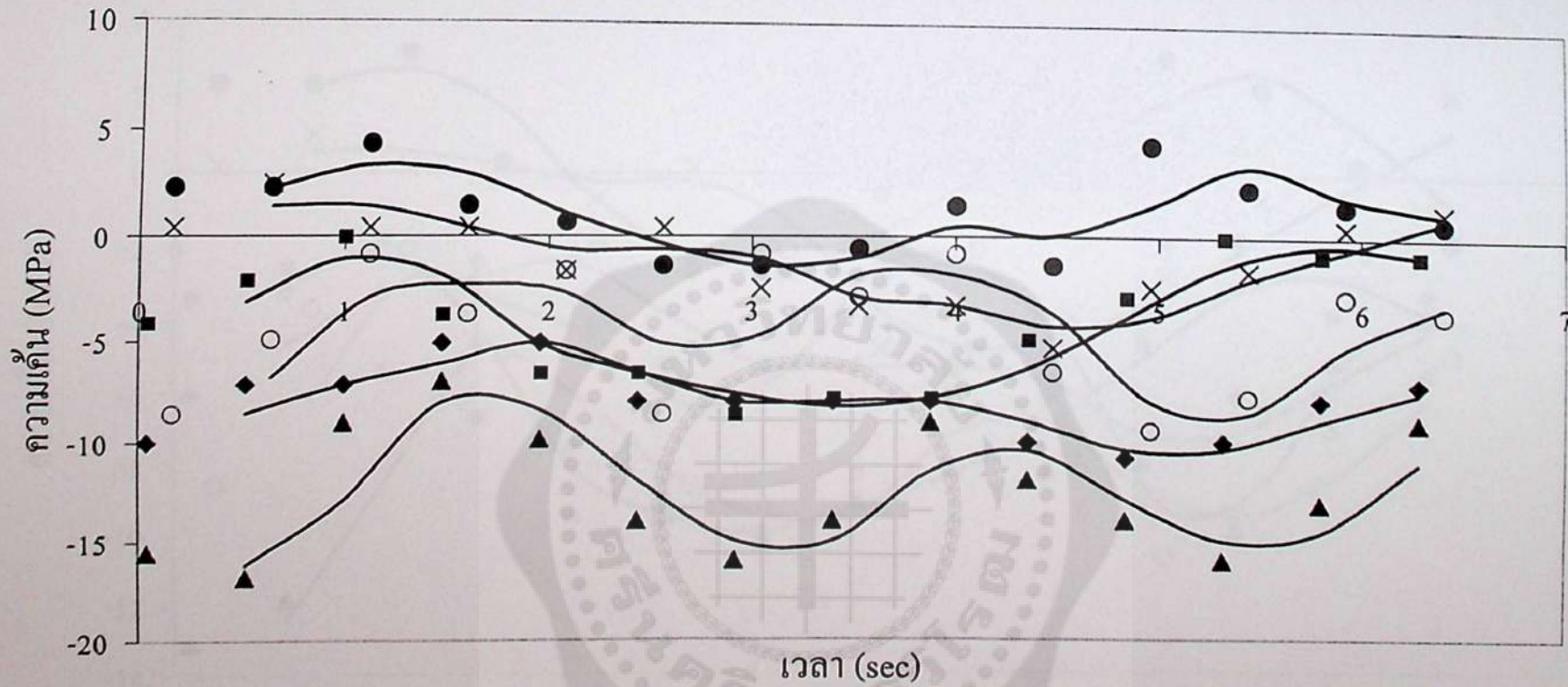


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นขูดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm



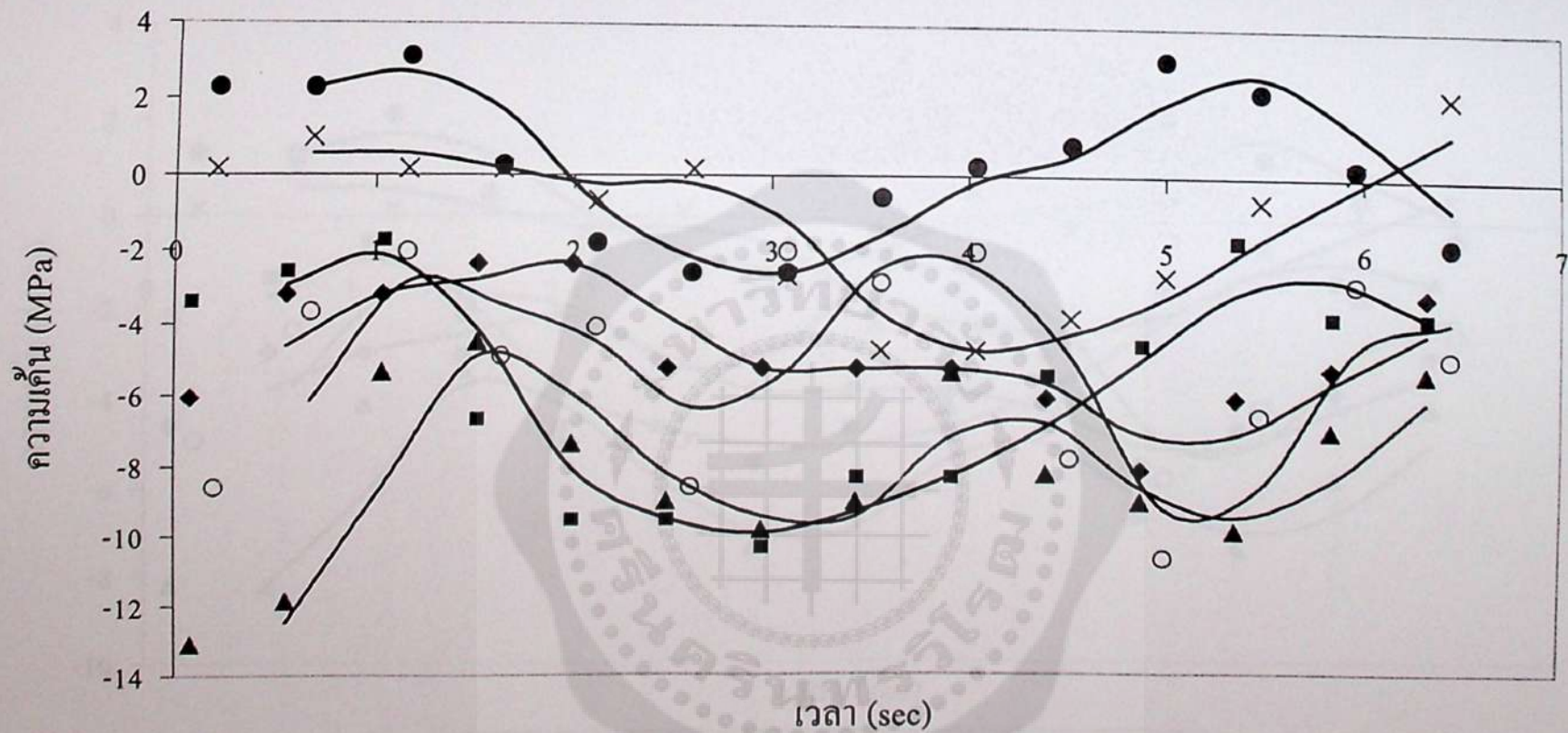
- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| ■ ความเร็ว 5 cm/s (ข้างขวา) | ● ความเร็ว 5 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ▲ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างขวา) | ○ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ◆ ความเร็ว 9 cm/s (ข้างขวา) | × ความเร็ว 9 cm/s (ข้างซ้าย) |

รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นชุดชนิดที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm

