

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมของดิน

4.1.1 ผลการทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดิน

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดิน สามารถหาขนาดของเม็ดดินได้ โดยแบ่งเป็น

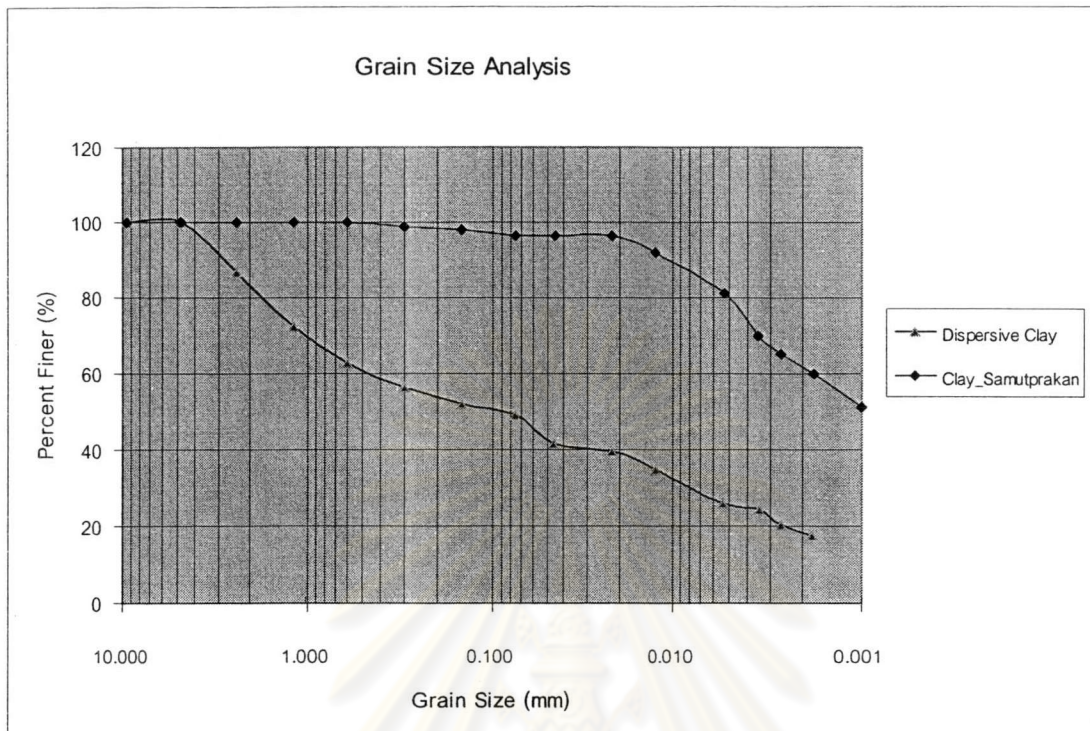
ดินเหนียวกระจายตัว

- ส่วนที่เป็นกรวด (ขนาด 2-76.2 มิลลิเมตร) เท่ากับ 28%
- ส่วนที่เป็นทราย (ขนาด 0.075-2 มิลลิเมตร) เท่ากับ 23.88%
- ส่วนที่เป็นทรายแป้งและดินเหนียว (น้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร) เท่ากับ 48.12%

ผลการทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดิน แสดงไว้ดังภาพที่ 13 ซึ่งจากผลทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดินเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) สามารถจำแนกประเภทของดินโดยระบบ Unified ได้ โดยตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบจัดเป็นดินประเภท SC (Clayey Sand)

ดินเหนียวอ่อน

ผลการทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดิน ดังภาพที่ 13 พบว่า ตัวอย่างดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50% แสดงว่าเป็นดินเม็ดละเอียด ซึ่งเมื่อนำพิจารณาร่วมกับการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) สามารถจำแนกประเภทของดินโดยระบบ Unified ได้ โดยตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบจัดเป็นดินประเภท OH



ภาพที่ 13 แสดงผลการทดสอบการหาขนาดผลของเม็ดดิน

4.1.2 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits)

จากการนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบเพื่อหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) โดยทำการหาค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) ค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit, PL) และค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index, PI) จะได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) และจำแนกประเภทของดินโดยระบบของ Unified

| ชนิดของดิน | LL (%) | PL (%) | PI (%) | USCS Soil Group |
|--------------|--------|--------|--------|-----------------|
| ดินกระจายตัว | 27.22 | 17.55 | 9.67 | SC |
| ดินเหนียว | 72.08 | 39.52 | 32.56 | CH |

จากผลการทดสอบหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) ดังตารางที่ 6 พบว่า ดินกระจายตัวมีค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) เท่ากับ 27.22 % ค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit, PL) เท่ากับ 17.55 % และค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index, PI) เท่ากับ 9.67 % และเมื่อผสมดินกระจายตัวกับปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) เท่ากับ 25.92 % ค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit, PL) เท่ากับ 19.56 % และค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index, PI) เท่ากับ 6.36 % จะเห็นว่าค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) มีค่าลดลง แต่ค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit, PL) มีค่าสูงขึ้น นั่นแสดงว่าปูนขาวมีผลให้ดินมีความชื้นลดลงและอนุภาคของดินเกาะตัวกันแน่นขึ้น ส่วนดินเหนียวที่นำมาทดสอบ พบว่ามีค่าความชื้นค่อนข้างสูง

4.1.3 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity, G_s) โดยการหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบดินกระจายทั้งหมด 3 ตัวอย่าง จะได้ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน ดังนี้

$$\text{- ดินกระจายตัว} : G_{s(\text{avg})} = 2.78$$

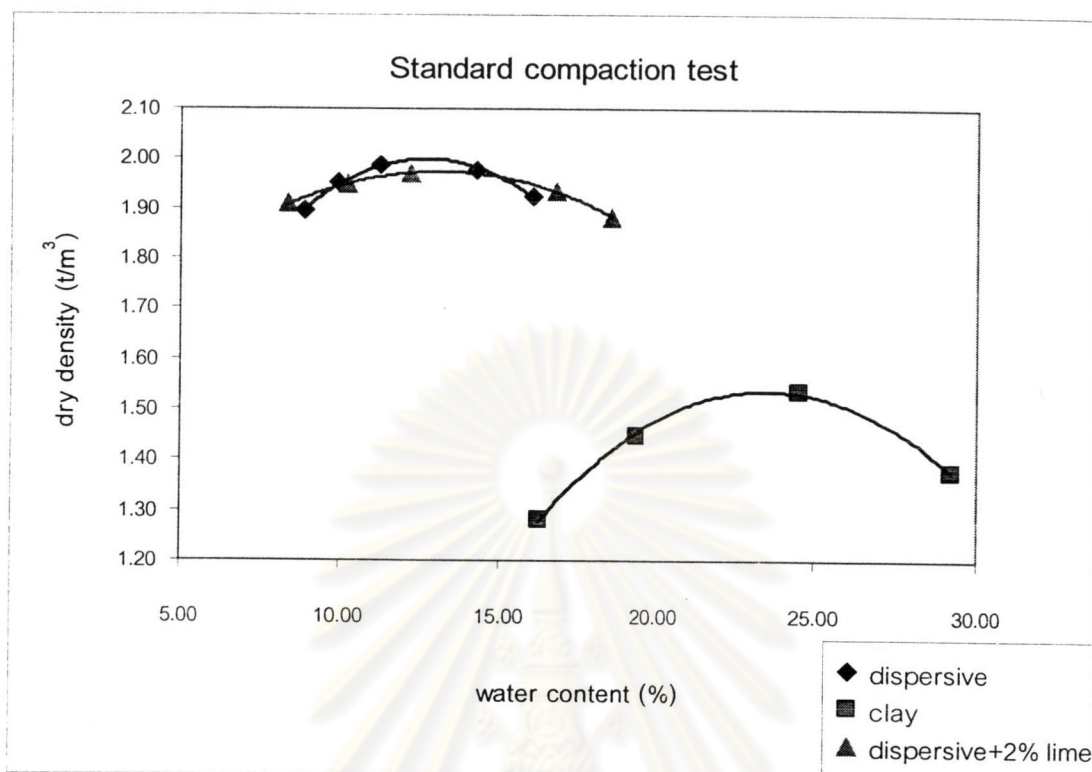
$$\text{- ดินเหนียว} : G_{s(\text{avg})} = 2.72$$

