



บทที่ 5

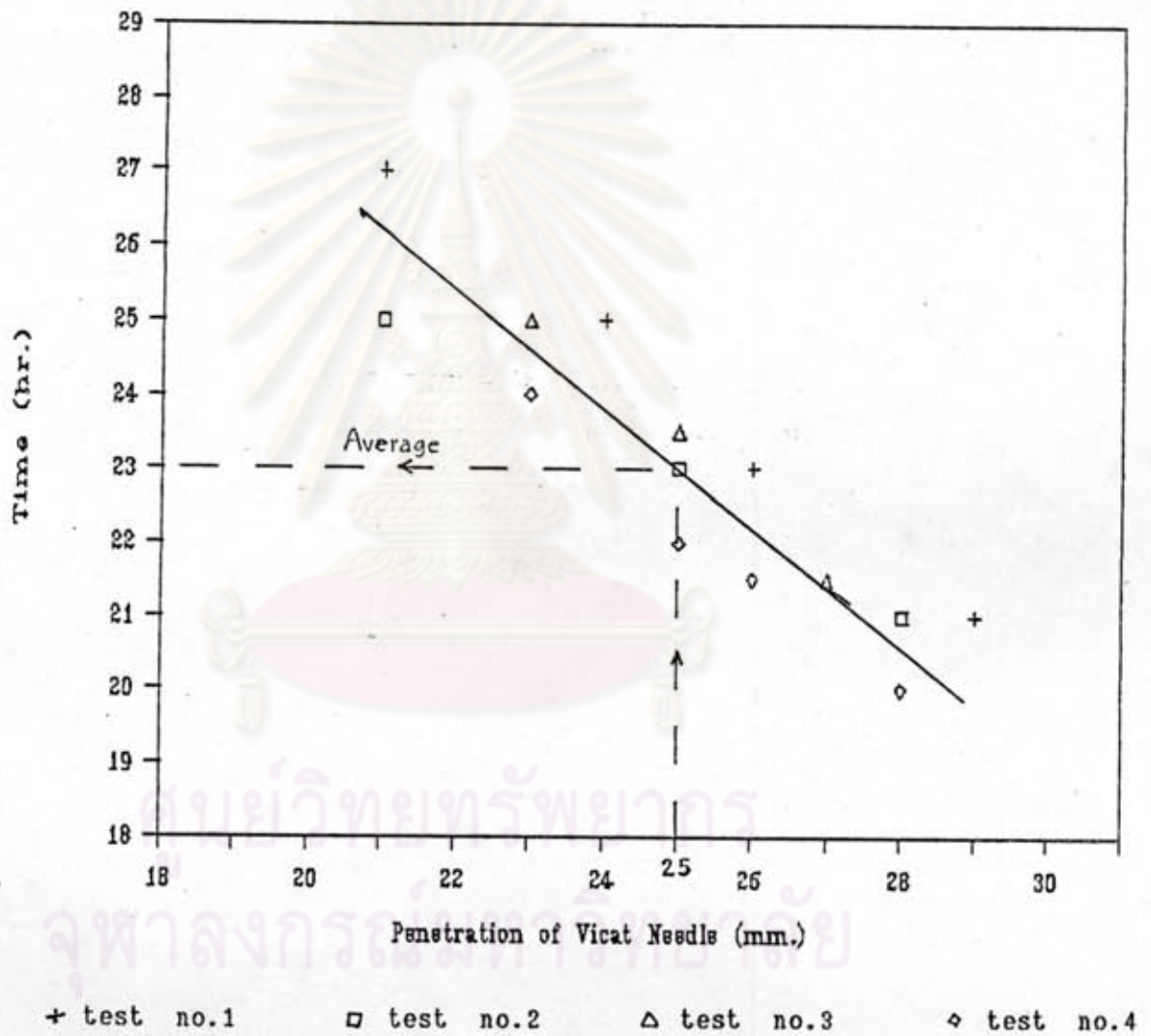
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1 ระยะเวลาการก่อตัว

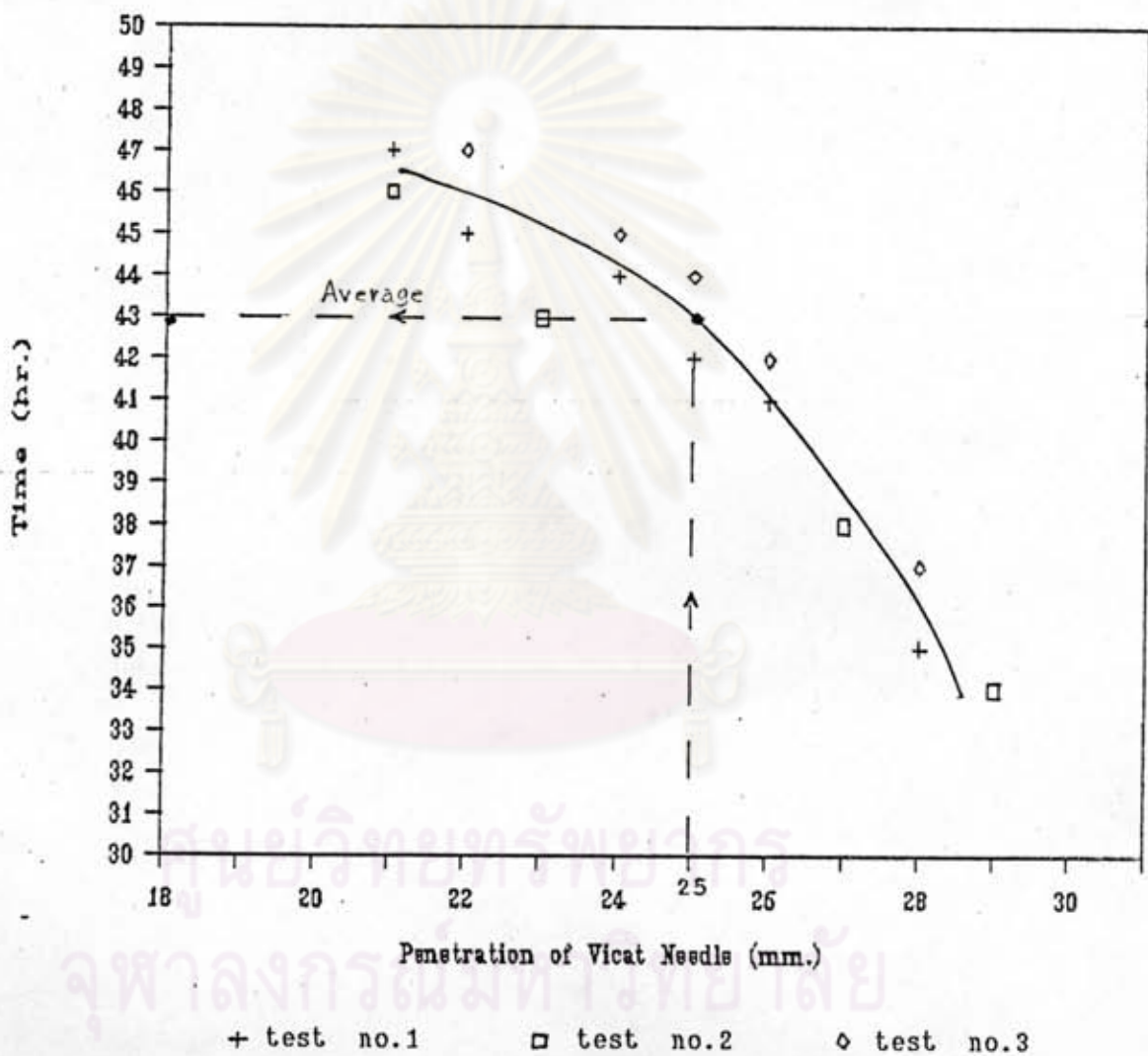
ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง เบนโทไนท์ สเลอร์ที่ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3:1 มีค่าอยู่ระหว่าง 22 - 24 ชั่วโมง (เฉลี่ย ประมาณ 23 ชั่วโมง) ระยะเวลาการก่อตัวของอัตราส่วนผสม 3.5:1 มีค่าอยู่ระหว่าง 41 - 44 ชั่วโมง (เฉลี่ยประมาณ 43 ชั่วโมง) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเมื่อเริ่มหล่อวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์จนถึงเวลาที่ทำการทดสอบ กับระยะการจมของเข็มผ่านวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงสำหรับอัตราส่วนผสม 3:1 แต่จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งสำหรับอัตราส่วนผสม 3.5:1 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบอยู่ในช่วง 24°C - 27°C ส่วนที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ ไม่สามารถหาระยะเวลาการก่อตัวได้

5.2 กำลังรับแรงอัดแบบ unconfine

ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์ ที่มีอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ลักษณะของเส้นกราฟโดยทั่วไปจะได้ว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์สเลอร์ที่ต่อปูนซีเมนต์ 3 : 1, 3.5 : 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain จะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดหนึ่ง หลังจากนั้น stress จะลดลงอย่างรวดเร็ว เส้นกราฟจึงแสดงจุด peak อย่างชัดเจน และไม่ปรากฏ residual strength แต่อย่างใด สำหรับอัตราส่วนผสม 4 : 1 ลักษณะของ เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain จะแสดงจุด peak เช่นเดียวกัน แต่จะไม่ชัดเจนเท่าไรนักและการลดลงของ stress ภายหลังจากผ่านจุด peak จะช้ากว่ากรณี ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 และ 3.5 : 1 สำหรับอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 กราฟ