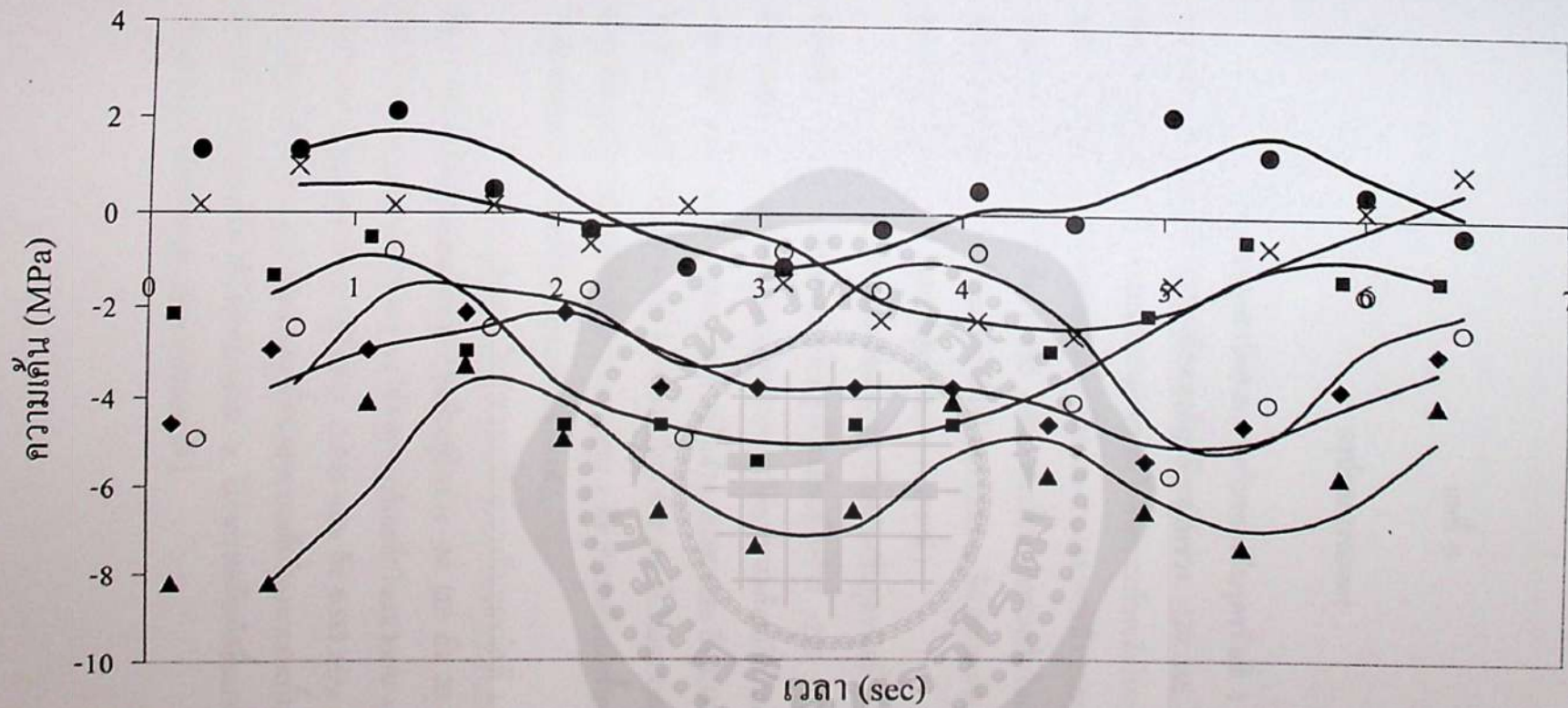


- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| ■ ความเร็ว 5 cm/s (ข้างขวา) | ● ความเร็ว 5 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ▲ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างขวา) | ○ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ◆ ความเร็ว 9 cm/s (ข้างขวา) | × ความเร็ว 9 cm/s (ข้างซ้าย) |

รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน x กับเวลา บนพื้นผิวด้านที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน y กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| ■ ความเร็ว 5 cm/s (ข้างขวา) | ● ความเร็ว 5 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ▲ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างขวา) | ○ ความเร็ว 7 cm/s (ข้างซ้าย) |
| ◆ ความเร็ว 9 cm/s (ข้างขวา) | × ความเร็ว 9 cm/s (ข้างซ้าย) |

รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในแนวแกน z กับเวลา บนพื้นจุดชนิดที่ 3 ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ความลึก 15 cm

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองวัดค่าความเครียดของฟันทุขชนิดที่ 1 จะพบว่าที่ความเร็ว 9 cm/s ความลึก 15 cm จะมีค่าความเครียดสูงที่สุดคืออยู่ในช่วง $-120 \mu\text{E}$ ถึง $130 \mu\text{E}$ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเค้นตามแนวแกนต่างๆ จะได้ค่าความเค้นเฉลี่ยในแนวแกน x อยู่ในช่วง -21.034 MPa ถึง 27.595 MPa ในแนวแกน y อยู่ในช่วง -24.444 MPa ถึง 25.047 MPa และในแนวแกน z อยู่ในช่วง -13.007 MPa ถึง 15.055 MPa และเมื่อนำค่าความเค้นในแนวแกนทั้งสามมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับเวลา จะสังเกตเห็นได้ว่าในแนวแกน x มีค่าความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดแสดงว่ามีแรงกระทำในแนวแกน x นี้มากที่สุด (ดังแสดงในกราฟ)

2. จากการทดลองวัดค่าความเครียดของฟันทุขชนิดที่ 2 จะพบว่าที่ความเร็ว 9 cm/s ความลึก 15 cm จะมีค่าความเครียดสูงที่สุดคืออยู่ในช่วง $-150 \mu\text{E}$ ถึง $200 \mu\text{E}$ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเค้นตามแนวแกนต่างๆ จะได้ค่าความเค้นเฉลี่ยในแนวแกน x อยู่ในช่วง 0.816 MPa ถึง 12.977 MPa ในแนวแกน y อยู่ในช่วง -6.260 MPa ถึง 4.337 MPa และในแนวแกน z อยู่ในช่วง -1.557 MPa ถึง 4.952 MPa และเมื่อนำค่าความเค้นในแนวแกนทั้งสามมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับเวลา จะสังเกตเห็นได้ว่าในแนวแกน x มีค่าความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดแสดงว่ามีแรงกระทำในแนวแกน x นี้มากที่สุด (ดังแสดงในกราฟ)

3. จากการทดลองวัดค่าความเครียดของฟันทุขชนิดที่ 3 จะพบว่าที่ความเร็ว 9 cm/sec ลึก 15 cm จะมีค่าความเครียดสูงที่สุดคืออยู่ในช่วง $-30 \mu\text{E}$ ถึง $20 \mu\text{E}$ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเค้นตามแนวแกนต่างๆ จะได้ค่าความเค้นเฉลี่ยในแนวแกน x อยู่ในช่วง -2.277 MPa ถึง 3.322 MPa ในแนวแกน y อยู่ในช่วง -5.193 MPa ถึง 0.585 MPa และในแนวแกน z อยู่ในช่วง -2.136 MPa ถึง 1.235 MPa และเมื่อนำค่าความเค้นในแนวแกนทั้งสามมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับเวลา จะสังเกตเห็นได้ว่าในแนวแกน x มีค่าความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดแสดงว่ามีแรงกระทำในแนวแกน x นี้มากที่สุด (ดังแสดงในกราฟ)

4. จากการทดลองวัดค่าความเครียดในพินชุดทั้ง 3 แบบ

- พบว่าพินชุดแบบที่ 1 มีค่าความเครียดในทุก ๆ แกนเป็นกลางเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 2 และแบบที่ 3 นอกจากนี้ขนาดความกว้างของร่องดินเมื่อพินชุดแบบที่ 1 วิ่งผ่านยังมีค่าเป็นกลางอีกด้วยเมื่อเทียบกับพินชุดแบบที่ 2 และ 3 ซึ่งหากพิจารณาถึงลักษณะภายนอกแล้วจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงทั้งกับแบบที่ 2 และแบบที่ 3 แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะพินชุดแบบที่ 2 กับแบบที่ 3 จะเห็นว่ามีลักษณะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ทำให้พินชุดแบบที่ 1 นี้เสมือนเป็นจุดร่วมของลักษณะและข้อดี-ข้อเสียของอีกสองแบบเอาไว้