4.1.4 ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test)

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_{dmax}) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) จะได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test)

| ชนิดของดิน | ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตัน/ลบ.ม.) (Max. Dry Density, γ_{dmax}) | ความชื้นที่เหมาะสม (%) (Optimum Moisture Content) |
|--|--|--|
| ดินกระจายตัว | 2.00 | 12.93 |
| ดินกระจายตัว + ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | 1.98 | 13.20 |
| ดินเหนียว | 1.54 | 23.60 |



ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินชนิดต่างๆ

- หมายเหตุ
- ◆ ดินกระจายตัว
 - ดินเหนียว
 - ▲ ดินกระจายตัวผสมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ดังตารางที่ 7 และดังภาพที่ 14 พบว่า ดินกระจายตัวให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_{dmax}) เท่ากับ 2.00 ตัน/ลบ.ม. และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เท่ากับ 12.93% และเมื่อผสมดินกระจายตัวกับปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_{dmax}) เท่ากับ 1.98 ตัน/ลบ.ม. และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เท่ากับ 13.20% จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง แต่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น ส่วนดินเหนียว ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าน้อยกว่าดินอีกสองกลุ่ม แต่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะได้ค่าที่มากกว่า

4.1.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test)

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบหาลำดับรับแรงอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test) โดยกดที่อัตราเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที จะได้ค่าดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดทิศทางเดียว

| ชนิดของดิน | กำลังต้านทานแรงอัดทิศทางเดียว (กก./ตร.ซม.) , q_u |
|-------------------------------------|---|
| ดินกระจายตัว | 2.12 |
| ดินกระจายตัว + ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | 1.90 |
| ดินเหนียว | 1.29 |

จากผลการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test) ดังตารางที่ 8 พบว่า ดินกระจายตัวมีค่าความต้านทานในการรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินเท่ากับ 2.12 กก./ตร.ซม. และเมื่อนำดินกระจายตัวผสมกับปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะได้ค่าความต้านทานในการรับแรงอัดทิศทางเดียวของดิน เท่ากับ 1.90 กก./ตร.ซม. จะเห็นว่าค่าความต้านทานในการรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการทดสอบทันทีโดยไม่มีการบ่มตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้เต็มที่ จึงทำให้ได้ค่าที่ลดลง ส่วนในดินเหนียวมีค่าความต้านทานในการรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินน้อยกว่าดินอีกสองกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องจากมีสภาพเป็นดินอ่อน ค่าความต้านทานในการรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินจึงมีค่าน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดินในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 ผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test จากการนำตัวอย่างดินทั้งสามกลุ่มมาทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test จะได้อัตราต่างๆ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test

| ชนิดของดิน | ระดับการกระจายตัว (%) (Degree of Dispersive) | ประเภทการกระจายตัว |
|--|---|------------------------|
| ดินกระจายตัว | 74.03 | กระจายตัวรุนแรง |
| ดินกระจายตัว + ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | 29.90 | ไม่มีปัญหาการกระจายตัว |
| ดินเหนียว | 18.86 | ไม่มีปัญหาการกระจายตัว |

หมายเหตุ หลักเกณฑ์ในการพิจารณาระดับการกระจายตัว โดยวิธี Double Hydrometer Test

| | | |
|------------|-------------------------|---------------------------------|
| 0 – 33 % | Non – Dispersion | ดินไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัว |
| 34 – 67 % | Moderately – Dispersion | ดินมีการกระจายตัวปานกลาง |
| 68 – 100 % | High - Dispersion | ดินมีการกระจายตัวรุนแรง |

จากตารางที่ 9 ผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Double Hydrometer Test พบว่า ดินกระจายตัวมีค่าระดับการกระจายตัว (Degree of Dispersion) อยู่ที่ 74.03 % ซึ่งจัดอยู่ในประเภทดินกระจายตัวรุนแรง และเมื่อนำดินกระจายตัวผสมกับปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะได้อัตราการกระจายตัว (Degree of Dispersion) อยู่ที่ 29.90 % ซึ่งจัดอยู่ในประเภทดินที่ไม่มีปัญหาการกระจายตัว ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวไปทำปฏิกิริยากับดินเหนียวกระจายตัว ทำให้เม็ดดินจับตัวกันแน่น ลดการกระจายตัวของดินจนไม่มีปัญหาการกระจายตัว ส่วนในดินเหนียว ค่าระดับการกระจายตัว (Degree of Dispersion) อยู่ที่ 18.86 % ไม่มีปัญหาการกระจายตัวของดิน

4.2.2 ผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Pinhole Test

จากการนำตัวอย่างดินทั้งสามกลุ่มมาทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Pinhole Test จะได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Pinhole Test

| ชนิดของดิน | Classification | ประเภทการกระจายตัว |
|--|----------------|------------------------|
| ดินกระจายตัว | D1 | กระจายตัวรุนแรง |
| ดินกระจายตัว + ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | ND1 | ไม่มีปัญหาการกระจายตัว |
| ดินเหนียว | ND1 | ไม่มีปัญหาการกระจายตัว |

หมายเหตุ หลักเกณฑ์ในการพิจารณาหาระดับการกระจายตัว โดยวิธี Pinhole Test

D1 D2 = High - Dispersion ดินมีการกระจายตัวสูง

ND3 ND4 = Moderately - Dispersion ดินมีการกระจายตัวปานกลาง

ND1 ND2 = Non - Dispersion ดินไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัว

จากตารางที่ 10 ผลการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน โดยวิธี Pinhole Test พบว่าดินกระจายตัว มีผลทดสอบเป็น D1 ซึ่งจัดอยู่ในประเภทดินกระจายตัวขั้นรุนแรง และเมื่อนำดินกระจายตัวผสมกับปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะได้ผลทดสอบเป็น ND1 ซึ่งจัดอยู่ในประเภทดินไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัว ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวไปทำปฏิกิริยากับดินเหนียวกระจายตัว ทำให้เม็ดดินจับตัวกันแน่น ลดการกระจายตัวของดินจนไม่มีปัญหาการกระจายตัว ส่วนในดินเหนียว ผลการทดสอบเป็น ND1 ซึ่งจัดอยู่ในประเภทดินไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัว

4.3 ทดสอบความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียว

4.3.1 การทดสอบโดยไม่เจาะตัวอย่างดิน

4.3.1.1 ทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ

จากการนำตัวอย่างดินทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน (Coefficient of Permeability, k) ดังนี้

ตารางที่ 11 แสดงผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ

| ชนิดของดิน | ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน (ชม./วินาที) (Coefficient of Permeability, k) | คุณสมบัติการระบายน้ำ |
|--|--|----------------------|
| ดินกระจายตัว | 2.89×10^{-8} | น้ำซึมผ่านได้ยาก |
| ดินกระจายตัว + ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | 1.96×10^{-8} | น้ำซึมผ่านได้ยาก |
| ดินเหนียว | 1.26×10^{-8} | น้ำซึมผ่านได้ยาก |