รูปที่ 5.1 ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วนผสม 3 : 1



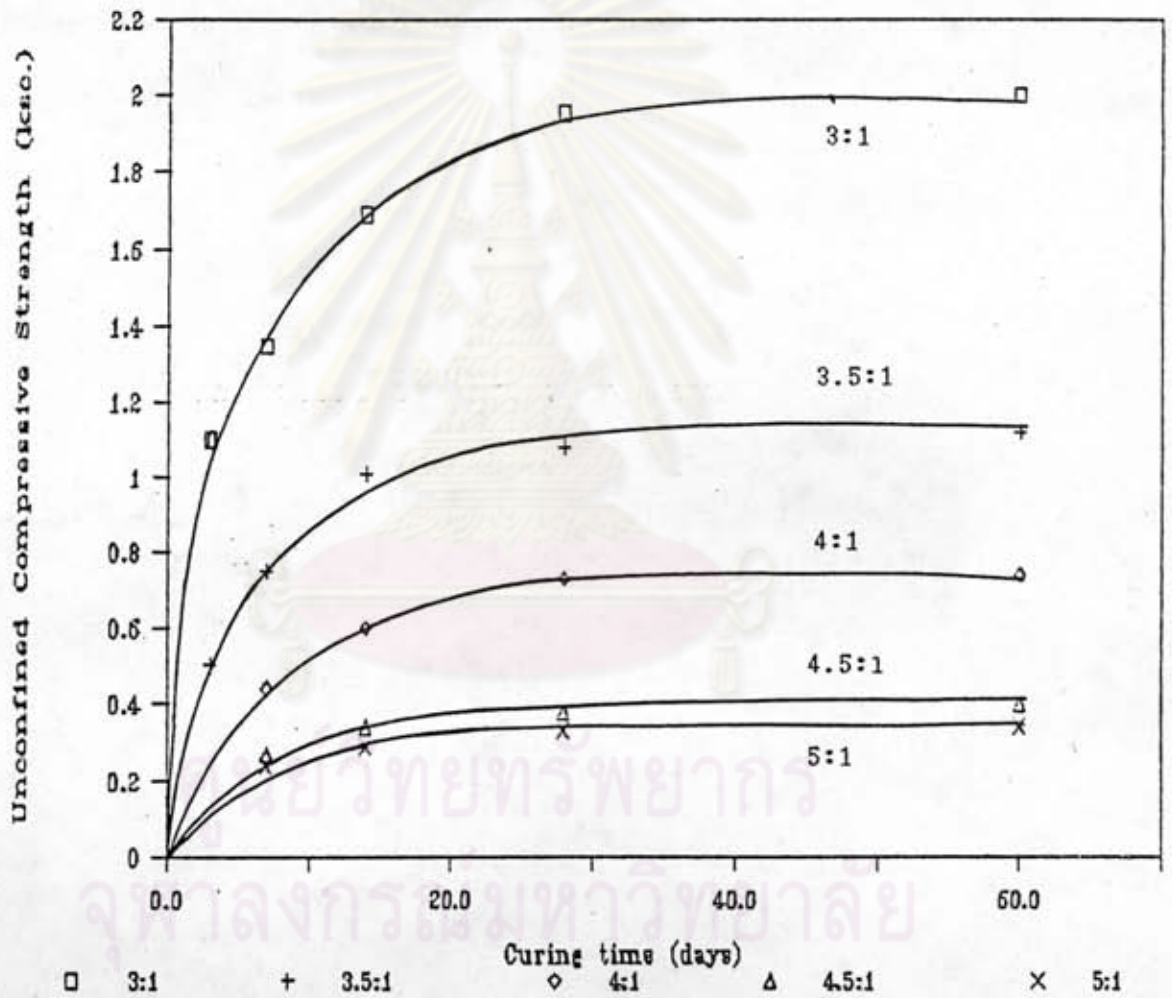
รูปที่ 5.2 ระยะเวลาก่อตัวของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วนผสม 3.5 : 1

ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จะเป็นเส้นตรงในช่วงแรก ต่อจากนั้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง ซึ่ง stress ค่อนข้างจะมีค่าคงที่ หลังจากนั้น stress จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ที่มีอัตราส่วนผสม 3 : 1, 3.5 : 1 และ 4 : 1 จึงพิจารณาที่จุด peak ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain สำหรับที่อัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 จะพิจารณาที่จุดซึ่ง stress มีค่าค่อนข้างจะคงที่

รูปที่ 5.3 แสดงผลของระยะเวลาบ่มต่อการพัฒนากำลังของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์ จากรูปจะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสม 3 : 1, 3.5 : 1 และ 4 : 1 จะมีการพัฒนา กำลังอย่างชัดเจนในช่วง 14 วันแรกนับจากเริ่มบ่ม หลังจากนั้นการพัฒนา กำลังจะเป็นอย่างช้า ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะเวลาบ่มมากกว่า 28 วันไปแล้ว การพัฒนา กำลังจะเป็นไปอย่างช้ามาก สำหรับที่อัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 มีการพัฒนา กำลังไม่มากนักหรือเกือบไม่มีการพัฒนา กำลังเลย กำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 28 วัน แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 กำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ เมื่อระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 28 วัน

อัตราส่วนผสม BS : C	กำลังรับแรงอัด (ksc.)
3 : 1	1.92
3.5 : 1	1.08
4 : 1	0.73
4.5 : 1	0.38
5 : 1	0.33



รูปที่ 5.3 การพัฒนากำลังของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์

ในการพิจารณาถึงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ สเลอรี่ ที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัด จะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับ cement ratio โดยที่ cement ratio หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเบนโทไนท์ สเลอรี่ โดยน้ำหนัก ดังนี้

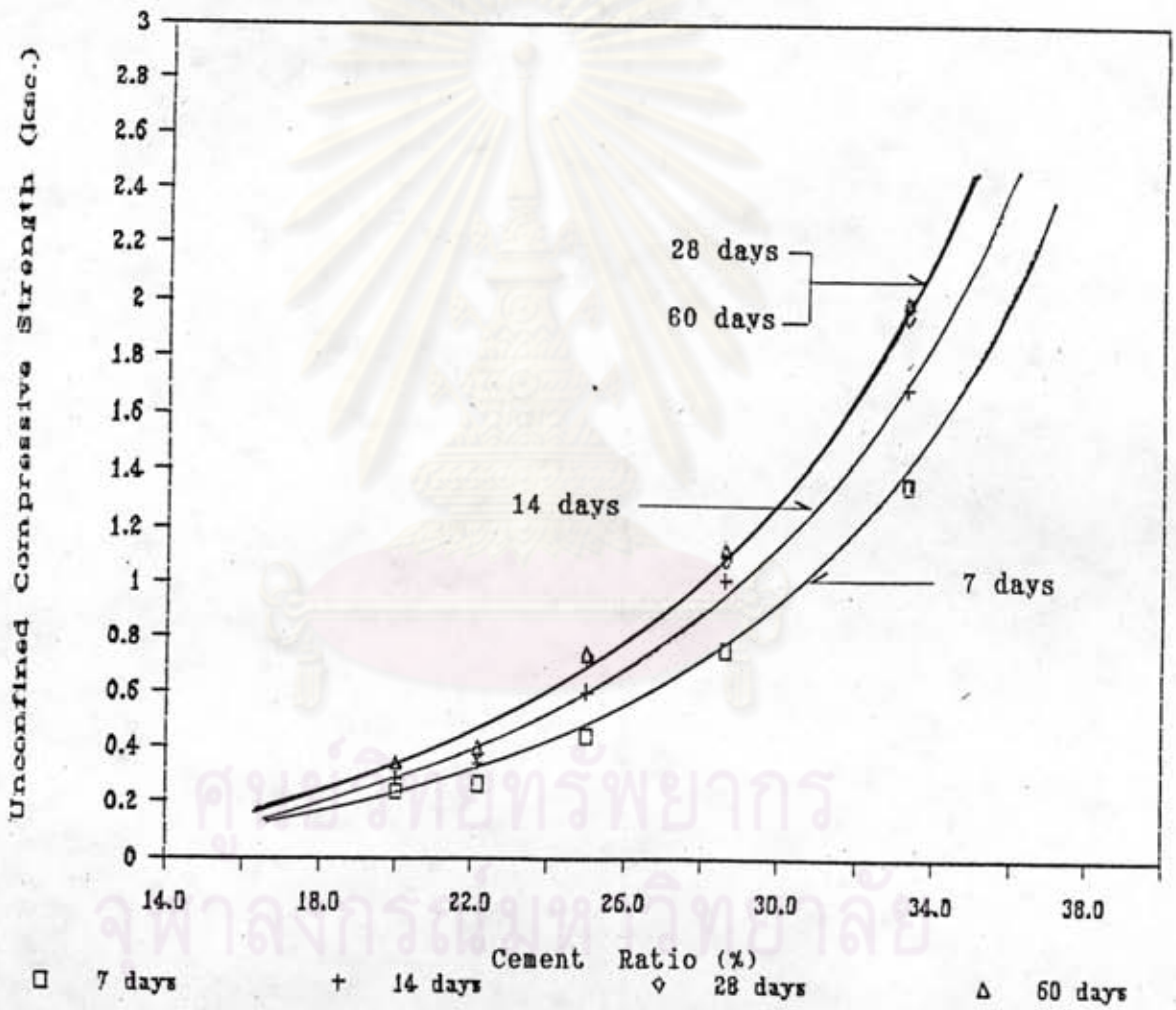
อัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์สเลอรี่ต่อปูนซีเมนต์	Cement Ratio, %
3 : 1	33.3
3.5 : 1	28.6
4 : 1	25.0
4.5 : 1	22.2
5 : 1	20.0

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับ cement ratio ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4

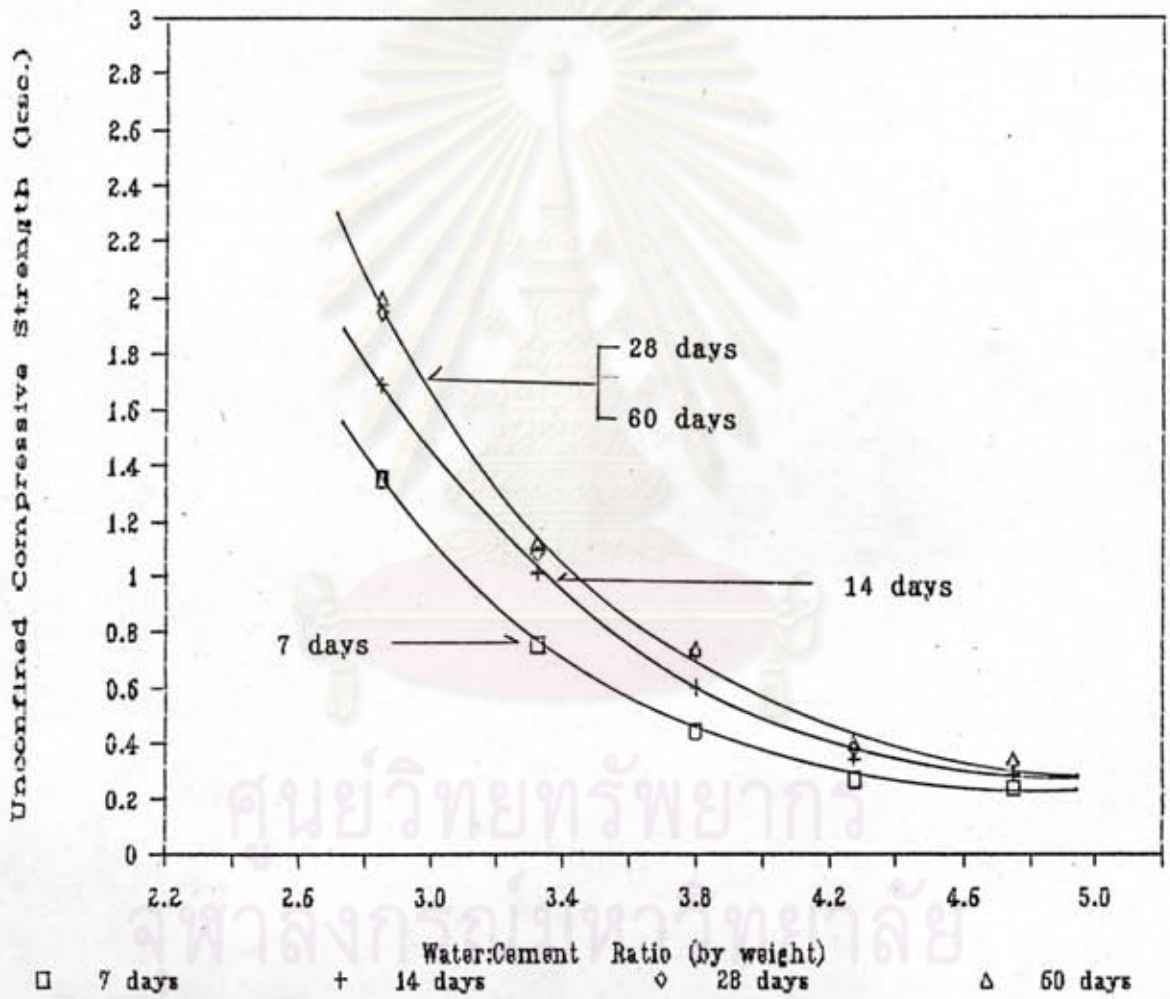
ตามที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่า กำลังของปูนซีเมนต์เมื่อแข็งตัวจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่ใช้ผสม หรือที่เรียกว่า water-cement ratio การพิจารณาถึงผลของ water-cement ratio ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ จะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับ water-cement ratio ค่า water-cement ratio ของแต่ละอัตราส่วนผสมเป็นดังนี้คือ