- พินชุดแบบที่ 2 มีค่าความเครียดเกิดขึ้นสูงกว่าแบบอื่นๆ ในทุกๆ แกนทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการเสียหายมากกว่าพินชุดอีก 2 แบบ แต่พินชุดแบบที่ 2 นี้มีความกว้างของใบชุดมากกว่าแบบอื่นๆ จึงทำให้ลักษณะของร่องดินซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของพินชุดแบบที่ 2 มีความกว้างมากกว่าอีก 2 แบบ

- พินชุดแบบที่ 3 มีค่าความเครียดเกิดขึ้นในทุกๆ แกนน้อยกว่าแบบอื่นๆ เนื่องเป็นผลมาจากรูปร่างที่ค่อนข้างเพรียว ลักษณะปีกที่แข็งแรงและแคบกว่าแบบอื่นๆ รวมทั้งมุมระหว่างสันของพินชุดกับพื้นดินในแนวราบมีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 จึงทำให้แรงอัดระหว่างพินชุดแบบที่ 3 มีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 แต่เนื่องจากรูปร่างลักษณะดังที่กล่าวนี้ทำให้ความกว้างของร่องมีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1 และแบบที่ 2

5. ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งซึ่งจะมองข้ามไปเสียมิได้คือ ค่าความชื้นของดิน เนื่องจากหากดินมีความชื้นสูงจะทำให้เกิดการอัดตัวแน่นทำให้มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของพินชุดสูง อาจทำให้เกิดการเสียหายกับพินชุดได้ ดังนั้นจากการทดลองจะพบว่าพินชุดที่สามารถทำงานได้ที่ความชื้นของดินเท่ากับแบบอื่นแต่เกิดค่าความเครียดน้อยกว่าทำให้เกิดการเสียหายน้อยกว่า จะเหมาะสมที่จะใช้งานในสภาพที่ดินชื้นและมีความแข็งมากๆ ซึ่งนั่นก็คือพินชุดแบบที่ 3 นั่นเอง ในแบบที่ 2 จะเหมาะสมที่จะใช้ในพื้นที่ที่มีความแข็งไม่มากนักและต้องการความกว้างของร่องดินสูง ส่วนในแบบที่ 1 นั้นดังที่ได้กล่าวแล้วว่าลักษณะเสมือนแบบที่ 2 และ 3 รวมกัน ดังนั้นพินชุดแบบที่ 1 จึงสามารถที่จะใช้ได้ในพื้นที่ที่มีความแข็งมากกว่าแบบ 2 แต่ไม่สามารถใช้ในพื้นที่แข็งเท่าแบบที่ 3 ได้ ในทำนองเดียวกัน ความกว้างของร่องดินของแบบที่ 1 ก็มีค่าต่ำกว่าความกว้างร่องดินของแบบที่ 2 และมีค่าสูงกว่าแบบที่ 3

ตารางที่ 5.1 ข้อดีข้อเสียของพันธุ์แต่ละชนิด และลักษณะการใช้งาน โดยเรียงตามลำดับความ
แข็งแรงของพันธุ์

ชนิดของพันธุ์	ข้อดี	ข้อเสีย	ลักษณะการใช้งาน
ชนิดที่ 3	มีความแข็งแรงมากที่สุด โอกาสชำรุดเสียหาย น้อย	ให้ร่องดินแคบกว่าชนิด อื่น	ใช้ในดินที่มีความแข็ง มาก และมีความชื้นมาก หรือใช้ในการเปิดหน้า ดินครั้งแรก
ชนิดที่ 1	มีความแข็งแรงมากกว่า ชนิดที่ 2 มีความกว้าง ของร่องดินมากกว่าชนิด ที่ 3	มีความแข็งแรงน้อยกว่า ชนิดที่ 3 และมีความ กว้างของร่องดินน้อย กว่าชนิดที่ 2	ใช้ในดินที่มีความแข็ง ปานกลาง มีค่าความชื้น ปานกลางหรือใช้ในการ พรวนดินครั้งที่ 2
ชนิดที่ 2	มีความกว้างของร่องดิน มากที่สุด	มีความแข็งแรงน้อยที่ สุด โอกาสชำรุดเสียหาย สูง	ใช้ในดินที่มีความชื้นต่ำ ดินที่ร่วนซุยหรือใช้ใน การพรวนดินครั้งสุดท้าย ก่อนการเพาะปลูก

บรรณานุกรม

1. สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, กลศาสตร์ของแข็ง. ซีเอ็ดดูเคชั่น
2. บรรจบ ศรีพญา, ภาณุ ศรีมรินทร์, ภาณุ โรจน์ภัทรสุข, วัณกิจ มะลิทอง, การวัดแรงด้วยสเตรนเกจ. โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2539
3. ประชุม เนตรสืบสาย, พันทิพา อันทิวโรทัย. เครื่องท่อนแรงฟาร์มภาค 1. ปทุมธานี : ศูนย์ฝึกอบรมวิศวกรรมเกษตร, 2526
4. ปรีทรรณีย์ พันธบุรุษย์, บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมยศ ศรีสถิตย์, การทดสอบแบบไม่ทำลาย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
5. ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์, ปานเพชร ชินินทร, ไฮดรอลิกส์อุตสาหกรรม. ซีเอ็ดดูเคชั่น
6. ประพันธ์ศักดิ์ ชิบเข, พิสิฐ พัฒนพิบูลย์พงษ์, อริวรรดิ สามิ, รณยก. โครงการวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2539
7. Peng, H. J. (1993). Effects of speed and aspect ratio on soil reactions caused by vertical tines in Bangkok clay soil. B. Eng. Thesis (unpublished). Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
8. Pathak, B. K. (1991). Effect of aspect ratio on soil-tine interactions at low speed in dry sand. M. Eng. Thesis (unpublished). Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
9. Richard S. Figliola, Donald E. Beasley. Theory and design for mechanical measurements. John Wiley & Sons, Inc. (1995)
10. Gere, Timoshenko. Mechanics of Materials. PWS Publishing Company. (1997)





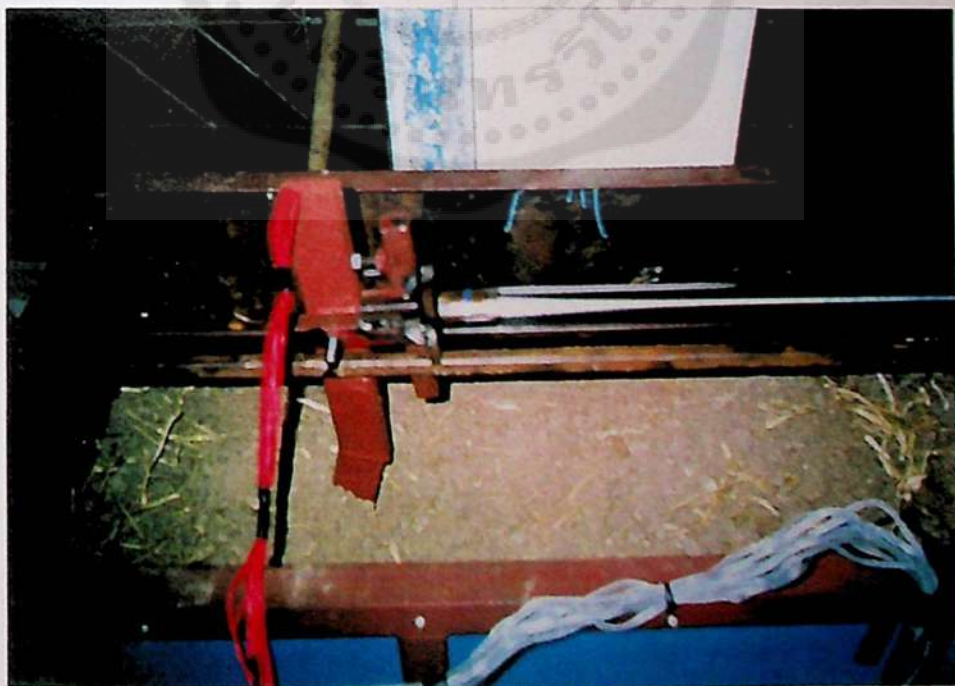
รูปผนวกที่ 1 แสดงเครื่องทดสอบการโก่งของพื้นชุด