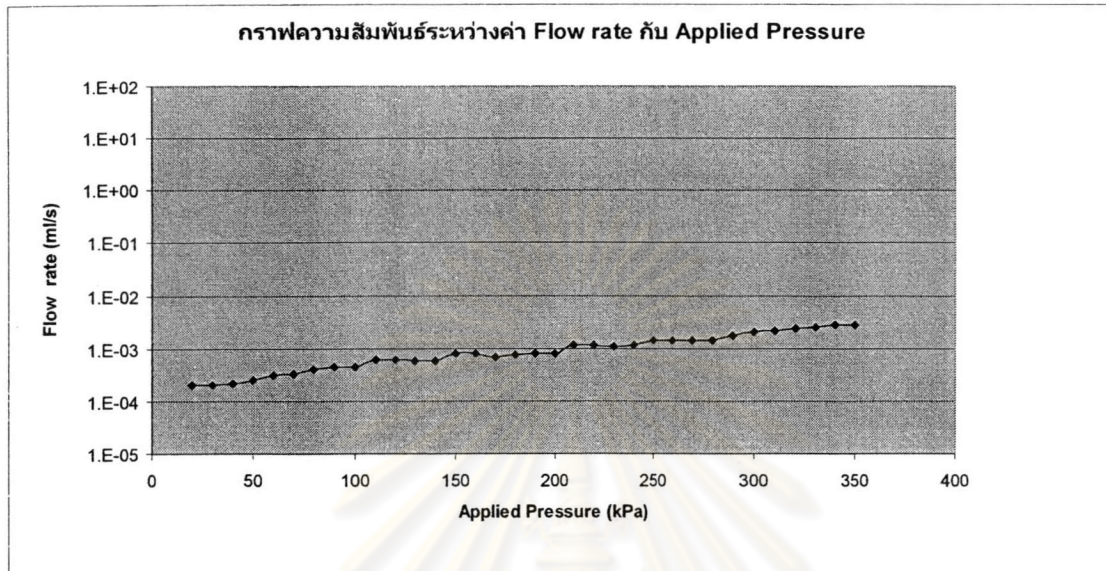
จากตารางที่ 11 ผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของตัวอย่างดินทั้งสาม (Coefficient of Permeability, k) จะอยู่ในช่วง 10^{-8} cm/s ซึ่งน้ำซึมผ่านดินได้ยาก โดยดินกระจายตัวที่ทำการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) ลดลง แสดงว่าการผสมปูนขาวเข้าไปมีส่วนทำให้การซึมผ่านดินนั้นยากขึ้น เนื่องจากดินจับตัวกันแน่นขึ้น แต่จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) ลดลงไม่มากนัก คือ ยังอยู่ในช่วง 10^{-8} cm/s นั้นแสดงว่า การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนขาวมีผลต่อการซึมผ่านดินไม่มากนัก ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการควบคุมการบดอัดที่ดี ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) แตกต่างกันไปเล็กน้อย

4.3.1.2 ทดสอบหาความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียว

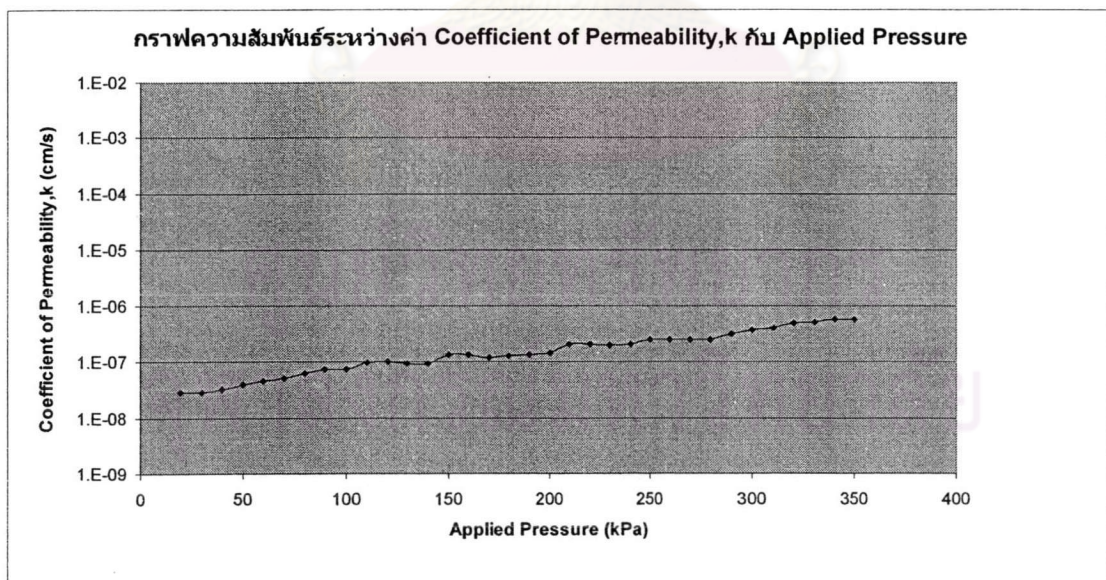
เนื่องจากแรงดันน้ำของดินกระจายตัว

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบหาความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียวเนื่องจากแรงดันน้ำของดินกระจายตัว โดยไม่ทำการเจาะตัวอย่างดิน จะแสดงผลการทดสอบในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow rate กับค่า Applied Pressure ของดินกระจายตัวและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coefficient of Permeability, k กับค่า Applied Pressure ของดินกระจายตัว เพื่อหาค่าแรงดันของน้ำที่มีผลทำให้เกิดการไหลทันทีทันใด นั่นก็คือ

อนุภาคของดินเหนียวเกิดการกักเซาะพัดพาขึ้น ค่าแรงดันดังกล่าวก็คือแรงต้านทานการกักเซาะพัดพาดินเหนียวเนื่องจากแรงดันน้ำที่ต้องการทราบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 15 และ 16



ภาพที่ 15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow rate กับค่า Applied Pressure ของดินกระจายตัว



ภาพที่ 16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coefficient of Permeability, k กับค่า Applied Pressure ของดินกระจายตัว

จากภาพที่ 15 ผลการทดสอบหาความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียวเนื่องจากแรงดันน้ำของดินกระจายตัว พบว่า ค่าอัตราการไหลของน้ำ (Flow rate) จะอยู่ในช่วง $10^{-4} - 10^{-3}$ ml/s โดยใช้ค่าแรงดันของน้ำ (Applied Pressure) ตั้งแต่ 20 kPa จนถึง 350 kPa จะเห็นว่าค่าอัตราการไหลของน้ำจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก และเมื่อนำน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินไปอบแห้งเพื่อหาปริมาณดิน พบว่า มีปริมาณดินน้อยมาก นั่นแสดงว่า ไม่มีการกัดเซาะภายในเลย และเมื่อนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (Coefficient of Permeability, k) ดังภาพที่ 16 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (Coefficient of Permeability, k) จะอยู่ในช่วง $10^{-8} - 10^{-7}$ cm/s ซึ่งถือว่ามีการซึมน้ำได้น้อยมาก ทั้งๆที่ทำการเพิ่มแรงดันน้ำค่อนข้างสูงมากแล้ว คือ 350 kPa แต่ก็ยังอยู่ในช่วงการซึมน้ำที่น้อยมาก จนเมื่อทำการเพิ่มแรงดันน้ำมากกว่า 350 kPa ปรากฏว่า ตัวอย่างดินถูกกัดเซาะบริเวณด้านข้างซึ่งติดกับส่วนของกระบอกพลาสติก (Cell Pressure) ดังภาพที่ 17 จนไม่สามารถวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ (Flow rate) ได้ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์และพิจารณาจากรูปแบบและลักษณะการกัดเซาะบริเวณดังกล่าวแล้ว พบว่า ไม่ได้เกิดจากการกัดเซาะพัดพาภายในของดินกระจายตัว (Clay Detachment) แต่เกิดเนื่องจากบริเวณด้านข้างซึ่งติดกับกระบอกพลาสติก (Cell Pressure) เป็นบริเวณที่มีความเชื่อมแน่นน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่แบ่งแยกระหว่างส่วนของตัวอย่างดินกับส่วนของกระบอกพลาสติก (Cell Pressure) จึงเป็นบริเวณที่น้ำสามารถเข้าไปกัดเซาะตัวอย่างดินได้ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้แรงดันน้ำที่ค่อนข้างสูง การกัดเซาะก็ยิ่งเกิดง่ายขึ้น