อัตราส่วนผสม	เบนโทไนท์ : น้ำ : ซีเมนต์	water-cement ratio
3 : 1	0.15 : 2.85 : 1	2.85
3.5 : 1	0.175 : 3.325 : 1	3.325
4 : 1	0.2 : 3.8 : 1	3.8
4.5 : 1	0.225 : 4.275 : 1	4.275
5 : 1	0.25 : 4.75 : 1	4.75

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับ water-cement ratio ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์



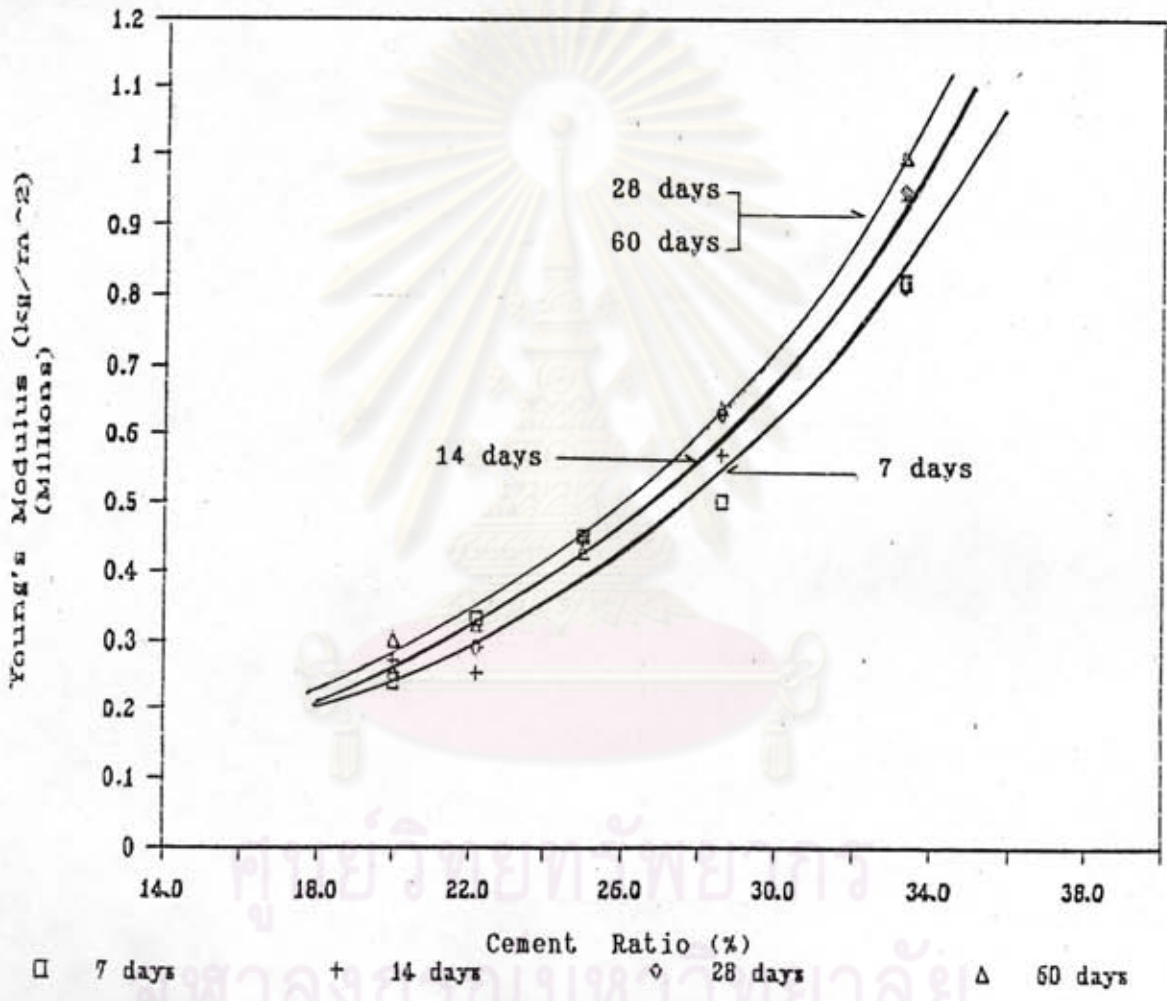
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับ water-cement ratio ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์

ค่า Modulus of elasticity ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนผสม 3 : 1 และ 3.5 : 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม แต่จะมีค่าเกือบคงที่สำหรับอัตราส่วนผสม 4 : 1, 4.5 : 1 และ 5 : 1 ตามลำดับ รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of elasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน ค่า Modulus of elasticity ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 28 วัน แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 Modulus of Elasticity ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 28 วัน

อัตราส่วนผสม BS : C	Modulus of elasticity (kg/m^2)
3 : 1	9.5×10^5
3.5 : 1	6.3×10^5
4 : 1	4.5×10^5
4.5 : 1	2.9×10^5
5 : 1	2.5×10^5

ศูนย์วิทยพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of elasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม

5.3 การซึมผ่านของน้ำ

5.3.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำตามระยะเวลา

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในแนวนอนของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ กัน เมื่อเกรเดียนต์การไหลมีค่า 70 (อุณหภูมิของน้ำโดยเฉลี่ยเท่ากับ 27 C) แสดงในรูปที่ 5.7 จากรูปจะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์สเลอรีที่คอปูนซีเมนต์ 3 : 1 , 3.5 : 1 และ 4 : 1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น สำหรับที่อัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 เกือบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเลย (การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะพิจารณาในรูปของเลขยกกำลัง ที่มีเลขนัยสำคัญ 2 ตัว ยกตัวอย่างเช่น อัตราส่วนผสม 3 : 1 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ 7 วัน และ 50 วัน เท่ากับ 6.0×10^{-5} และ 2.2×10^{-5} cm./sec ส่วนที่อัตราส่วนผสม 4.5 : 1 จะมีค่าเท่ากับ 1.4×10^{-4} และ 1.1×10^{-4} cm./sec ตามลำดับ) และจากลักษณะของเส้นกราฟในแต่ละอัตราส่วนผสมจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าเกือบคงที่เมื่อระยะเวลาบ่มเกินกว่า 50 วัน ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 50 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินชนิดต่างๆในตารางที่ 5.4 จะได้ว่าวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วงของ silt - very fine sand

ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในแนวนอน ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ (i=70) เมื่อระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 50 วัน

อัตราส่วนผสม BS : C	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm./sec.)
3 : 1	2.2×10^{-5}
3.5 : 1	5.7×10^{-5}
4 : 1	8.2×10^{-5}
4.5 : 1	1.1×10^{-4}
5 : 1	1.2×10^{-4}

ตารางที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินชนิดต่างๆ

k (cm/sec)	Drainage	Soil Type	Determination of k							
			Pumping tests. Reliable if prop- erly conducted	Constant head permeameter- reliable	Falling-head permeameter	Reli- able	Computation from grain size			
10 ² 10 ¹	Good Good	Clean gravels Clean gravels								
1.0 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴	Good Good Good Good Good	Clean sands Clean sand and gravel mixtures								
10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶	Poor Poor	Very fine sands Organic and inor- ganic silts, mix- tures of sand silt and clay, glacial till, stratified clay deposits.								
10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹	Practically imper- vious	Impervious soils, for example, ho- mogeneous clays below zone of weathering.	Fairly reliable	Unstable. Much experience required	Compu- tation from consolida- tion data (reliable)					