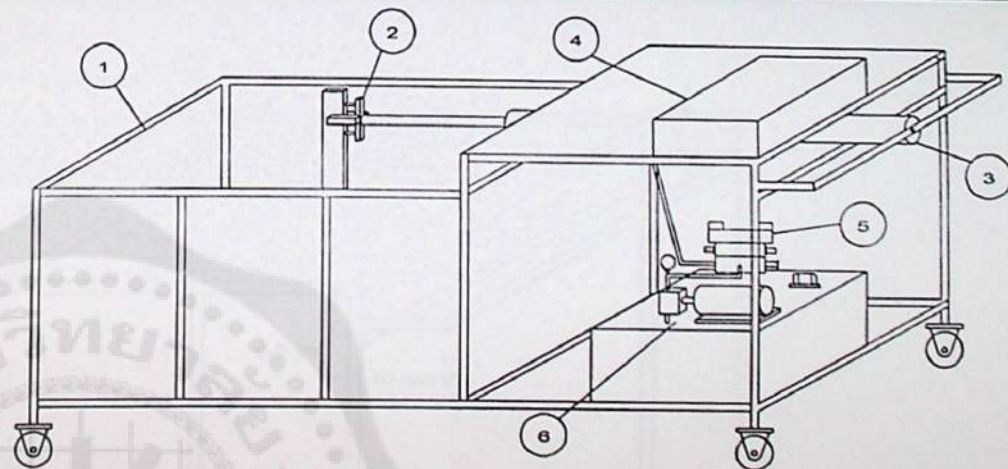
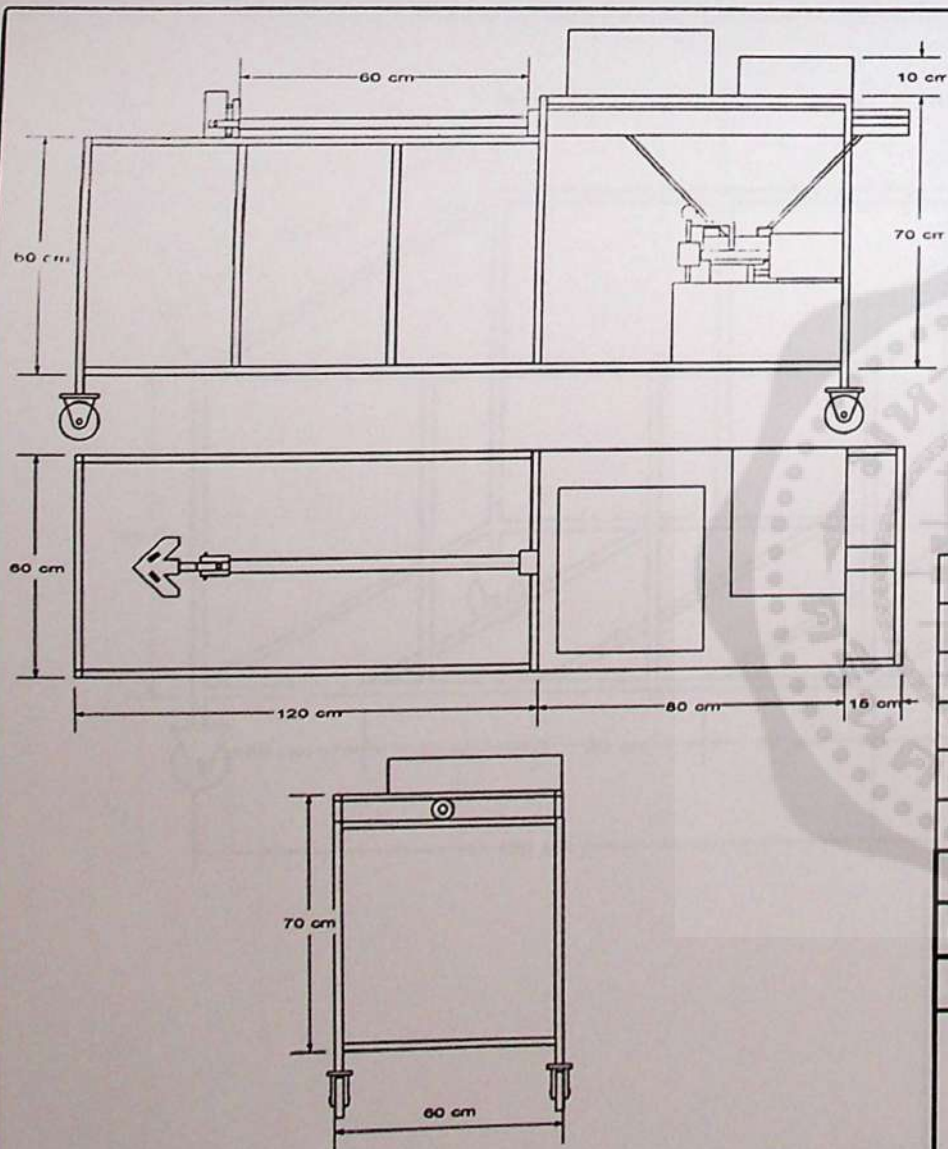
รูปผนวกที่ 2 แสดงพื้นชุดทั้ง 3 แบบ ซึ่งติดตั้ง strain gauge เรียบร้อยพร้อมที่จะทำการทดสอบ



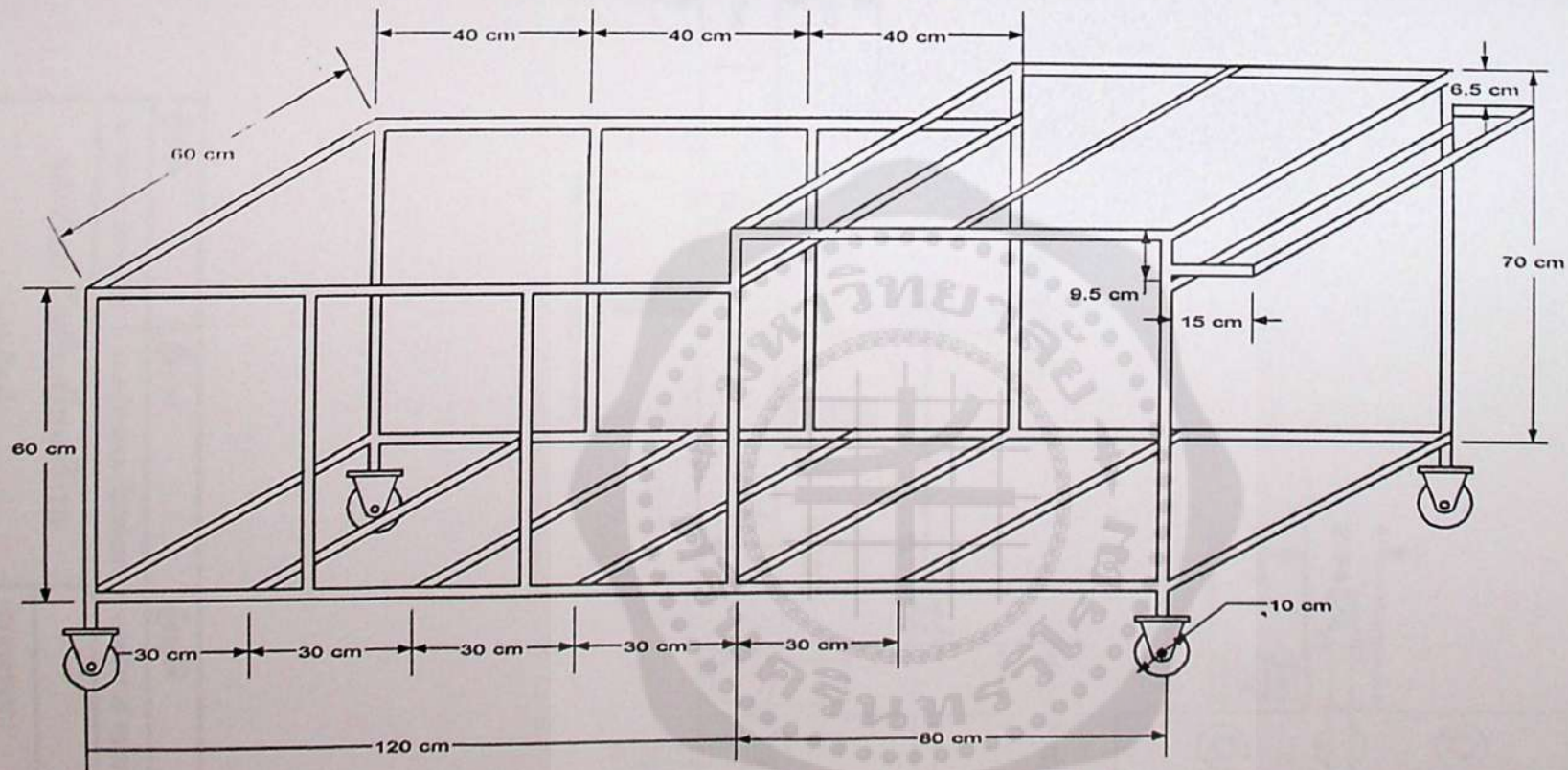
รูปผนวกที่ 3 แสดงลักษณะการติดตั้งฟันชุดในดินก่อนการทดสอบ