ภาพที่ 17 แสดงลักษณะตัวอย่างดินกระจายตัวที่ถูกกัดเซาะเนื่องจากแรงดันน้ำ

จากผลการทดสอบข้างต้นชี้ให้เห็นว่า การกัดเซาะภายใน (Internal Erosion) อนุภาคดินเหนียวไม่เกิดขึ้น เป็นผลให้การกัดเซาะพัดพาอนุภาคดินเหนียว (Clay Detachment) ไม่เกิดขึ้นด้วย สอดคล้องกับการศึกษาของ Bourdeaux และคณะ (1975), Haliburton และคณะ (1975) อ้างโดย Kim (1982) ซึ่งกล่าวว่า การควบคุมการบดอัดที่ดี สามารถควบคุมและลดการแตกร้าวของดินกระจายตัวในสภาวะแห้งและลดการพังทลายจากการเกิดรูโพรง โดยไม่เกิด Piping ขึ้น ซึ่งการทดสอบในครั้งนี้มีการควบคุมการบดอัดให้เป็นไปตามการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) นอกจากนั้นการทดสอบในครั้งนี้ยังกระทำในระบบปิด คือ ตัวอย่างดินจะสัมผัสกับน้ำ แต่ไม่สัมผัสแสงแดด ความชื้นของตัวอย่างดินจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อมีการควบคุมการบดอัดที่ดีแล้ว โอกาสเกิดการแตกร้าวของดินในสภาวะแห้งจึงไม่เกิดขึ้น นอกจากนี้จากการก่อสร้างเขื่อนในประเทศและต่างประเทศที่จำเป็นต้องใช้ดินกระจายตัวในการก่อสร้างหลายแห่ง จากรายงานของกรมชลประทาน พบว่า มีเขื่อนจำนวนไม่น้อยที่ใช้ดินกระจายตัวในการก่อสร้าง แต่ใช้เฉพาะใน Zone ซึ่งไม่ถูกตากแห้ง ก็คือ ดินส่วนชั้นในของตัวเขื่อน (Interior Zone) และจะต้องบดอัดที่จุดที่มีความชื้นพอเหมาะ (Optimum Moisture Content) หรือสูงกว่าเล็กน้อย เพื่อลดค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และลดการเกิดการกัดเซาะภายใน (Internal Erosion) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบในครั้งนี้ซึ่งมีการควบคุมการบดอัดที่ดี และทำการทดสอบในระบบปิด (คล้ายพฤติกรรมของเขื่อนในส่วน Interior Zone) จากเหตุผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่า การกัดเซาะพัดพาอนุภาคดินเหนียว (Clay Detachment) มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากมีการควบคุมการบดอัดที่ดีและกระทำในระบบปิด

ในส่วนของดินกระจายตัวผสมกับปูนขาว 2% โดยน้ำหนักและดินเหนียว ไม่ทำการทดสอบต่อ เนื่องจากผลการทดสอบของดินกระจายตัวไม่เกิดพฤติกรรมการกัดเซาะพัดพาอนุภาคดินเหนียว (Clay Detachment) ขึ้น ดังนั้นโอกาสเกิดพฤติกรรมดังกล่าวกับดินอีกสองกลุ่มจึงมีน้อย โดยจะไปทำการทดสอบหาความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียวเนื่องจากแรงดันน้ำของดินกระจายตัว โดยทำการเจาะตัวอย่างดินต่อไป

4.3.2 การทดสอบโดยเจาะตัวอย่างดิน

จากการนำตัวอย่างดินมาทดสอบหาความสามารถในการต้านทานการพัดพาอนุภาคดินเหนียวเนื่องจากแรงดันน้ำของดินทั้งสามกลุ่ม โดยทำการเจาะตัวอย่างดิน จะแสดงผลการทดสอบในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดเซาะ (Rate of erosion, mg/s) กับค่าเวลา (Time, second) ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดค่า Shear Stress ของดินที่ทำการเจาะ ซึ่งต้องการความละเอียดถึงหน่วยวัดความดันเป็นปาสกาล (Pa) (อ้าง

จากการศึกษาของ Reddi L.N. ,In-Mo Lee, and Bonala M.V.S. “Comparison of Internal and Surface Erosion Using Flow Pump Tests on a Sand-Kaolinite Mixtures”, Geotechnical Testing Journal, 2000, 23, GTJODJ, 26-33.) แต่เครื่องมือวัดที่ใช้มีความละเอียดถึงหน่วยวัดความดันเป็น กิโลปาสกาล (kPa) เท่านั้น จึงทำการหาค่าของเวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะขึ้น โดยใช้แรงดันของน้ำ ความหนาของตัวอย่างดินและขนาดของรูเจาะที่แตกต่างกันไป ซึ่งได้ผลการทดสอบ ดังนี้

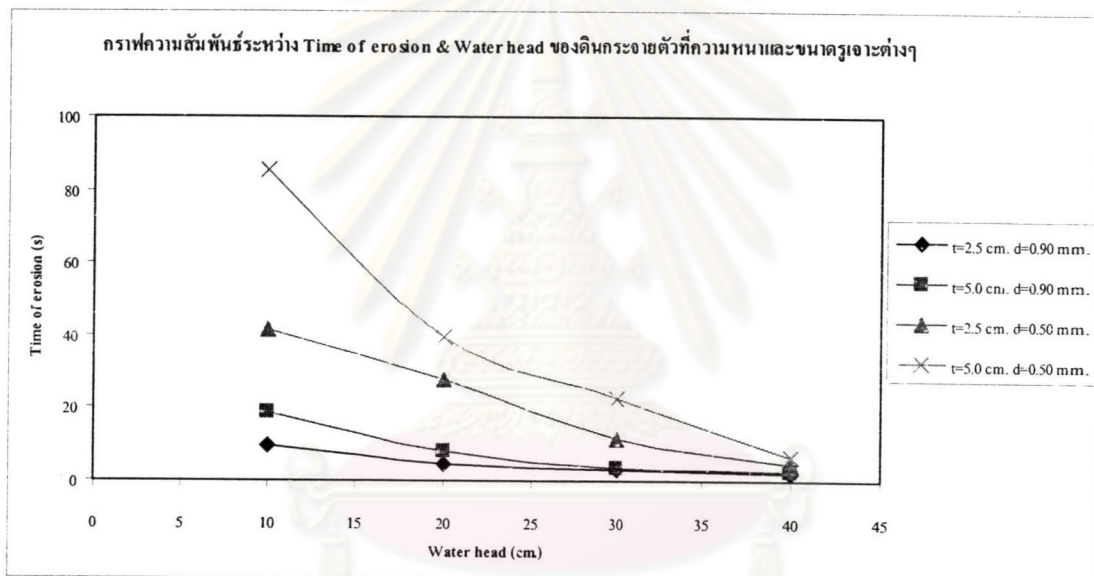
ตารางที่ 12 แสดงเวลาที่เริ่มต้นกัดเซาะของดินชนิดต่างๆ

| ชนิดของดิน | ขนาดของรูเจาะ (มม.) | ความหนา (ซม.) | เวลาที่เริ่มต้นกัดเซาะ (วินาที) | | | |
|--------------------------------------|---------------------|---------------|---------------------------------|--------|-------|-------|
| | | | แรงดันน้ำ (ซม.) | | | |
| | | | 10 | 20 | 30 | 40 |
| ดินกระจายตัว | Ø0.25 | 2.50 | α | 115.00 | 62.50 | 14.00 |
| | | 5.00 | - | - | - | - |
| | Ø0.50 | 2.50 | 41.50 | 28.00 | 11.50 | 4.50 |
| | | 5.00 | 85.50 | 39.50 | 22.50 | 6.50 |
| | Ø0.90 | 2.50 | 9.50 | 4.50 | 3.00 | 2.00 |
| | | 5.00 | 18.50 | 8.00 | 3.50 | 2.50 |
| ดินกระจายตัวผสม ปูนขาว 2% โดยน้ำหนัก | Ø0.25 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | - | - | - | - |
| | Ø0.50 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | α | α | α | α |
| | Ø0.90 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | α | α | α | α |
| ดินเหนียวอ่อน | Ø0.25 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | - | - | - | - |
| | Ø0.50 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | α | α | α | α |
| | Ø0.90 | 2.50 | α | α | α | α |
| | | 5.00 | α | α | α | α |

หมายเหตุ α หมายถึง ไม่เกิดการกัดเซาะ

จากตารางที่ 12 พบว่า ดินทั้งสามชนิดที่นำมาทดสอบเพื่อหาเวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ มีสองชนิดที่ไม่เกิดการกัดเซาะ คือ ดินกระจายตัวที่ผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักและดินเหนียวอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากดินกระจายตัวที่ผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวโดยผสมกับปูนขาว เพื่อให้อนุภาคของดินทำปฏิกิริยากับปูนขาว ทำให้เกิดการเกาะยึดแน่นกันระหว่างอนุภาคของดินซึ่งจะลดการกัดเซาะ ส่วน