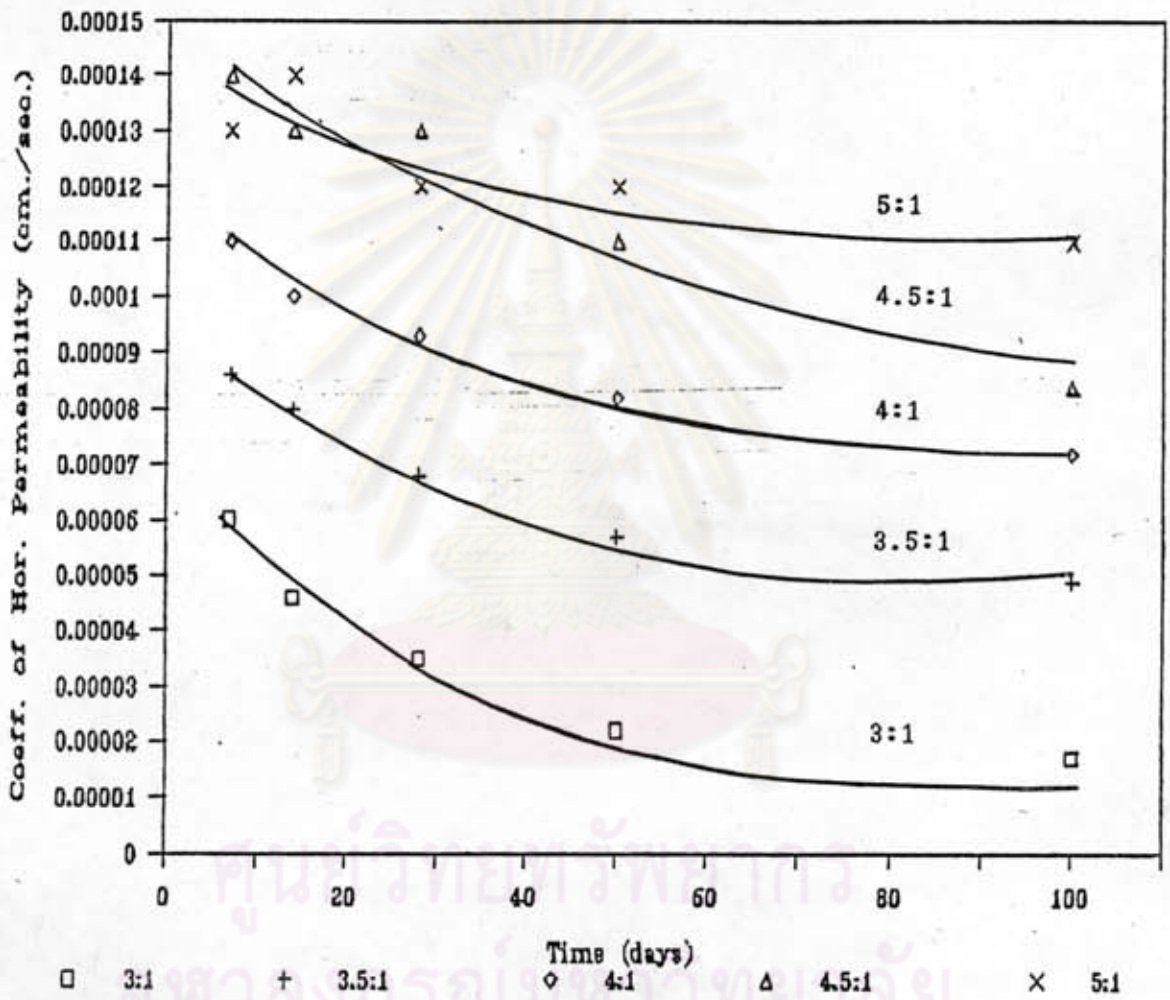
After Casagrande and Fadum (1940).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

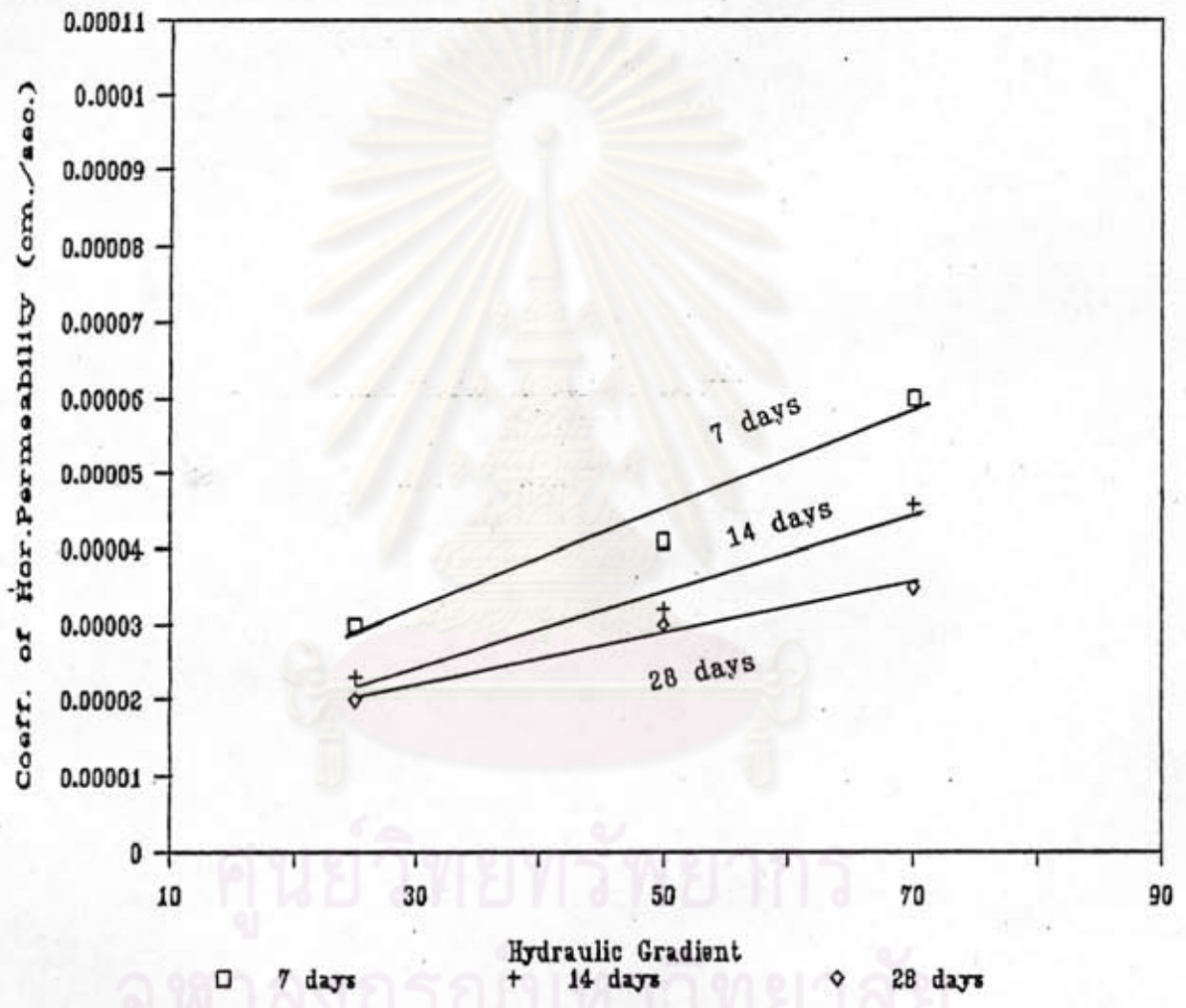
5.3.2 ผลของการแปรเปลี่ยนที่การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

เมื่อการแปรเปลี่ยนที่การไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการเพิ่มจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงสำหรับอัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์สเลอรีที่ต่อปูนซีเมนต์ 3 : 1, 3.5 : 1 และ 4 : 1 แต่จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง สำหรับอัตราส่วน 4.5 : 1 และ 5 : 1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 - 5.12 ที่อัตราส่วน 3 : 1 จะเห็นได้ชัดว่าความชันของเส้นกราฟจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์เพิ่มขึ้น การแปรเปลี่ยนที่การไหลจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยลง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม (cement ratio) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในแนวนอน เมื่อการแปรเปลี่ยนที่การไหลมีค่าเป็น 25, 50 และ 70 แสดงไว้ในรูปที่ 5.13 - 5.15 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในแนวนอนกับ water-cement ratio เมื่อการแปรเปลี่ยนที่การไหลมีค่าเป็น 25, 50 และ 70 ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.16 - 5.18 ตามลำดับ

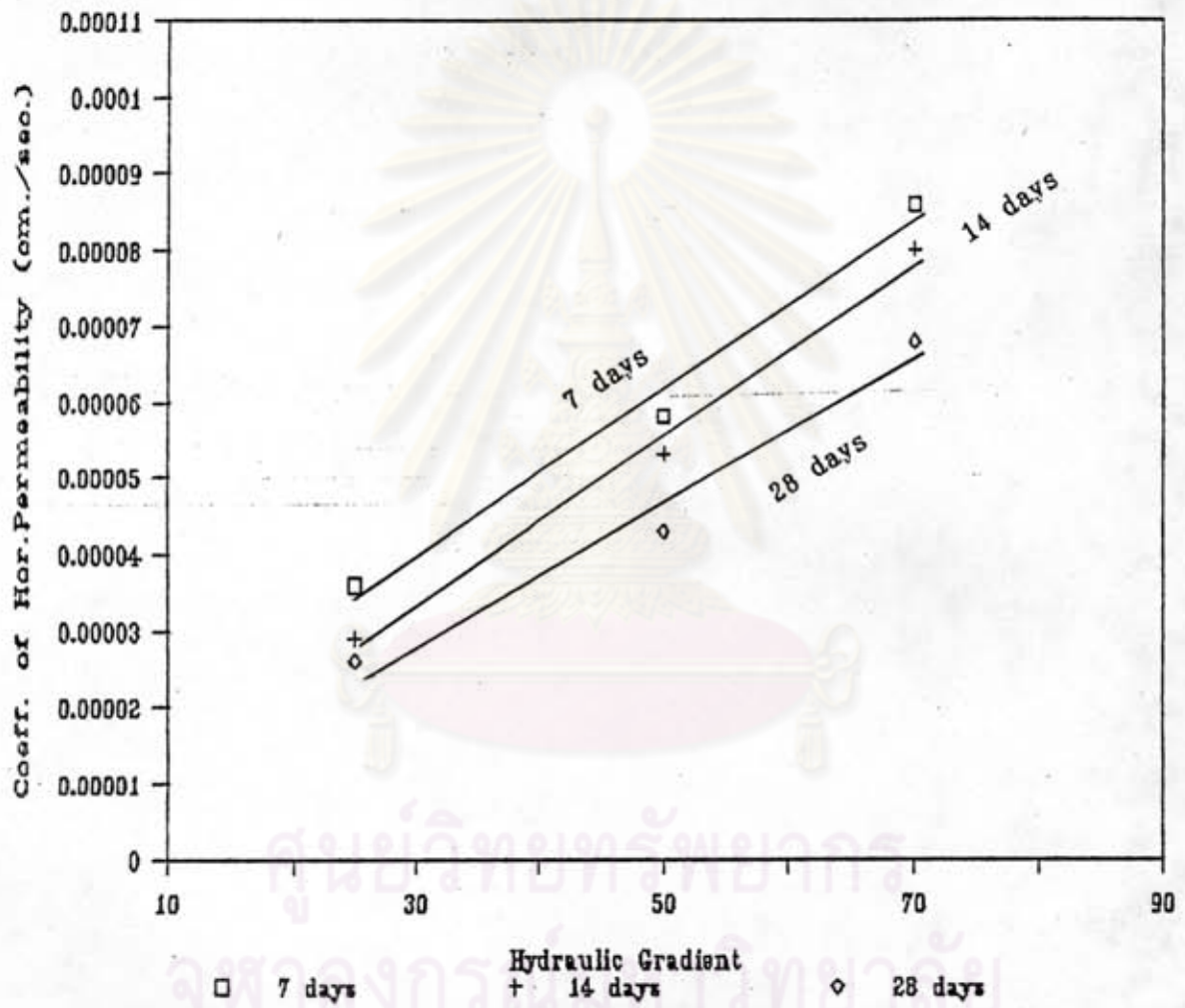
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