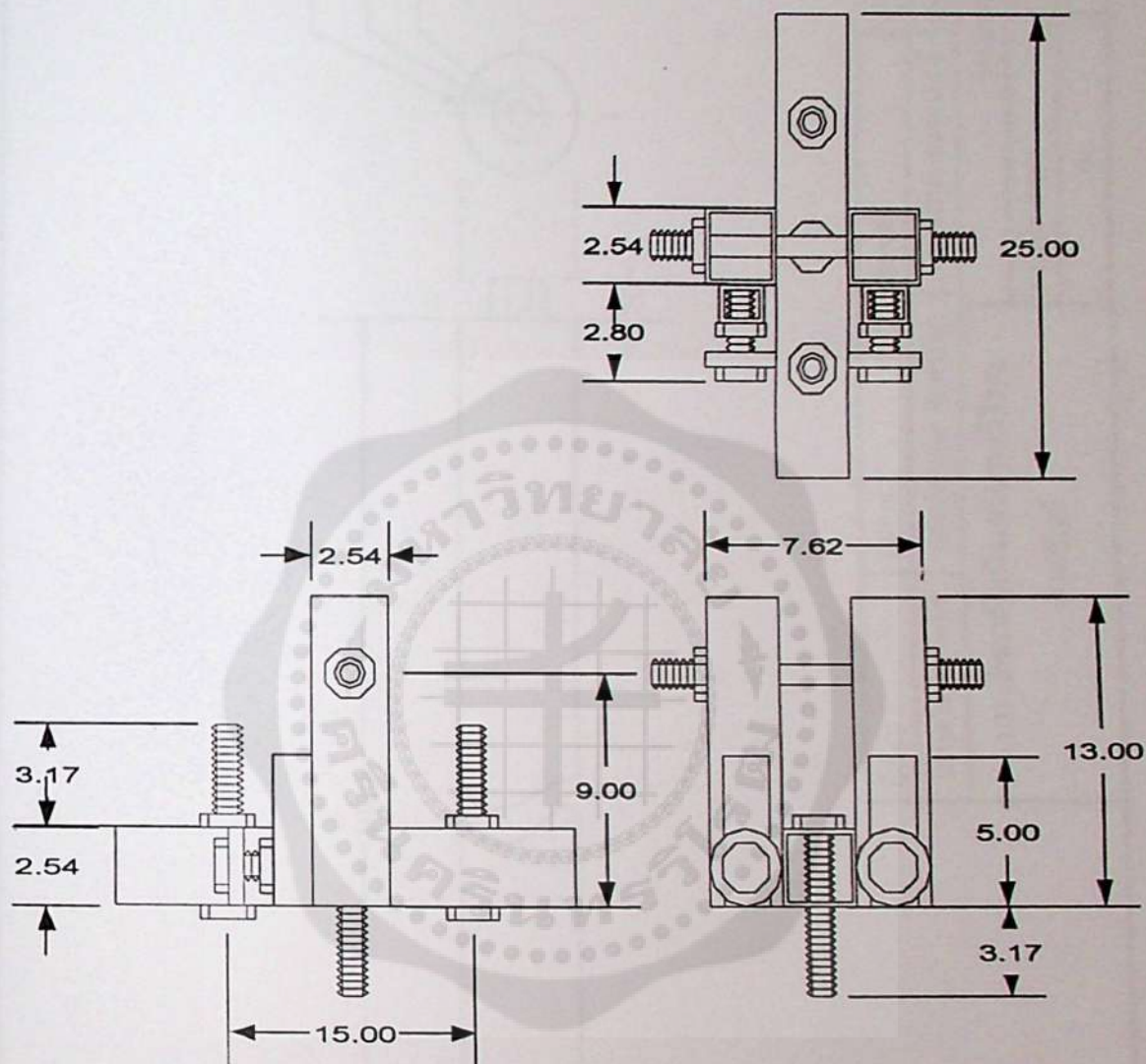
รูปผนวกที่ 4 แสดงลักษณะฟันชุดในดินหลังการทดสอบ



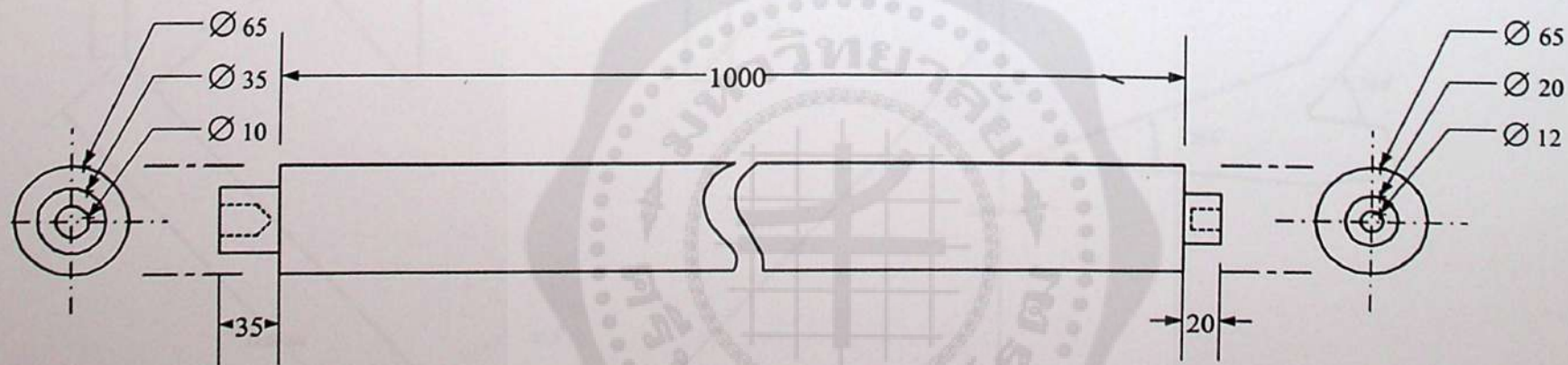
6	1	ชุดไฮดรอลิกส์เพาเวอร์ยูนิต	-	
5	1	โซลินอยด์วาล์ว	-	
4	1	กล่องควบคุมไฮดรอลิกส์	-	
3	1	กระบอกสูบ	-	
2	1	ชุดจับพื้นชุด, เหล็กกลวง 1 นิ้ว	-	
1	1	โครงเครื่องทดสอบ, เหล็กฉากหนา 4 มม.	-	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด	มาตรฐาน	
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเคโซ ทาอินทร์	นายประมาธ จันทร์รักษา	นายตำรวจ กระระนันท์	10/3/2000	1:15
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		เครื่องทดสอบพื้นชุด		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		01	1	1