ดินเหนียวอ่อน เมื่อดินมีค่าความเหนียวค่อนข้างสูง เมื่อดินจึงยึดเกาะกันแน่น และเมื่อทำการทดสอบพบว่าดินมีการบวมตัวอีกจนปีครู่เจาะ จึงไม่เกิดการกัดเซาะขึ้น ส่วนดินเหนียวกระจายตัวพบว่า มีการกัดเซาะค่อนข้างสูง เนื่องจากดินมีการกระจายตัวของดินสูง อนุภาคของเม็ดดินจะไม่ยึดเกาะกันเมื่อสัมผัสกับน้ำ แต่ที่ขนาดรูเจาะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตรและใช้แรงดันน้ำที่ความสูง 10 เซนติเมตร พบว่าไม่เกิดการกัดเซาะ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูเจาะเล็กมาก และใช้แรงดันน้ำค่อนข้างต่ำ จนไม่สามารถเอาชนะแรงดันอากาศภายในรูเจาะได้ อีกทั้งเม็ดดินที่หลุดออกมา ไปอุดรูเจาะซึ่งมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งรูเจาะปิด ไม่เกิดการกัดเซาะ ส่วนตัวแปร (ในขอบเขตการวิจัย) ที่มีผลต่อเวลาที่เริ่มการกัดเซาะ (Time of erosion) ของดินกระจายตัว แสดงไว้ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Time of erosion กับ Water head ของดินกระจายตัวที่ความหนาและขนาดรูเจาะต่างๆ

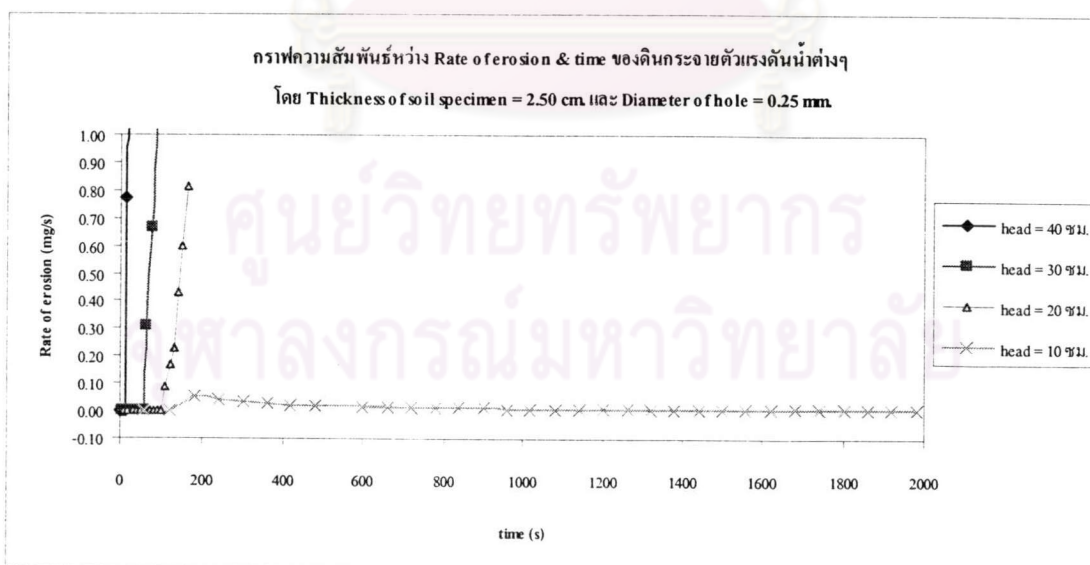
จากภาพที่ 18 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ (Time of erosion) ของดินกระจายตัวเมื่อพิจารณาความหนาของตัวอย่างดินที่ต่างกัน พบว่า ความหนาของตัวอย่างดินที่มากกว่าเมื่อใช้ขนาดรูเจาะเดียวกัน เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ (Time of erosion) ของดินกระจายตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่า ทั้งนี้เนื่องจากกระยะทางในการเดินทางของน้ำเพิ่มขึ้น เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ (Time of erosion) จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาขนาดของรูเจาะที่ต่างกัน พบว่า ขนาดของรูเจาะที่ใหญ่กว่าเมื่อใช้ความหนาของตัวอย่างดินที่เท่ากัน เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ (Time of erosion)

ของดินกระจายตัวจะเกิดขึ้นเร็วกว่า เนื่องจากน้ำสามารถกัดเซาะได้ในบริเวณที่มากกว่า การกัดเซาะจึงเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาแรงดันของน้ำที่ต่างกัน พบว่า แรงดันของน้ำที่สูงกว่า เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะ (Time of erosion) ของดินกระจายตัวจะเกิดเร็วยิ่งขึ้น

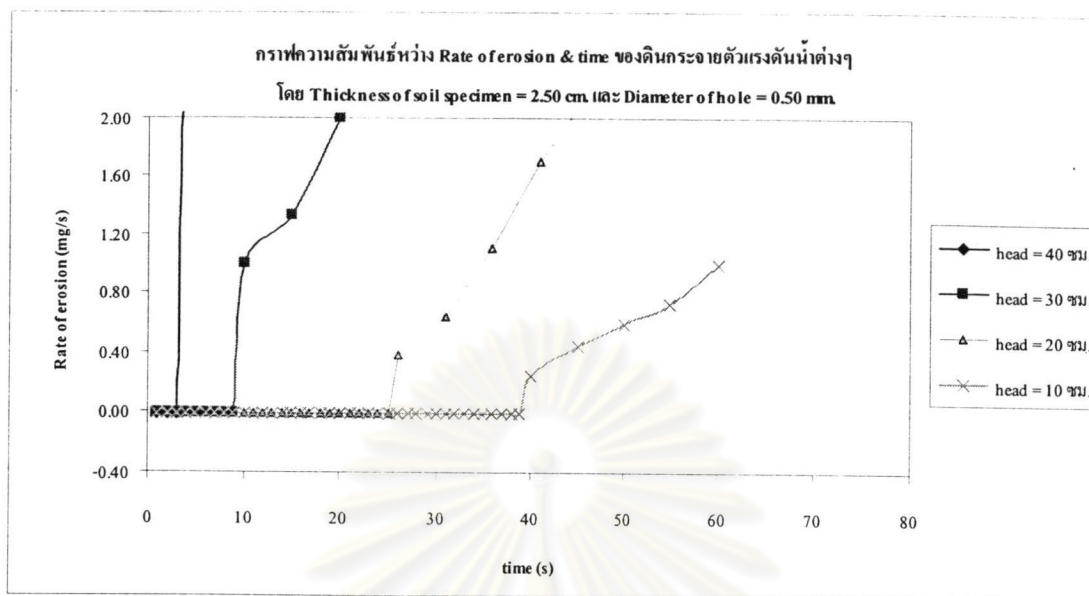
เมื่อพิจารณาอัตราการกัดเซาะ (Rate of erosion) ของดิน โดยแยกตามประเภทของตัวอย่างดินที่นำมาทำการทดสอบ พบว่า