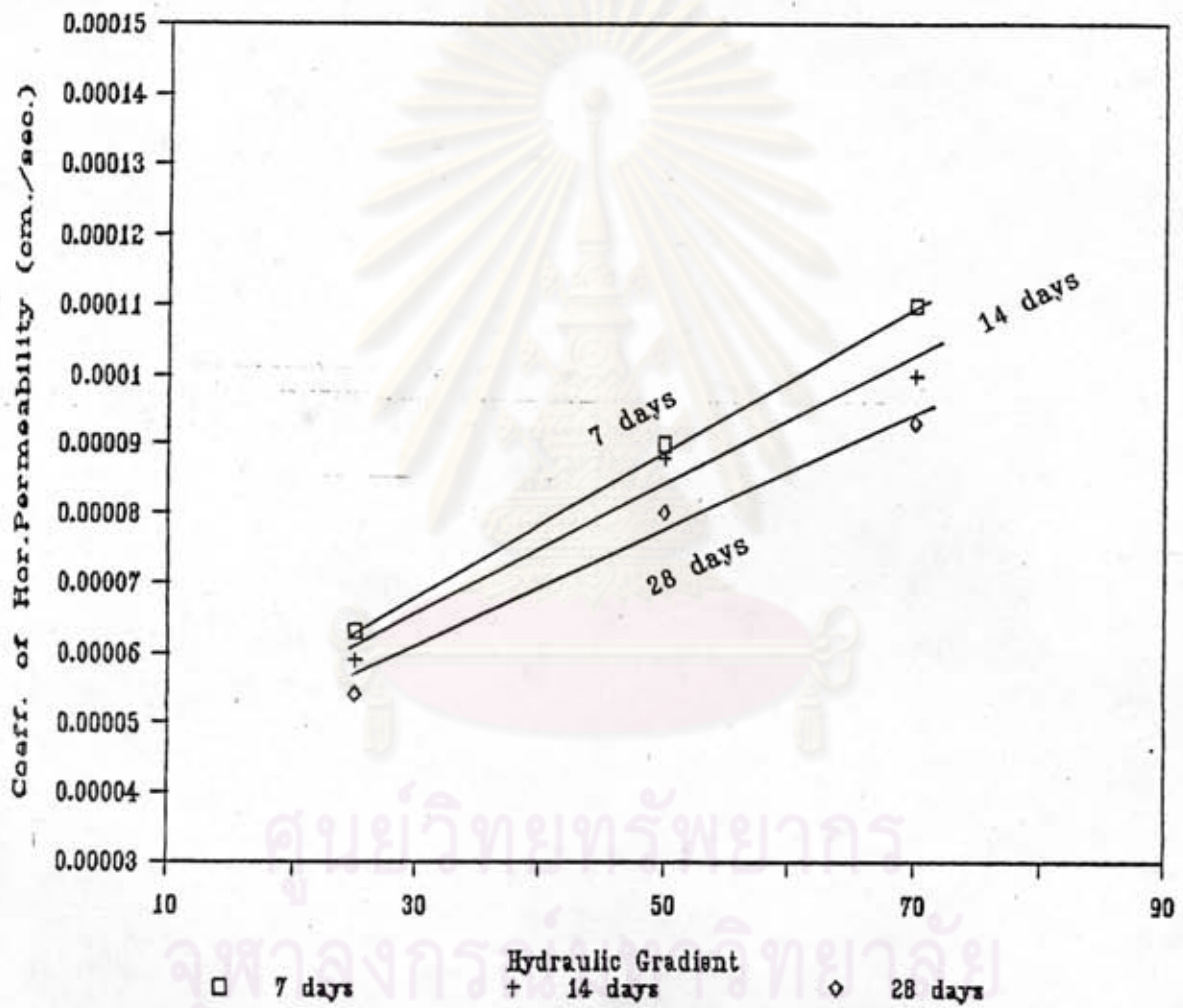
รูปที่ 5.7 ผลของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (i=70)



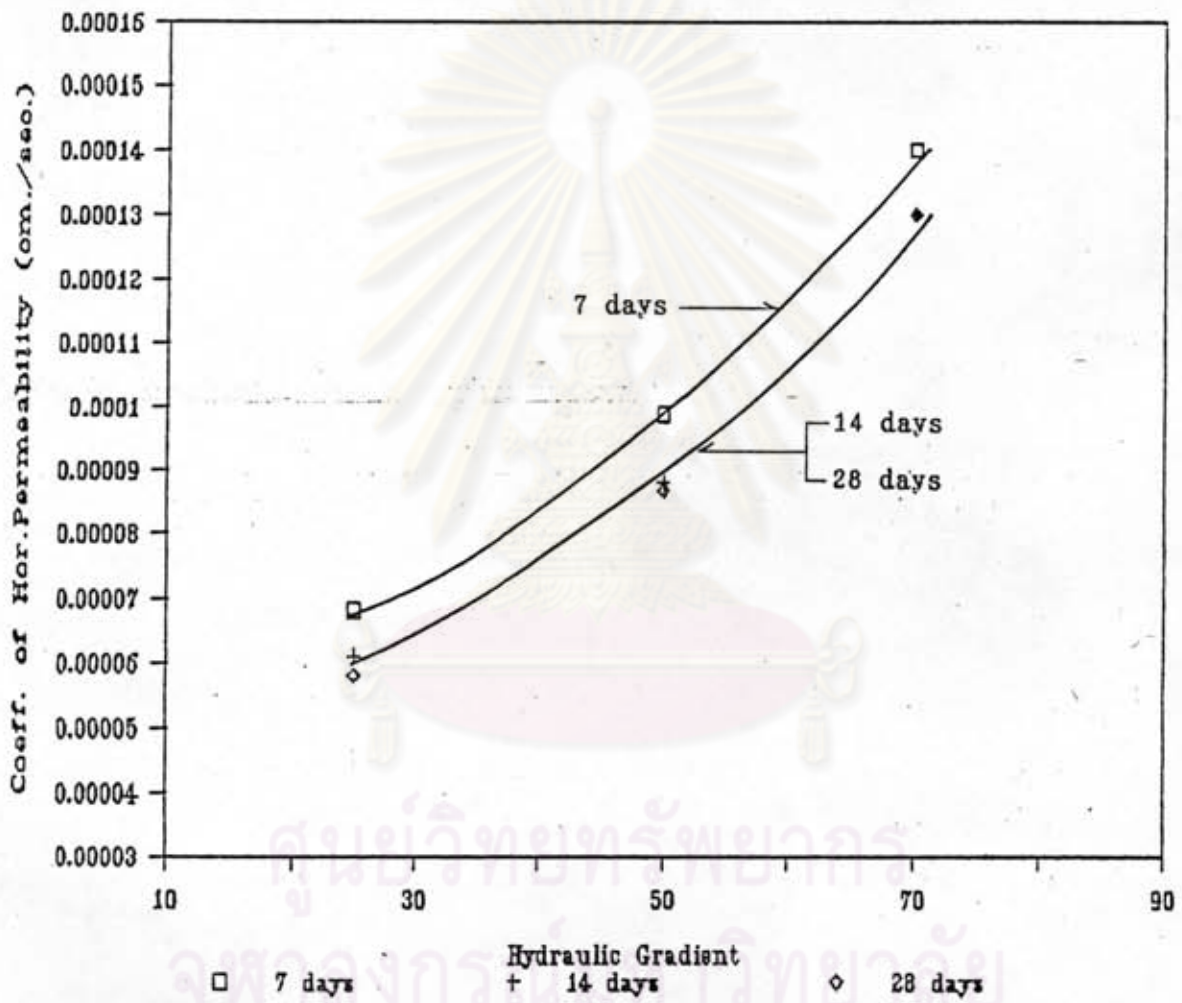
รูปที่ 5.8 ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 3 : 1.



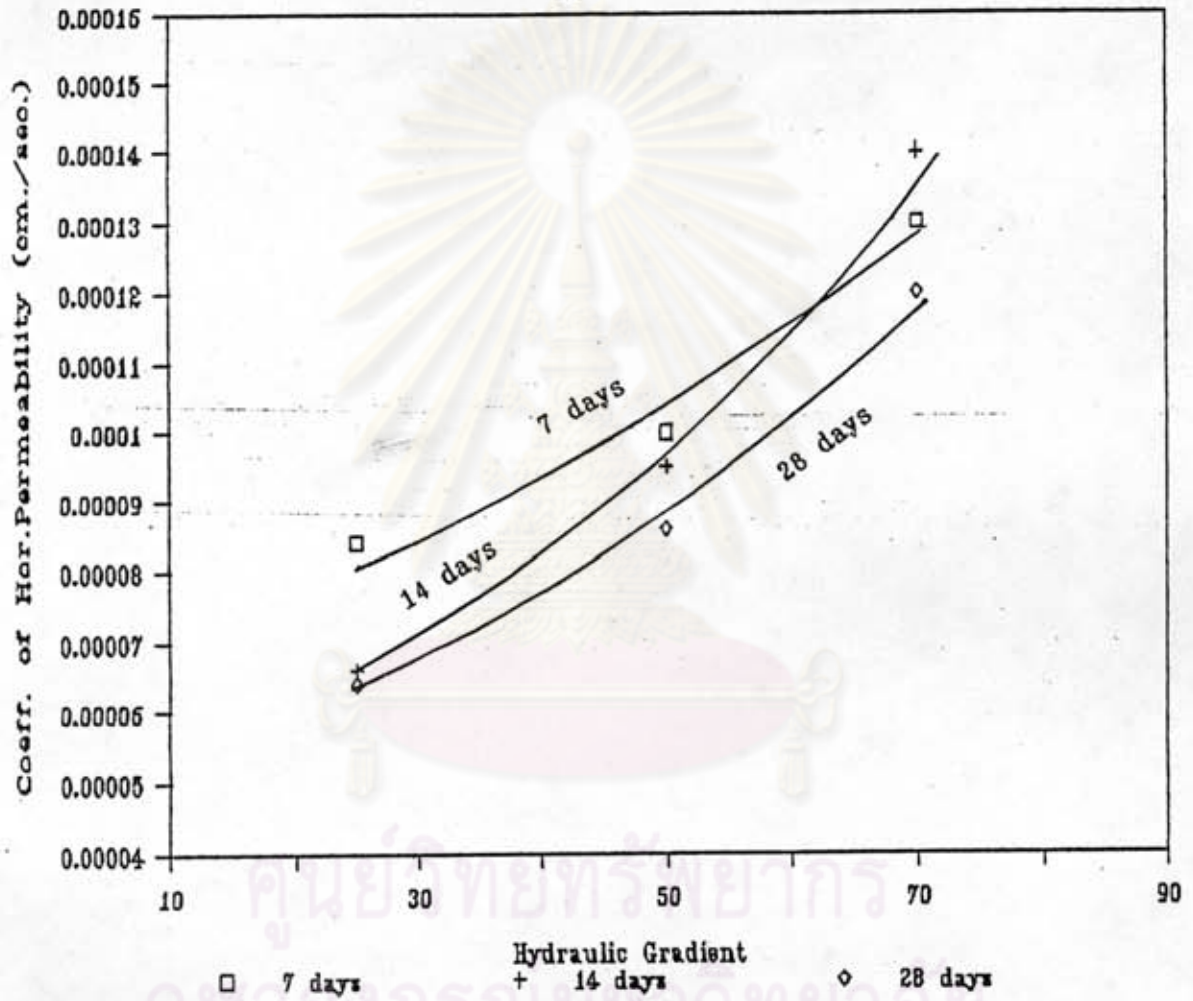
รูปที่ 5.9 ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 3.5 : 1