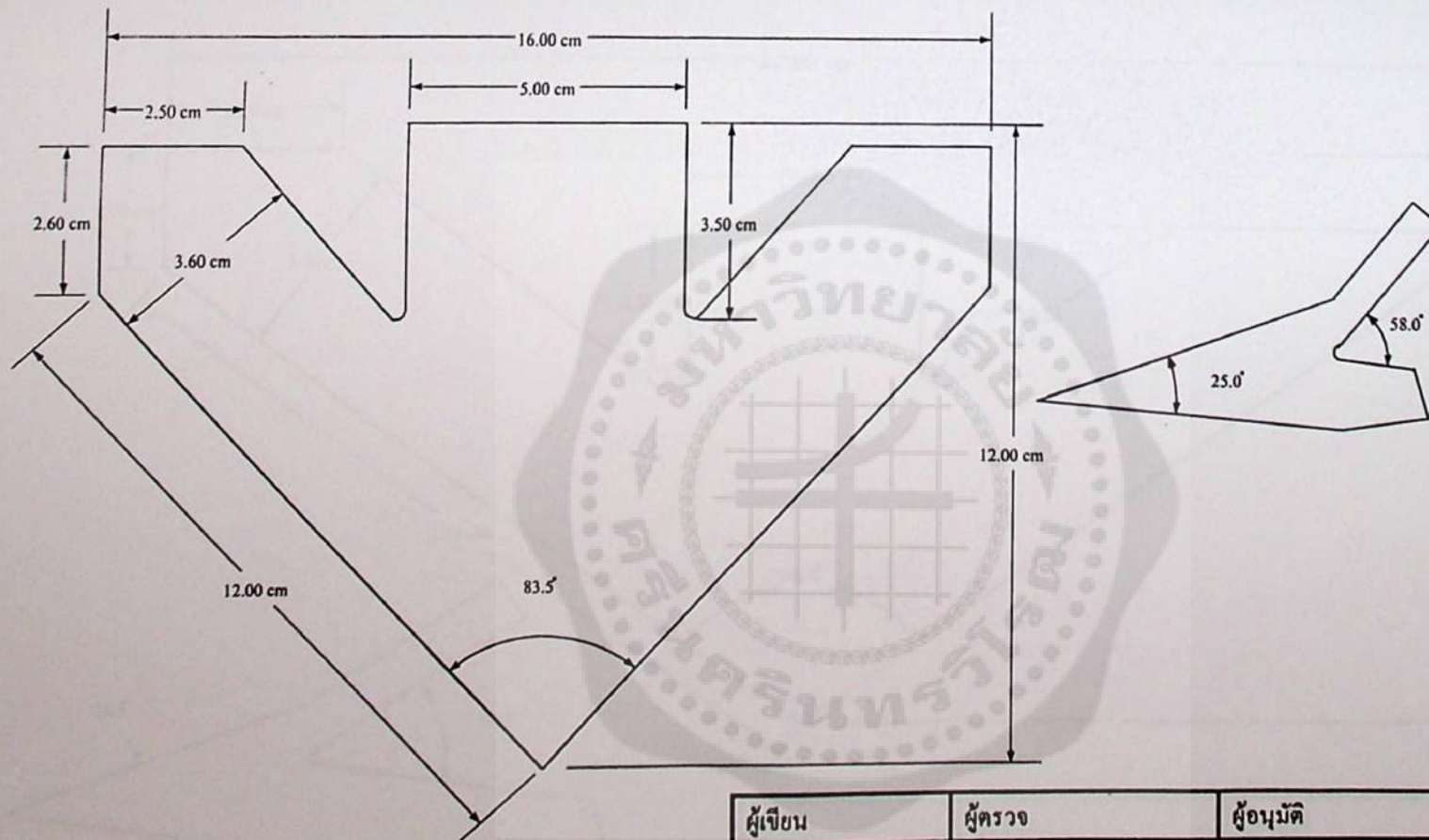
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเดโช ทาอินทร์	นายประมาณ จันทรักษา	นายสำราญ คกระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		โครงเครื่องทดสอบ		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		02	1	2



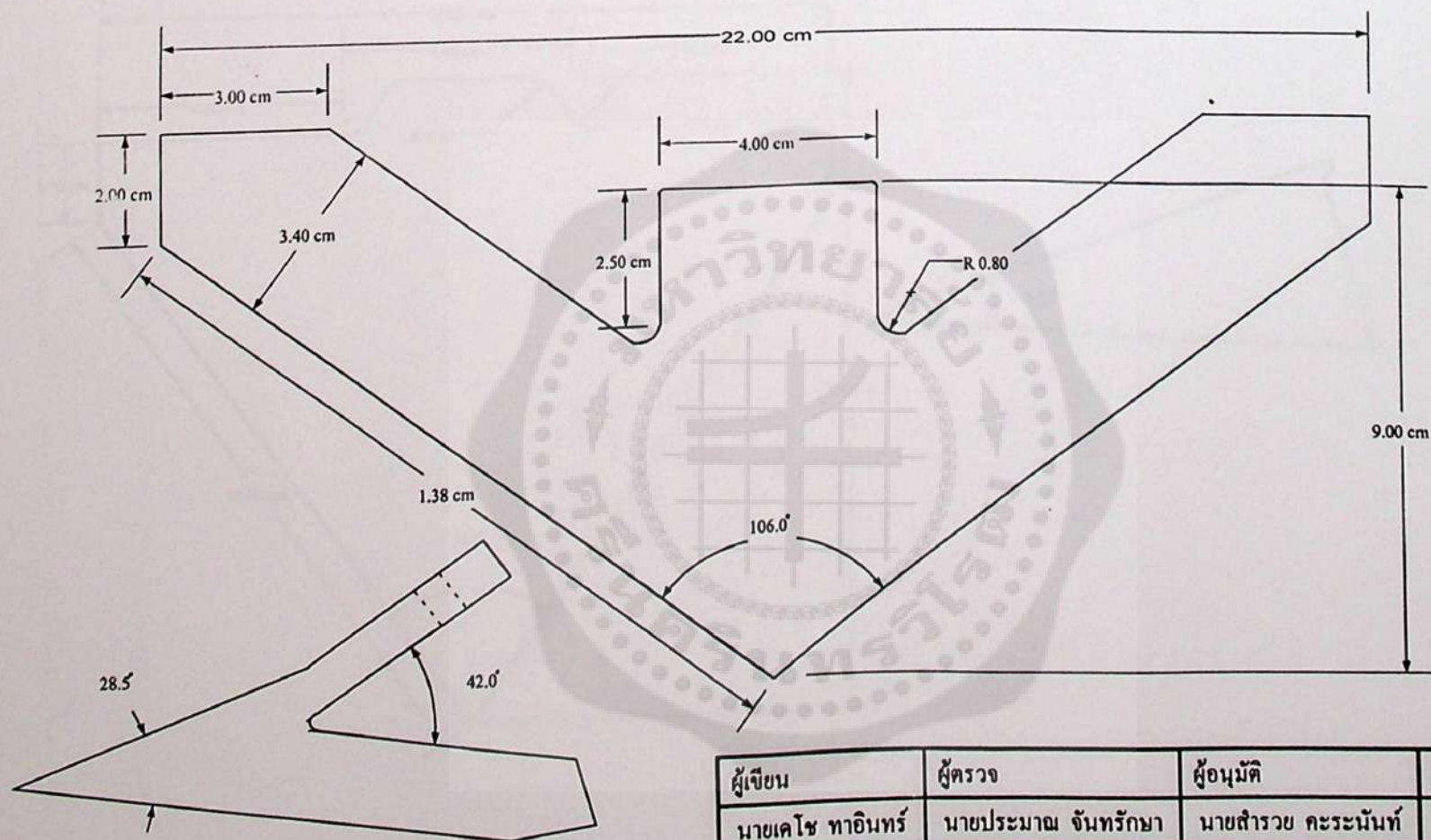
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเดโช ทาอินทร์	นายประมาณ จันทรักษา	นายสารวช กระระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		ชุดจับพันชุด		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		03	1	3