(1) ดินกระจายตัว

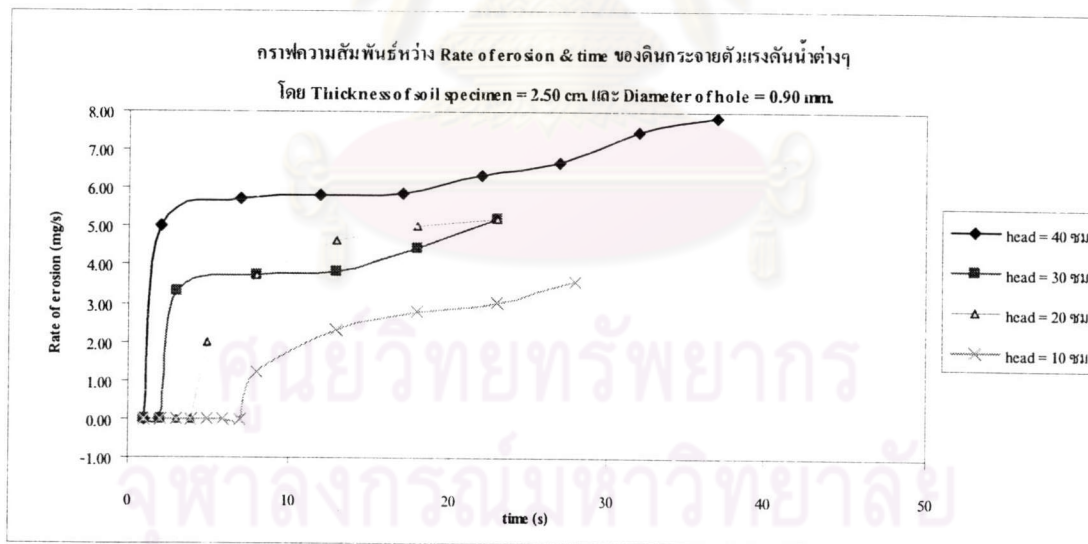
จากภาพที่ 19-23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะ (Rate of erosion) กับ เวลาที่ใช้ทดสอบ (time) ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยแบ่งตามความหนาของตัวอย่างดินและขนาดของรูเจาะที่ต่างกัน พบว่า เมื่อใช้แรงดันของน้ำ (Water head) ยิ่งสูง เวลาที่เริ่มเกิดการกัดเซาะก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นเท่านั้น โดยจะมีเฉพาะที่ใช้แรงดันของน้ำ (Water head) ที่ความสูง 10 ซม. ความหนาของตัวอย่างดินที่ 2.50 ซม. และขนาดของรูเจาะที่ 0.25 มม. เท่านั้นที่เมื่อเกิดการกัดเซาะแล้วปรากฏว่า การกัดเซาะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่เกิดการกัดเซาะเลย ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูเจาะเล็กมากและใช้แรงดันน้ำค่อนข้างต่ำ จนไม่สามารถเอาชนะแรงดันอากาศภายในรูเจาะได้ อีกทั้งเมื่อดินที่หลุดออกมา ไปอุดรูเจาะซึ่งมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งรูเจาะปิดและไม่เกิดการกัดเซาะขึ้นในที่สุด



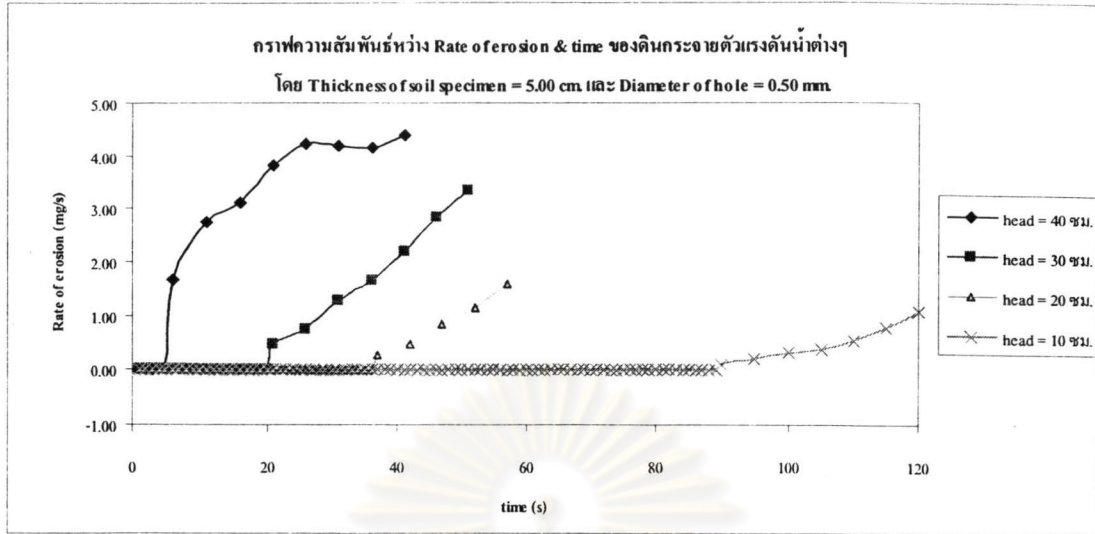
ภาพที่ 19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.25 มม.



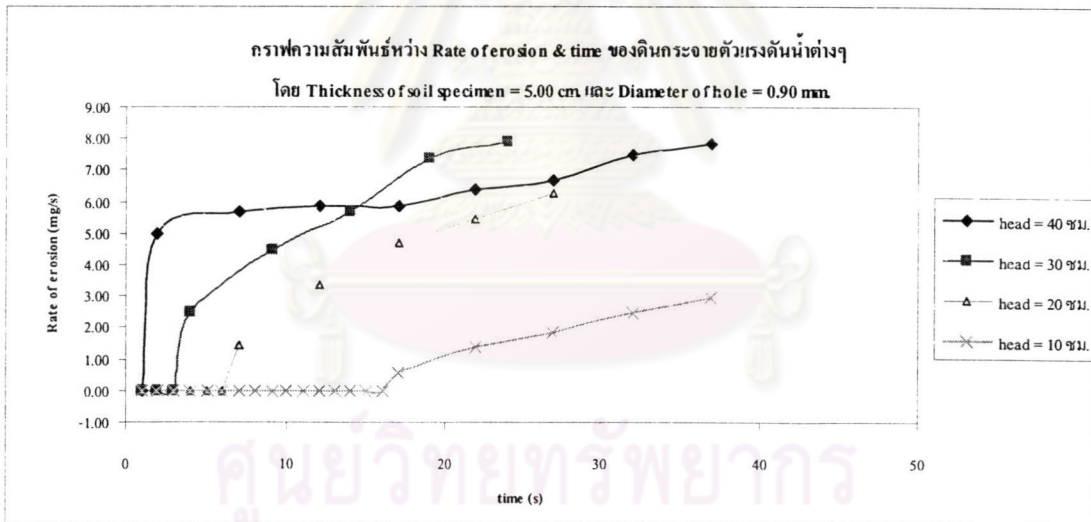
ภาพที่ 20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.50 มม.



ภาพที่ 21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.90 มม.



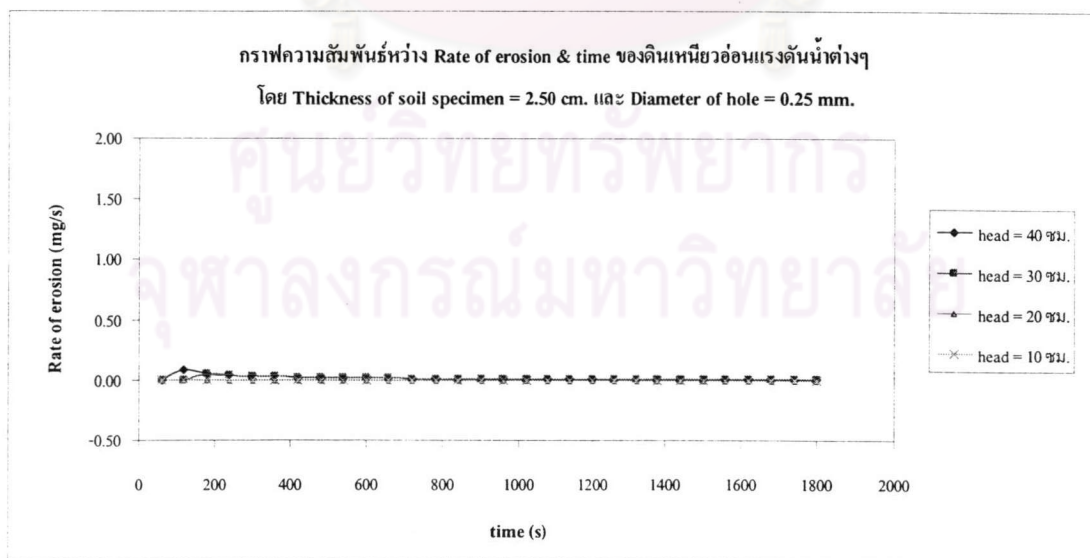
ภาพที่ 22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 5.0 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.50 มม.