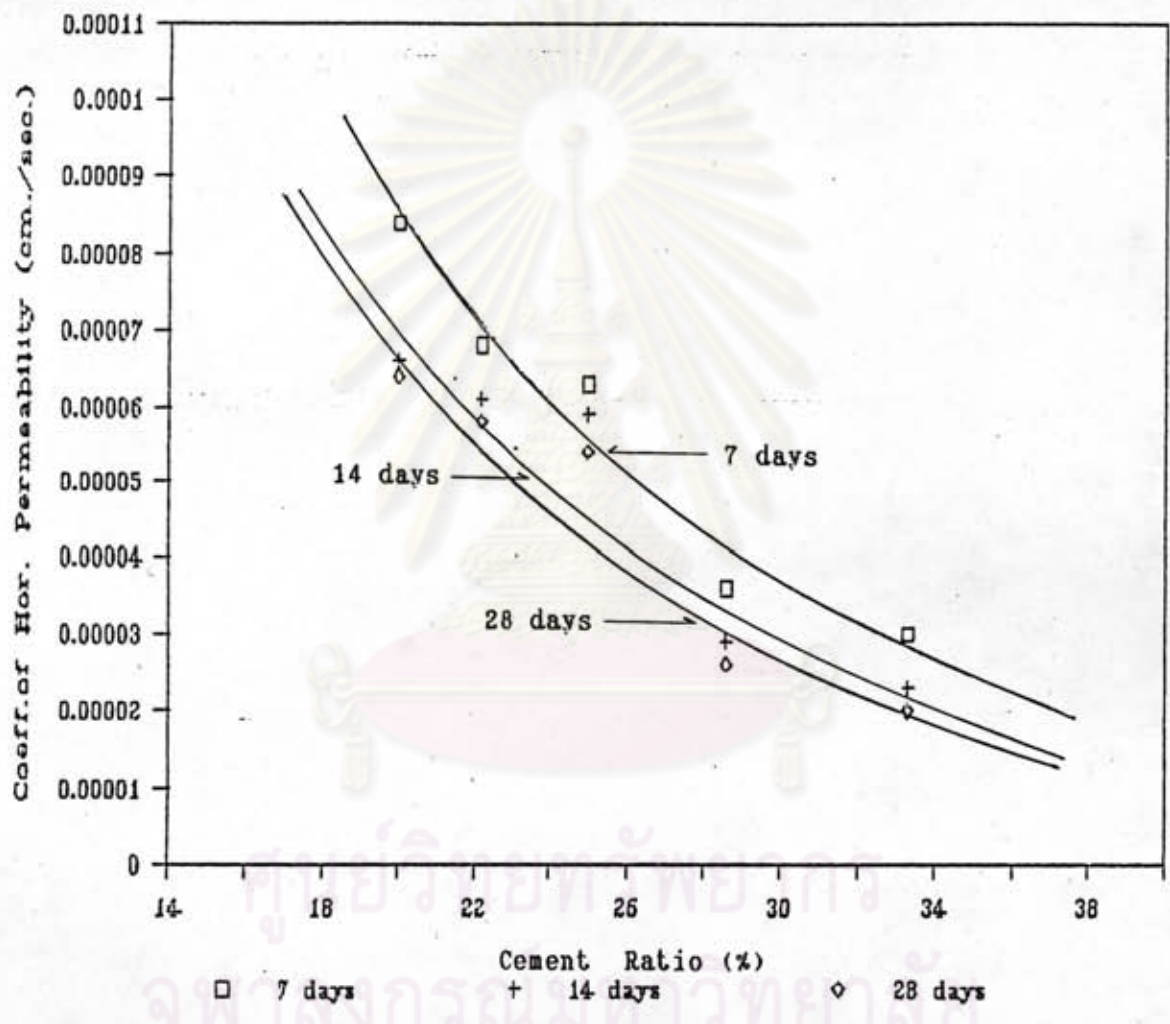
รูปที่ 5.10 ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
สำหรับอัตราส่วนผสม 4 : 1



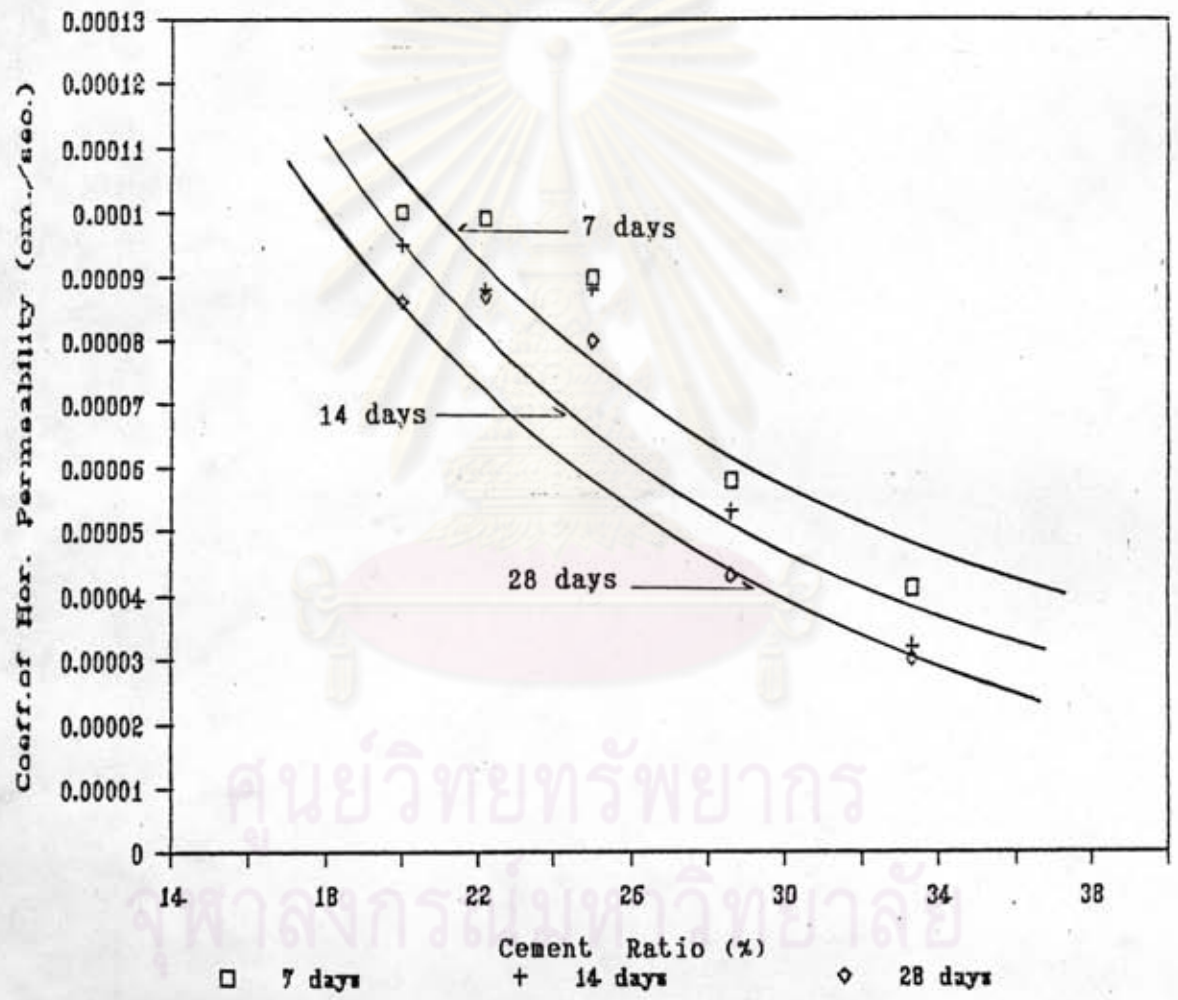
รูปที่ 5.11 ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
สำหรับอัตราส่วนผสม 4.5 : 1



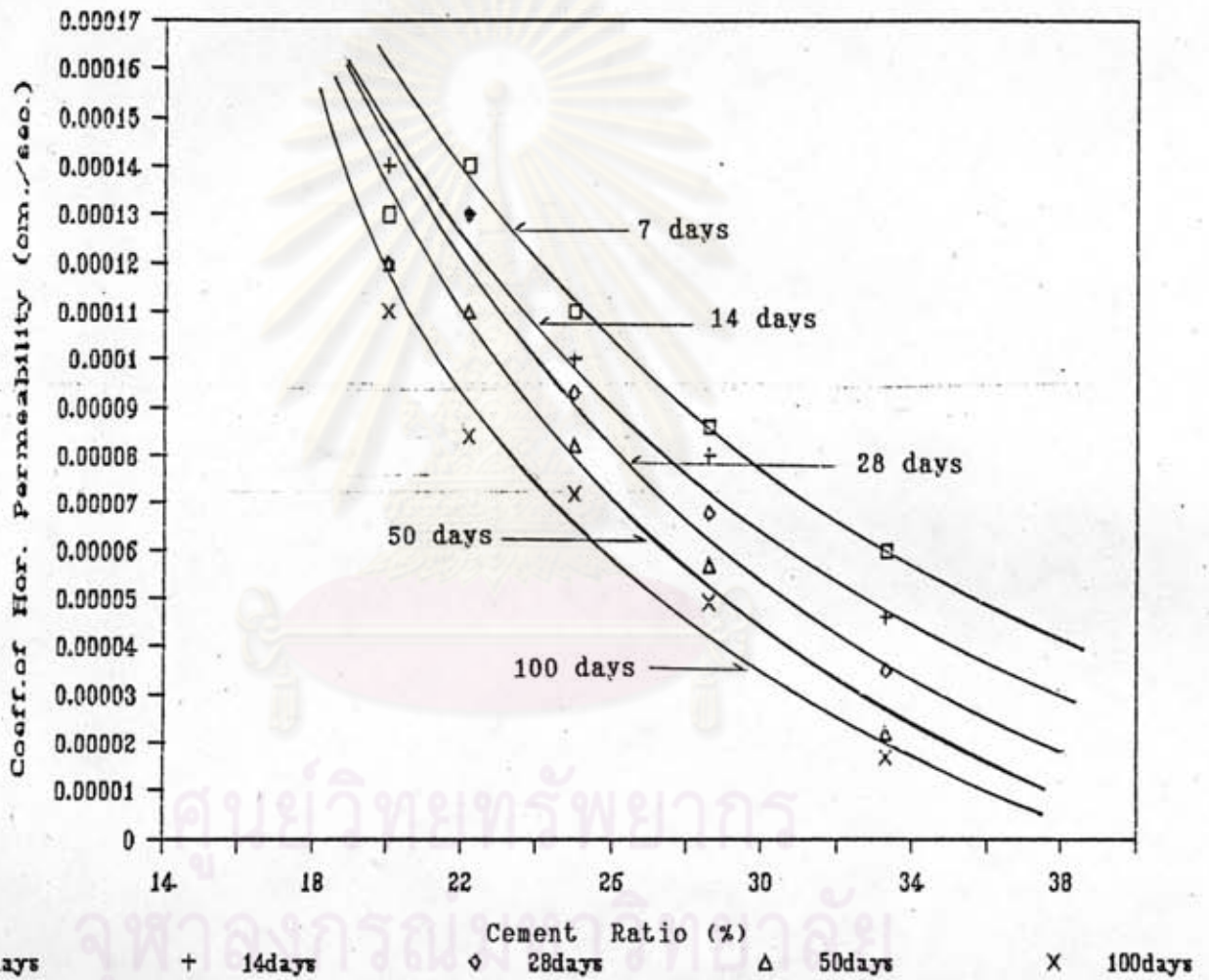
รูปที่ 5.12 ผลของเกรเดียนท์การไหลที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
สำหรับอัตราส่วนผสม 5 : 1