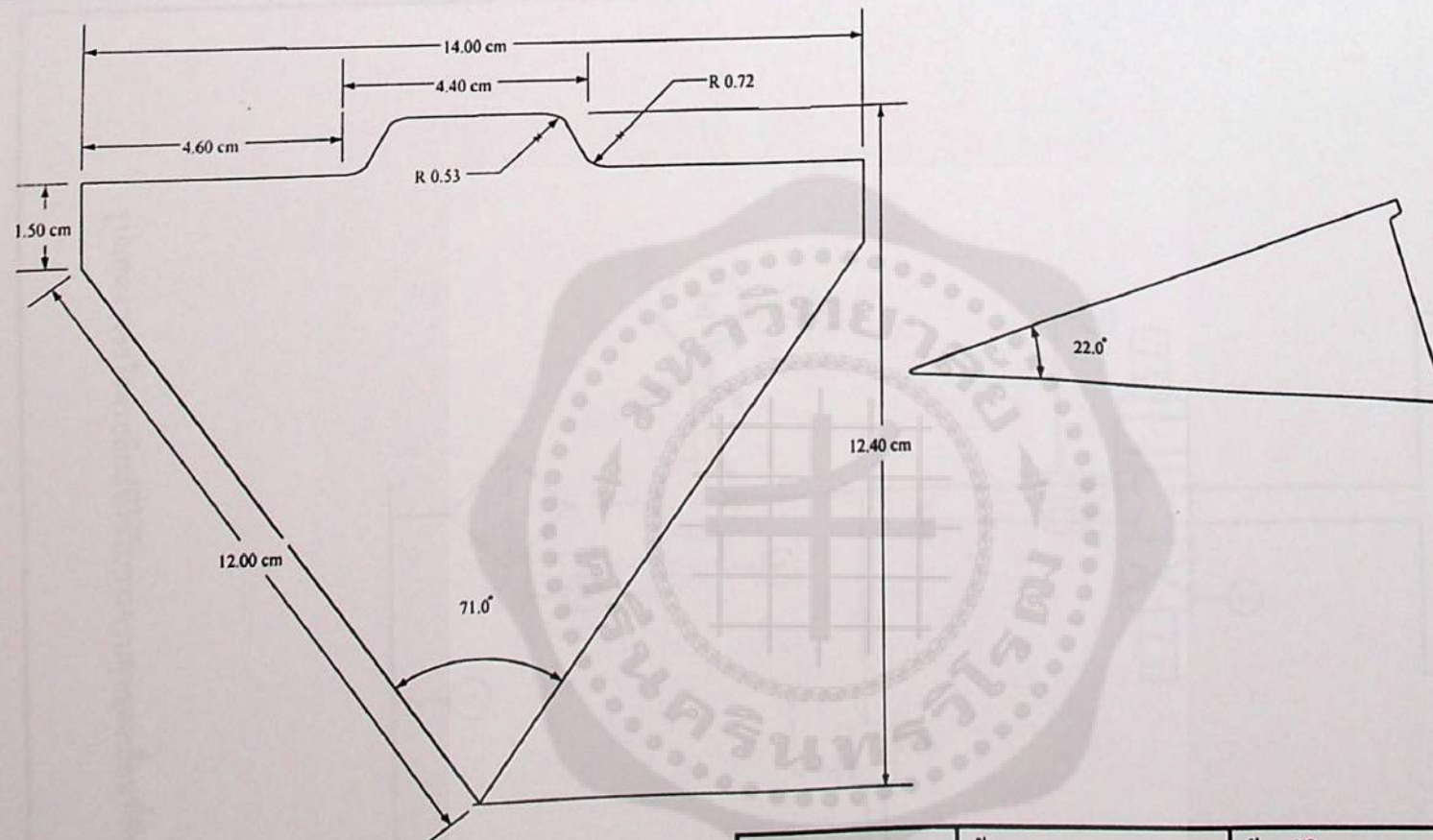
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเดโช ทาอินทร์	นายประมาณ จันทรักษา	นายสำรวย กระระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		กระบอกสูบ		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		04	1	4



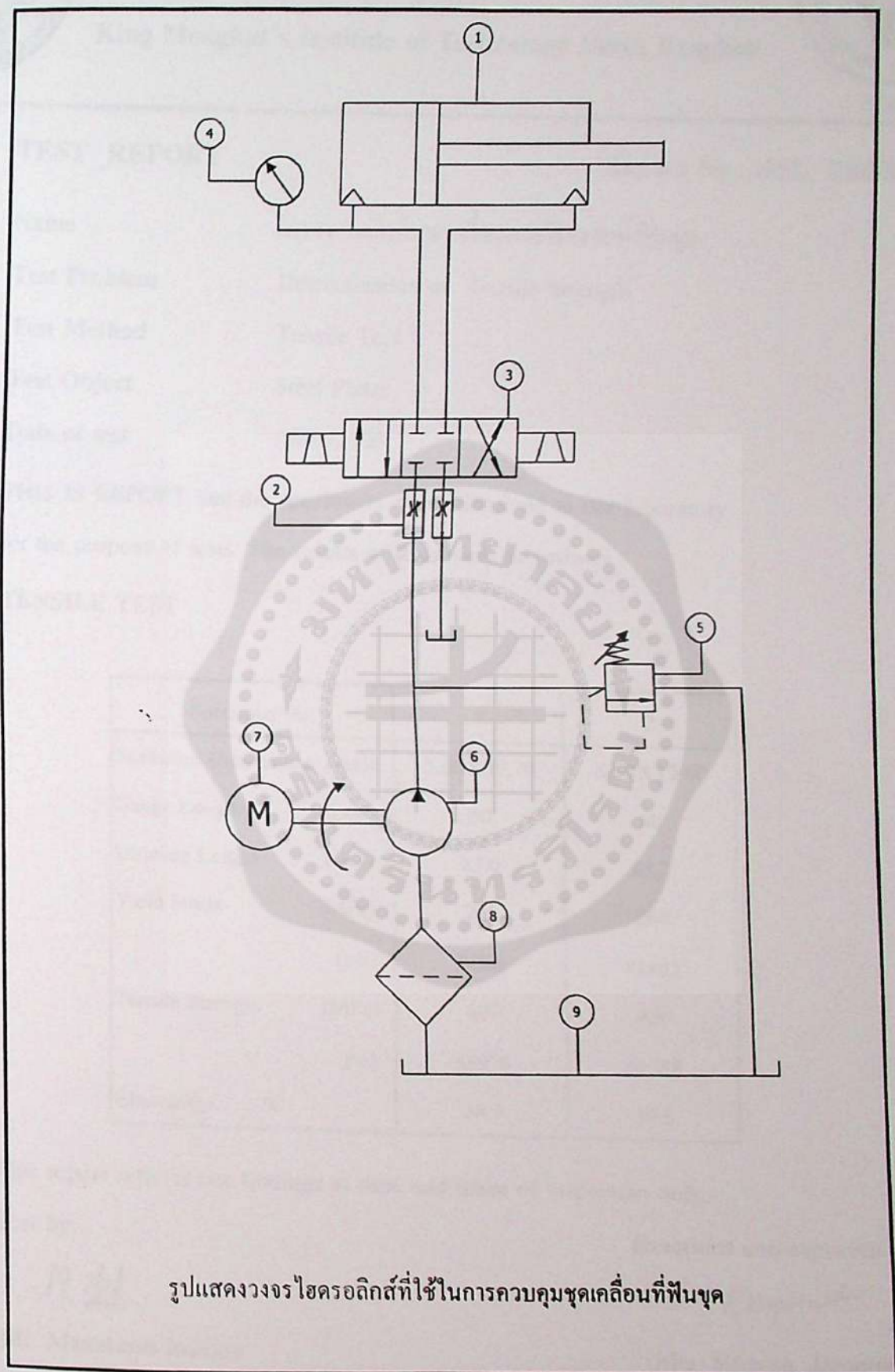
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเดโช ทาอินทร์	นายประมาน จันทรักษา	นายตำรวจ กระระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		พินจุดแบบที่ 1		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		05	1	5



ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเคโซ ทาอินทร์	นายประมาท จันทรักษา	นายตำรวจ คกระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		ฟันชุดแบบที่ 2		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		06	1	6



ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	วันที่	มาตราส่วน
นายเคโซ ทาอินทร์	นายประมาณ จันทรักษา	นายสำราญ กระระนันท์	10/3/2000	1:10
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		ฟันชุดแบบที่ 3		
		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่
		07	1	7



รูปแสดงวงจรไฮดรอลิกส์ที่ใช้ในการควบคุมชุดเคลื่อนที่ขึ้นชุด



MATERIALS SCIENCE LABORATORY

Production Engineering Department

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok



TEST REPORT

Report No. MSL 025/2000

Name : โครงการนักศึกษา เรื่องการวิเคราะห์พันธุ์

Test Problem : Determination of Tensile Strength

Test Method : Tensile Test

Test Object : Steel Plates

Date of test : 19/01/2000

THIS IS REPORT that the specimens were submitted to our laboratory for the purpose of tests. The results of tests were as follows

TENSILE TEST

Specimen No.	1	2
Specimen Dimensions (mm)	5.60 X 19.70	5.60 X 19.60
Gauge Length (mm)	60	60
Ultimate Length (mm)	83.0	83.7
Yield Stress (MPa)	266	288
(psi)	38546	41822
Tensile Strength (MPa)	407	426
(psi)	58976	61788
Elongation %	38.3	39.5

This report reflects our findings at time and place of inspection only.

Test by:

M. Inchan

(Mr. Manasarin Inchan)

Examined and approved by:

S. Daopiset

(Mrs. Siriporn Daopiset)

Head of Materials Science Laboratory

ตารางข้อมูลการเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกส์ (ของ Northman)

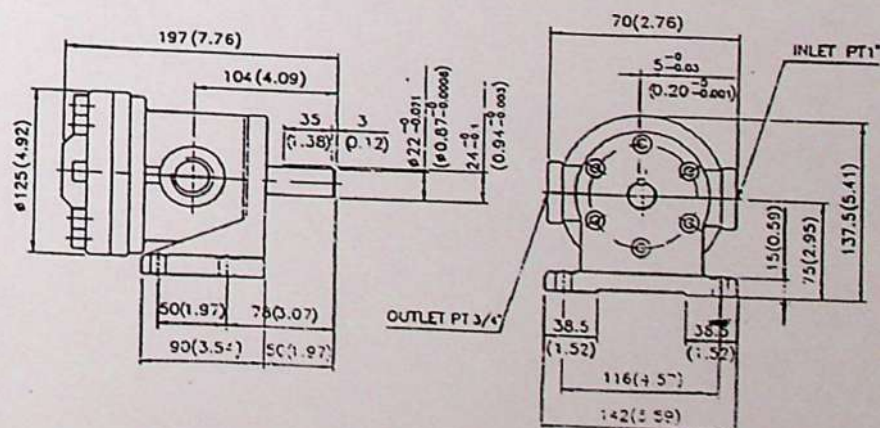
MODEL	MAX. PRESSURE kgf/cm ² (PSI)	CHARACTERISTICS WITH 20 CST FLUID						SHAFT SPEED RANGE (RPM)		WEIGHT kgs(lbs)		
		SPEED OF ROTATION (RPM)	DELIVERY LPM (GPM)			POWER INPUT (KW)			MAX	MIN	FOOT TYPE	FLANGE TYPE
			35 (50) kgf/cm ² (PSI)	35 (498) kgf/cm ² (PSI)	70 (995) kgf/cm ² (PSI)	35 (50) kgf/cm ² (PSI)	35 (498) kgf/cm ² (PSI)	70 (995) kgf/cm ² (PSI)				
VPNC-7-2-30	100 (1420)	1200	7.9 (2.1)	6.9 (1.8)	5.7 (1.5)	0.2	0.82	1.51	2000	800	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	9.9 (2.6)	8.9 (2.3)	7.7 (2.0)	0.30	1.05	1.87				
		1800	11.9 (3.1)	10.9 (2.8)	9.7 (2.5)	0.34	1.26	2.13				
VPNC-12-2-30	100 (1420)	1200	13.5 (3.5)	12.5 (3.3)	11.3 (2.9)	0.21	1.12	2.13	2000	600	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	16.8 (4.4)	15.8 (4.1)	14.6 (3.8)	0.31	1.42	2.70				
		1800	20.2 (5.3)	19.2 (5.0)	18.0 (4.7)	0.39	1.73	2.80				
VPNC-17-2-30	100 (1420)	1200	19.2 (5.0)	18.2 (4.7)	17.0 (4.4)	0.30	1.48	2.80	1800	600	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	24.0 (6.2)	23.0 (5.9)	21.8 (5.7)	0.39	1.86	3.50				
		1800	28.2 (7.5)	27.6 (7.2)	26.6 (6.9)	0.51	2.28	4.23				
VPNC-23-2-30	100 (1420)	1200	27.0 (7.0)	25.7 (6.7)	24.1 (6.3)	0.32	1.94	3.75	1800	600	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	33.7 (8.8)	32.4 (8.4)	30.8 (8.0)	0.47	2.50	4.73				
		1800	40.4 (10.5)	39.1 (10.2)	37.5 (9.8)	0.58	3.01	5.71				
VPNC-26-2-30	100 (1420)	1200	30.0 (7.5)	28.5 (7.4)	26.6 (6.9)	0.40	2.33	4.47	1800	600	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	37.5 (9.8)	36.0 (9.4)	34.1 (8.9)	0.52	2.92	5.60				
		1800	45.0 (11.7)	43.5 (11.3)	41.6 (10.8)	0.71	3.57	6.73				
VPNC-36-2-30	100 (1420)	1200	42.0 (10.9)	40.4 (10.7)	38.4 (10.3)	0.52	3.18	6.15	1800	600	10.5 (23.2)	9 (19.8)
		1500	52.5 (13.7)	50.9 (13.2)	48.9 (12.7)	0.72	3.95	7.60				
		1800	63.0 (13.4)	61.4 (16.0)	59.4 (15.4)	0.98	4.83	9.18				

INSTALLATION DIMENSIONS

UNIT mm (inch)

VPNC-7-2-30

Models with foot mounting type



ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ นายเคโซ ทาอินทร์
ประวัติ เกิดวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2519
ที่อยู่ปัจจุบัน 535 หมู่ 5 ต.น้ำร้อน อ.เมือง จ.ตาก 63000
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา รร.ตากพิทยาคม จ.ตาก
ปัจจุบัน ศึกษาชั้นอุดมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์องครักษ์ จ.นครนายก

ชื่อ นายทรงวุฒิ ค้วงมหาสอน
ประวัติ เกิดวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ.2521
ที่อยู่ปัจจุบัน 6 หมู่ 5 ต.ท้ายทุ่ง อ.ทับคล้อ จ.พิจิตร 66150
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา รร.ตะพานหิน จ.พิจิตร
ปัจจุบัน ศึกษาชั้นอุดมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์องครักษ์ จ.นครนายก

ชื่อ นายมานนท์ คำแถม
ประวัติ เกิดวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ.2521
ที่อยู่ปัจจุบัน 113 หมู่ 3 ต.พระงาม อ.พรหมบุรี จ.สิงห์บุรี 16120
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา รร.สิงห์บุรี จ.สิงห์บุรี
ปัจจุบัน ศึกษาชั้นอุดมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์องครักษ์ จ.นครนายก