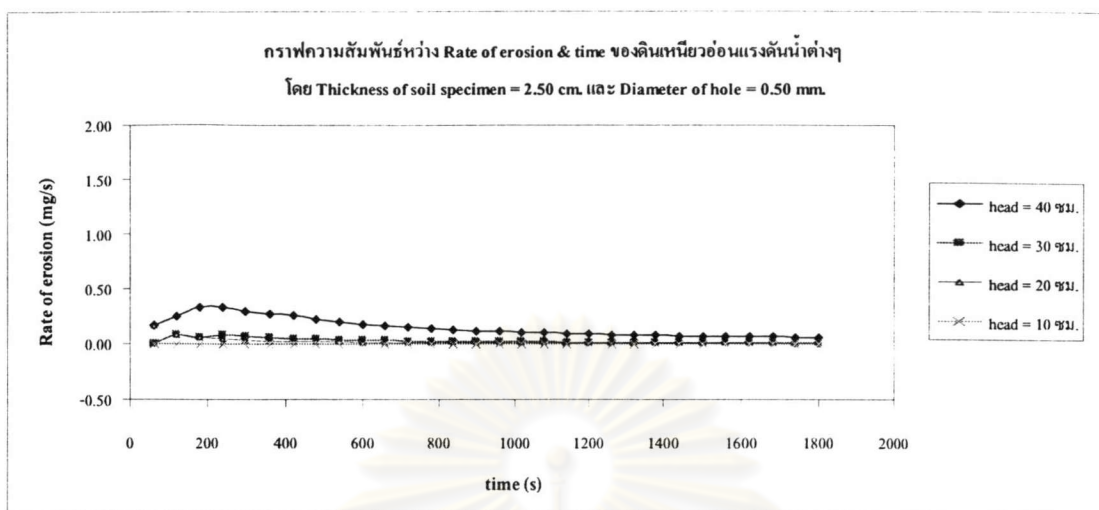
ภาพที่ 23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 5.0 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.90 มม.

(2) ดินเหนียว

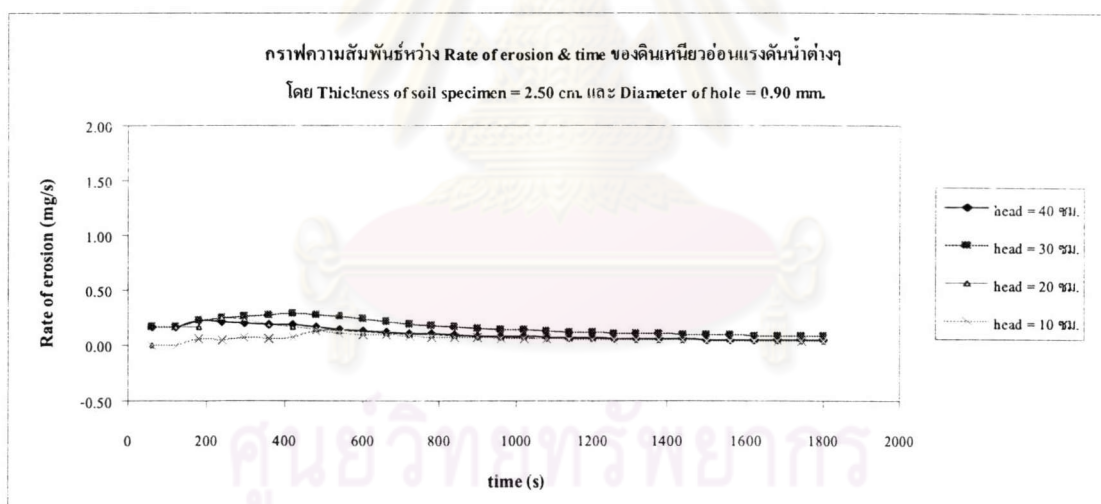
จากภาพที่ 24-28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะ (Rate of erosion) กับ เวลาที่ใช้ทดสอบ (time) ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยแบ่งตามความหนาของตัวอย่างดินและขนาดของรูเจาะที่ต่างกัน พบว่า ตัวแปรทั้งสามที่นำมาวิเคราะห์คือ แรงดันของน้ำ (Water head) ความหนาของตัวอย่างดินและขนาดของรูเจาะ ไม่มีผลต่ออัตราการกัดเซาะ เนื่องจากผลการทดสอบไม่เกิดการกัดเซาะขึ้น ทั้งที่ใช้ขนาดรูเจาะที่ใหญ่ขึ้นหรือใช้ความหนาที่มากขึ้นก็ไม่ส่งผลต่ออัตราการกัดเซาะเลย ทั้งนี้จากรูจะพบว่าช่วงแรกอัตราการกัดเซาะจะมีเกิดขึ้นบ้าง แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆปรากฏว่าไม่เกิดการกัดเซาะขึ้น จากการสังเกตระหว่างการทดสอบและพิจารณาตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเสร็จแล้ว พบว่า เม็ดดินที่หลุดออกมา มีลักษณะเป็นก้อนเล็กๆ ซึ่งยังเกาะกันอยู่และเมื่อดูที่ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วพบว่า บริเวณใกล้รูที่เจาะ ดินจะหลุดออกมาเป็นก้อน เมื่อทำการวิเคราะห์แล้ว พบว่า เม็ดดินบริเวณทางออกของรูเจาะไม่เกาะกันแน่น เนื่องจากเข็มที่ใช้เจาะไปทำให้เม็ดดินไม่เกาะกันแน่นเหมือนตอนที่ปักอัดใหม่ๆ แม้จะกระทุ้งเพื่อเก็บดิน (แตงดิน) ให้เรียบร้อย ก็ไม่ได้ช่วยให้ดินเกาะกันแน่นเหมือนเดิม ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบ แรงดันของน้ำก็จะดันดินส่วนนี้ออกมาในช่วงแรก ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย โดยดินที่หลุดออกมาจะมีลักษณะเป็นก้อน จึงทำให้เมื่อทำการหาปริมาณดินที่หลุดออกมาช่วงแรกจึงพบว่ามีปริมาณดิน และเมื่อนำมาหาอัตราการกัดเซาะจึงได้ค่าอัตราการกัดเซาะ แต่เมื่อเม็ดดินดังกล่าวหลุดไปแล้ว อัตราการกัดเซาะก็จะเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าไม่เกิดการกัดเซาะขึ้น



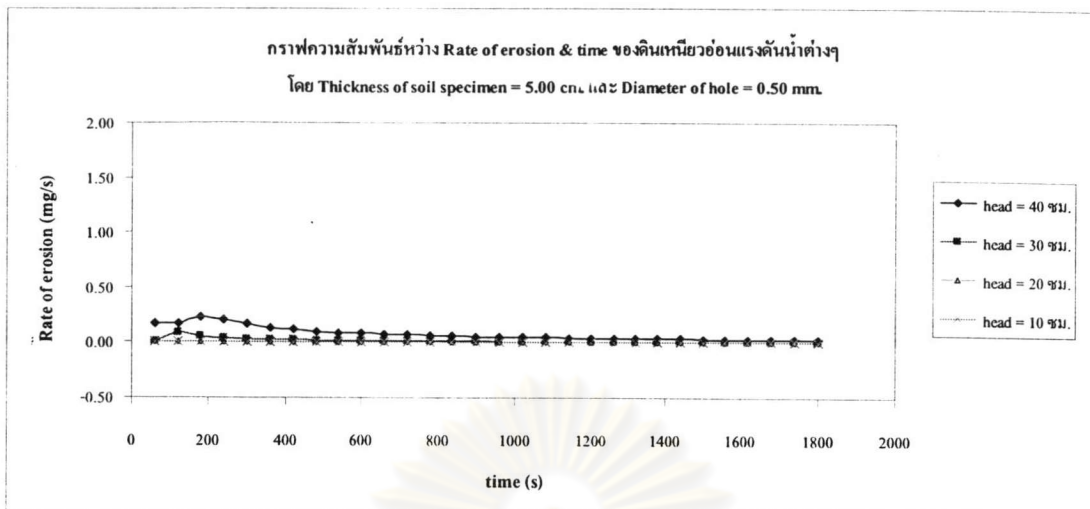
ภาพที่ 24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.25 มม.