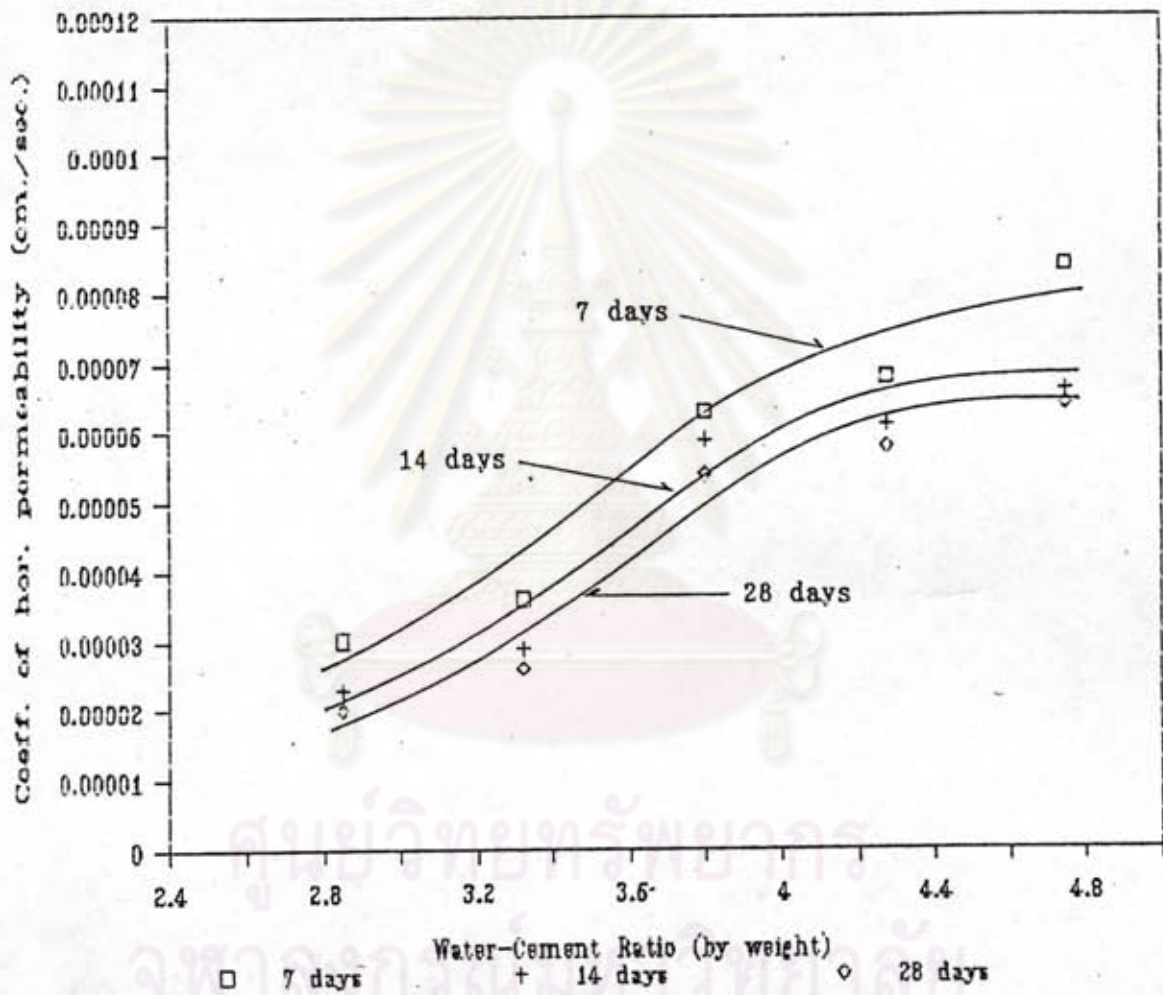
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 25



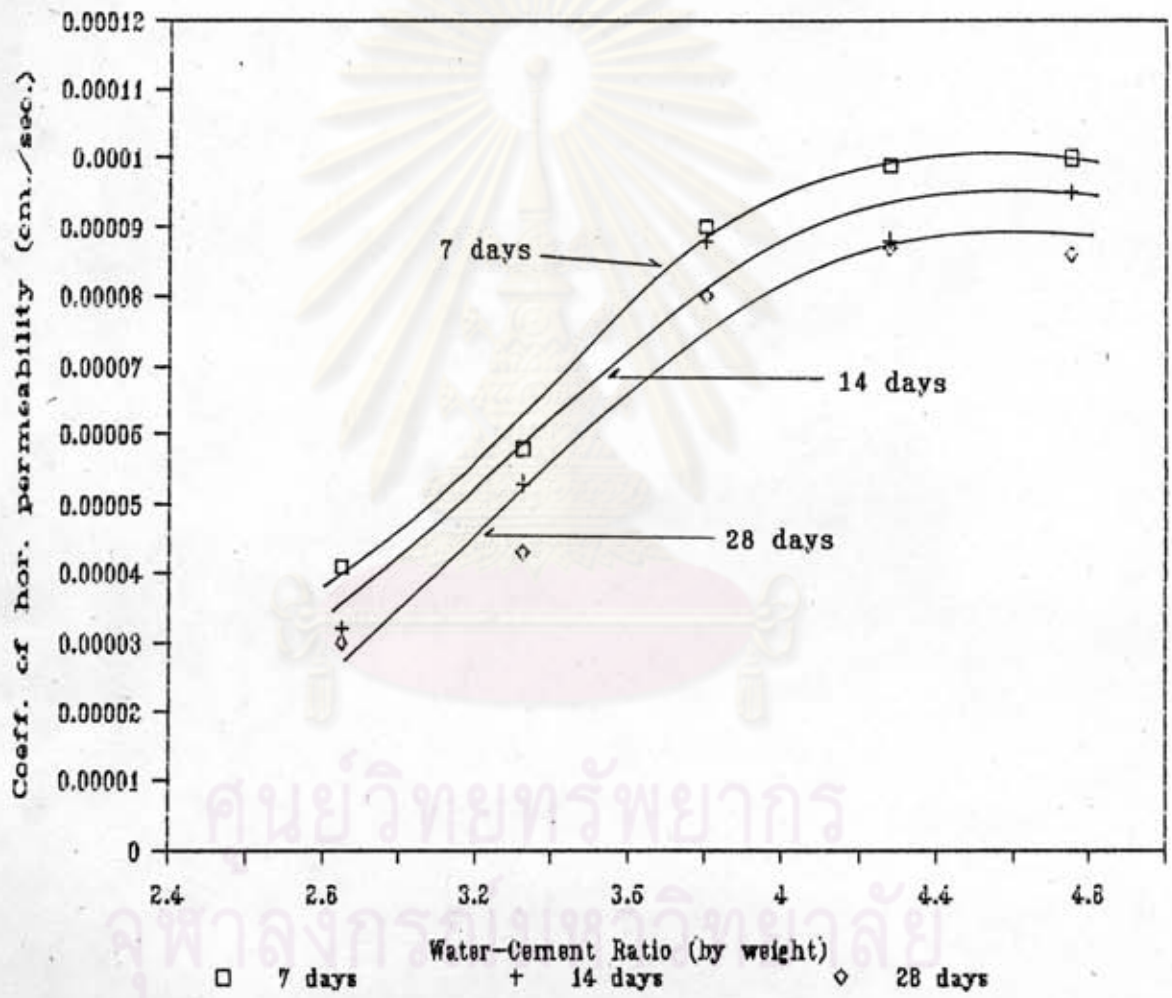
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 50