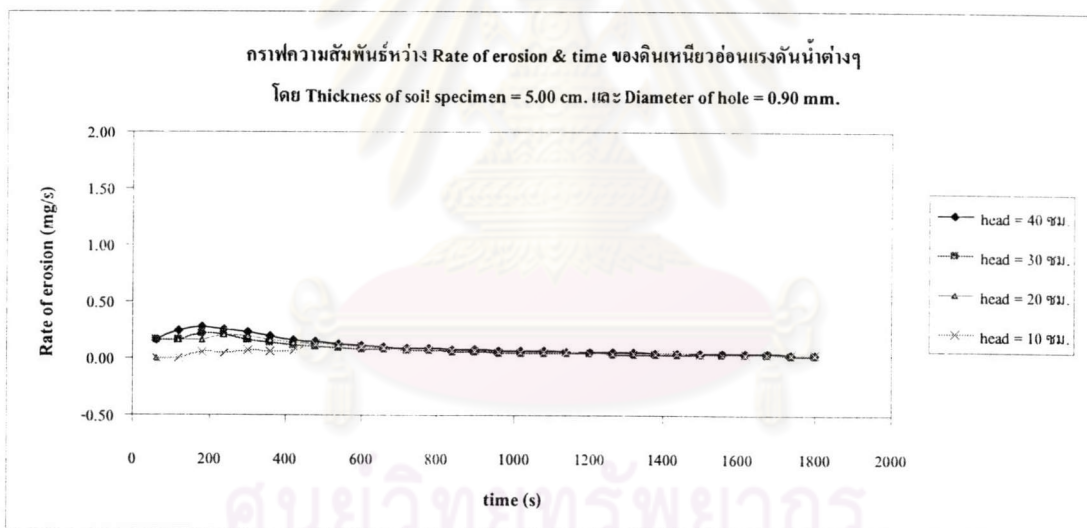
ภาพที่ 25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.50 มม.



ภาพที่ 26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 2.5 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.90 มม.



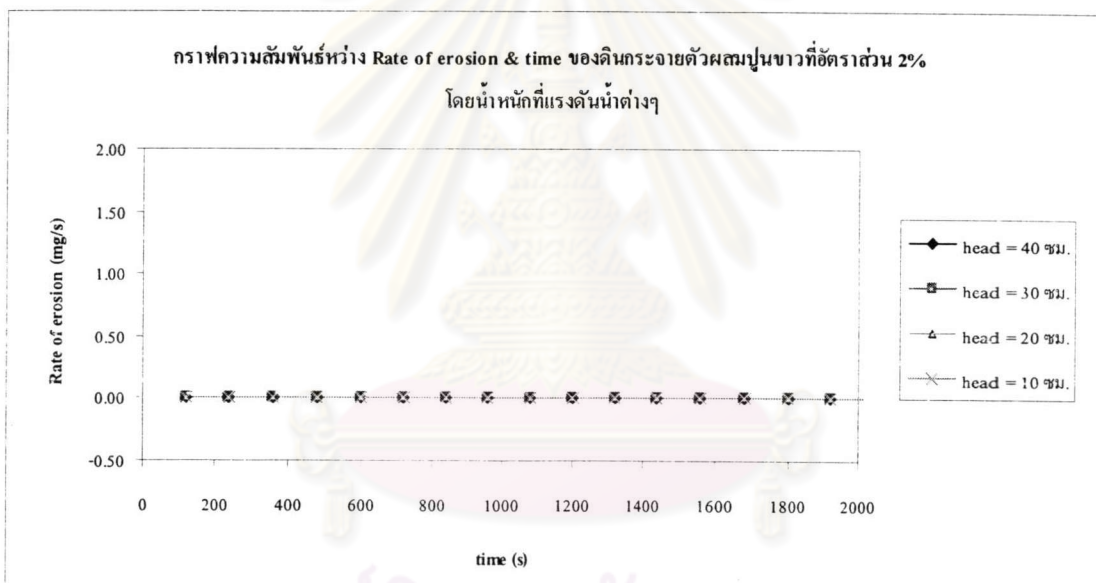
ภาพที่ 27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 5.0 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.50 มม.



ภาพที่ 28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินเหนียวที่ Water head ต่างๆ โดยความหนาตัวอย่างดิน 5.0 ซม. และขนาดรูเจาะ 0.90 มม.

(3) ดินกระจายตัวผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะ (Rate of erosion) กับ เวลาที่ใช้ทดสอบ (time) ของดินกระจายตัวผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักที่ Water head ต่างๆ พบว่า ตัวแปรทั้งสามที่นำมาวิเคราะห์ คือ แรงดันของน้ำ (Water head) ความหนาของตัวอย่างดินและขนาดของรูเจาะ ไม่มีผลต่ออัตราการกัดเซาะเลย เนื่องจากผลการทดสอบไม่เกิดการกัดเซาะขึ้น ทั้งที่ใช้ขนาดรูเจาะที่ใหญ่ขึ้นหรือใช้ความหนาที่มากขึ้นก็ไม่ส่งผลต่ออัตราการกัดเซาะเลย แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินกระจายตัวโดยผสมปูนขาวที่อัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักนั้นจะลดการกัดเซาะของดินได้

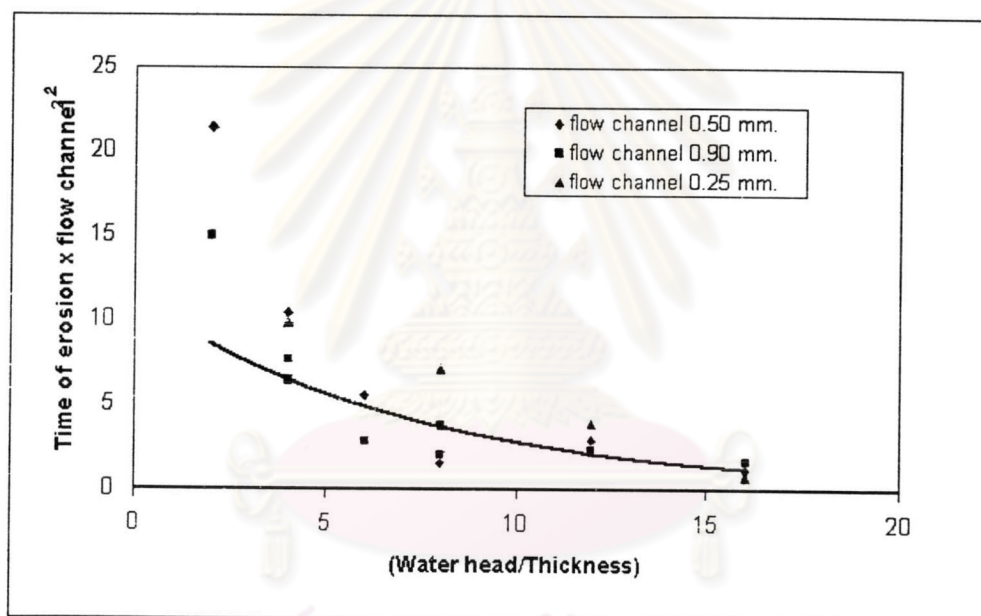


ภาพที่ 29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rate of erosion กับ time ของดินกระจายตัวผสมปูนขาวที่อัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักที่ Water head ต่างๆ

เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง (Time of erosion x flow channel²) กับ (Water head / Thickness of soil specimen) สำหรับดินกระจายตัว จะได้ดังภาพที่ 30

$$(\text{Time of erosion x flow channel}^2) = 16.22e^{-0.1646(\text{Water head / Thickness})}$$

สมการข้างต้นเหมาะสำหรับดินกระจายตัวที่เป็นดินประเภท SC (Clayey Sand) และจากภาพที่ 30 จะเห็นได้ว่า Time of erosion จะลดลงเมื่อ Water head เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ flow channel และ Thickness of soil specimen เดียวกัน นั่นคือ เวลาที่เริ่มกัดเซาะเกิดเร็วขึ้นเมื่อใช้แรงดันของน้ำที่สูงขึ้น



ภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (Time of erosion x flow channel²) กับ (Water head / Thickness of soil specimen) สำหรับดินกระจายตัว