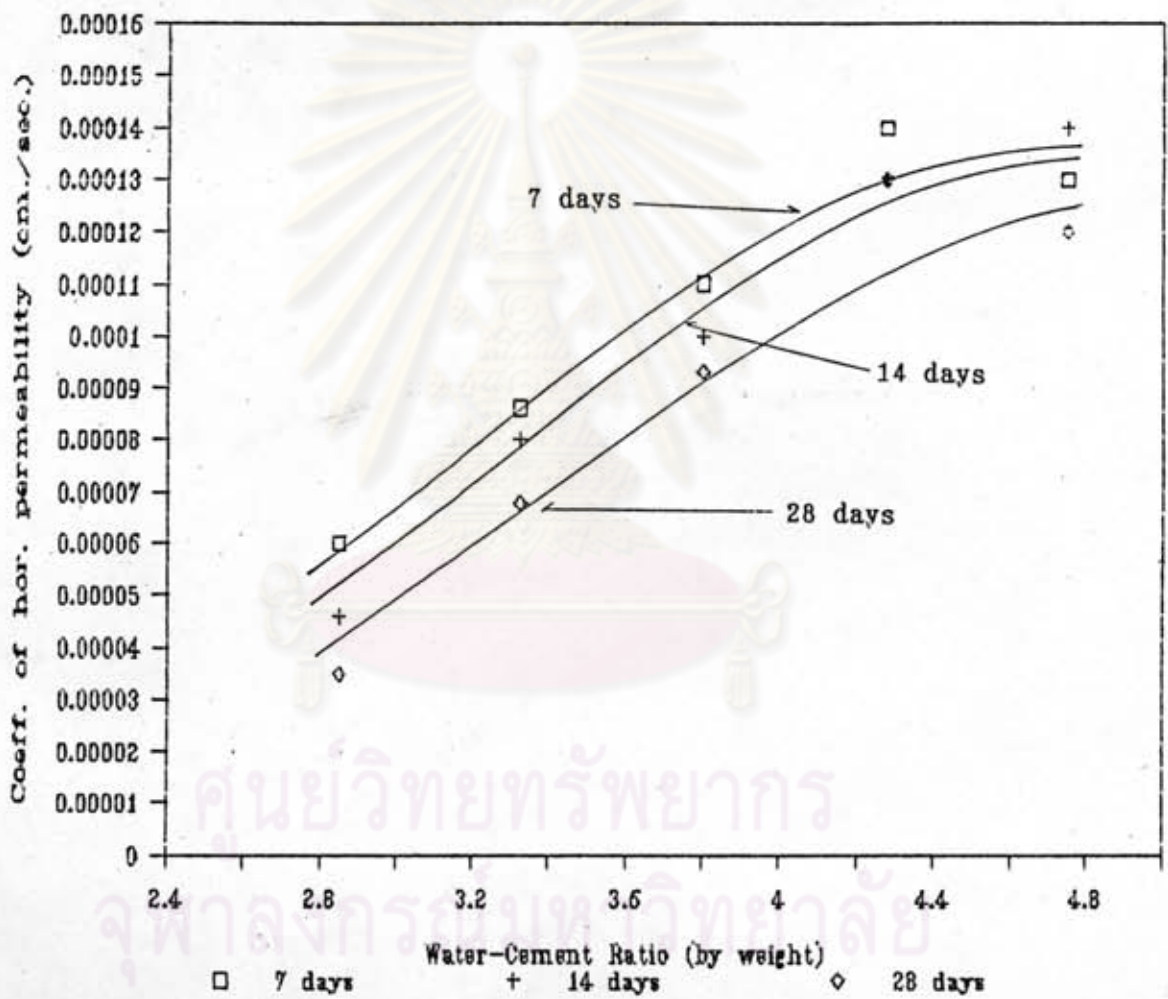
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เมื่อเกรเดียนท์การไหลเท่ากับ 70



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 25



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 50



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 70

5.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำภายหลังการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

น้ำเมื่อซึมผ่านวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ จะมีค่า pH เพิ่มขึ้น (นั่นคือจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง) ซึ่งค่า pH ที่ได้ดังกล่าวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการบ่มและเกรเดียนท์การไหล (ค่า pH ได้จากการทดสอบโดยใช้ indicator แบบกระดาษ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านแต่ละครั้งประมาณ 1.5 ชั่วโมง) ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ภายหลังซึมผ่านวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ โดยมี pH ของน้ำก่อนซึมผ่านก้อนตัวอย่างเท่ากับ 7

ตารางที่ 5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ภายหลังซึมผ่านวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์

อัตราส่วนผสม	Curing time (days)		
	7	14	28
BS.:C			
3:1	13-14	13-14	13-14
3.5:1	13-14	13-14	13-14
4:1	12-13	12-13	12-13
4.5:1	12-13	12-13	12-13
5:1	11-12	11-12	11-12

5.4 การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่โดยวิธี x-ray diffraction

จากรูปแบบของ x-ray diffraction ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์โดยทั่วไป จะพบ peak อยู่ที่มุม Bragg 18.04, 29.40, 34.08 และ 47.08 องศา ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่าง plane เป็น 4.191, 3.04, 2.629 และ 1.929 Å ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเทียบกับระยะห่างระหว่าง plane, d ที่ได้จากแร่มาตรฐานในภาคผนวก ข. ก็จะทำให้ทราบว่า peak ดังกล่าวเป็นแร่ชนิดใด ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่ของวัสดุ ซีเมนต์-เบนโทไนท์

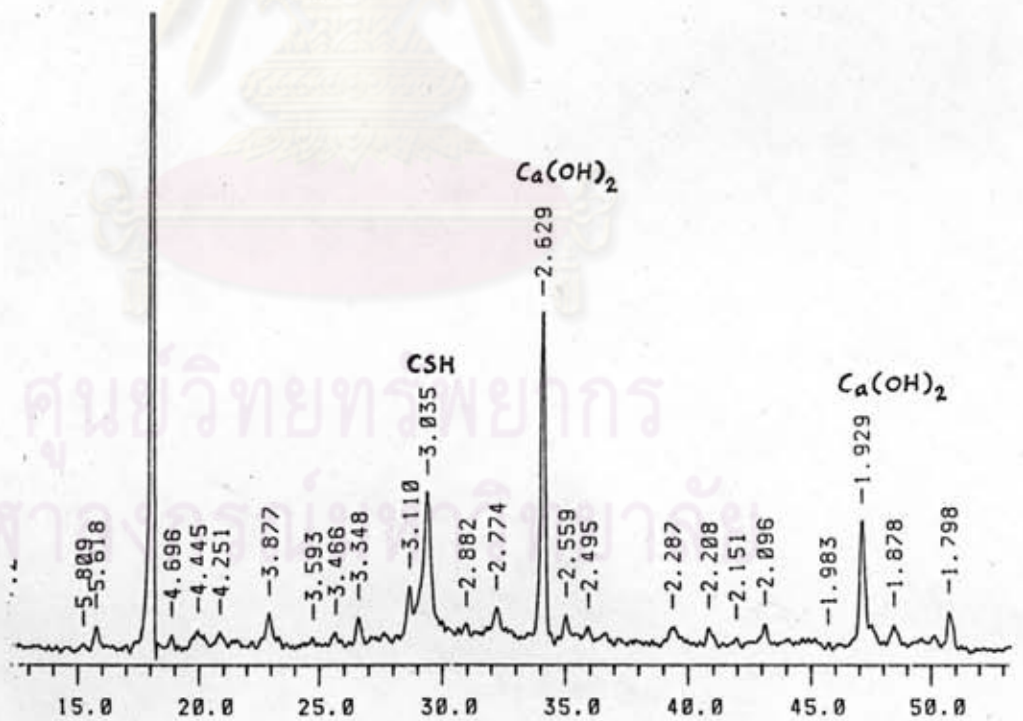
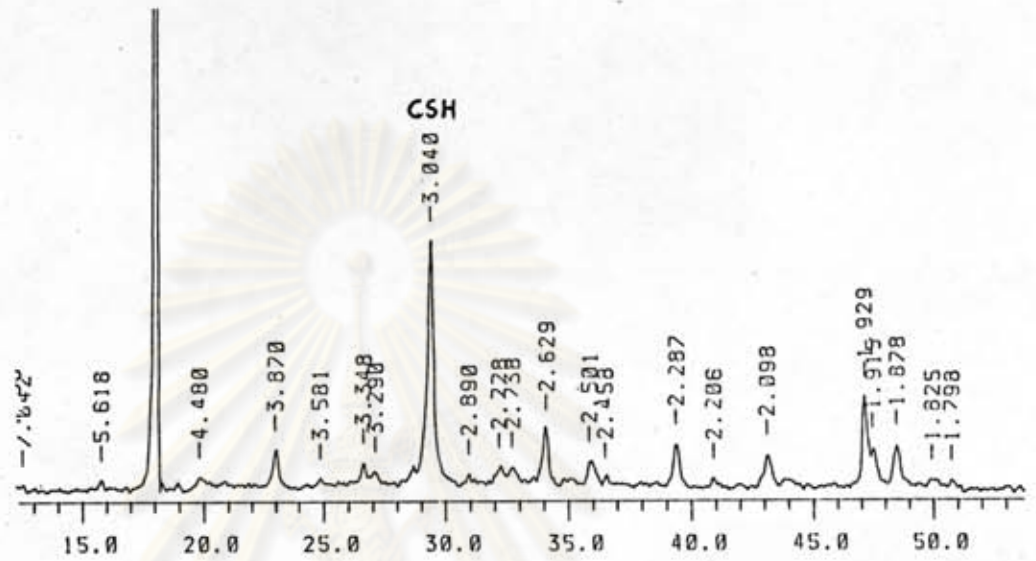
Bragg Angle 2θ ($^{\circ}$)	d (Å)	Identified Compound
18.04	4.91	Ca(OH)_2
29.40	3.04	Calcium silicate hydrate
34.08	2.629	Ca(OH)_2
47.08	1.929	Ca(OH)_2

peak ที่มีความสำคัญที่จะพิจารณาคือ peak ที่มุม Bragg 29.40 องศา ซึ่งมีระยะห่างระหว่าง plane d ประมาณ 3.04 Å ซึ่งเป็น peak ของ calcium silicate hydrate (CSH) ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า calcium silicate hydrate จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานอนุภาคดิน ทำให้วัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น และมีความชื้นผ่านของน้ำลดลง

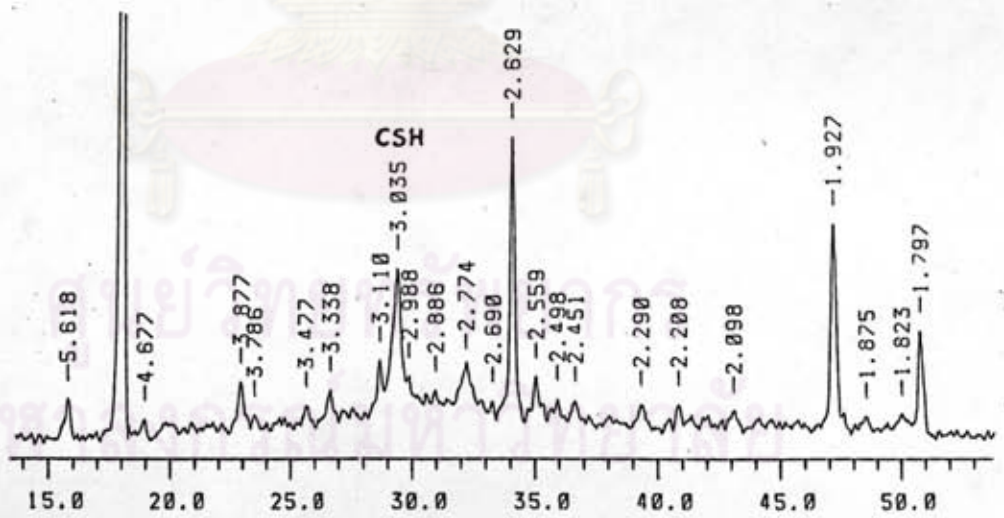
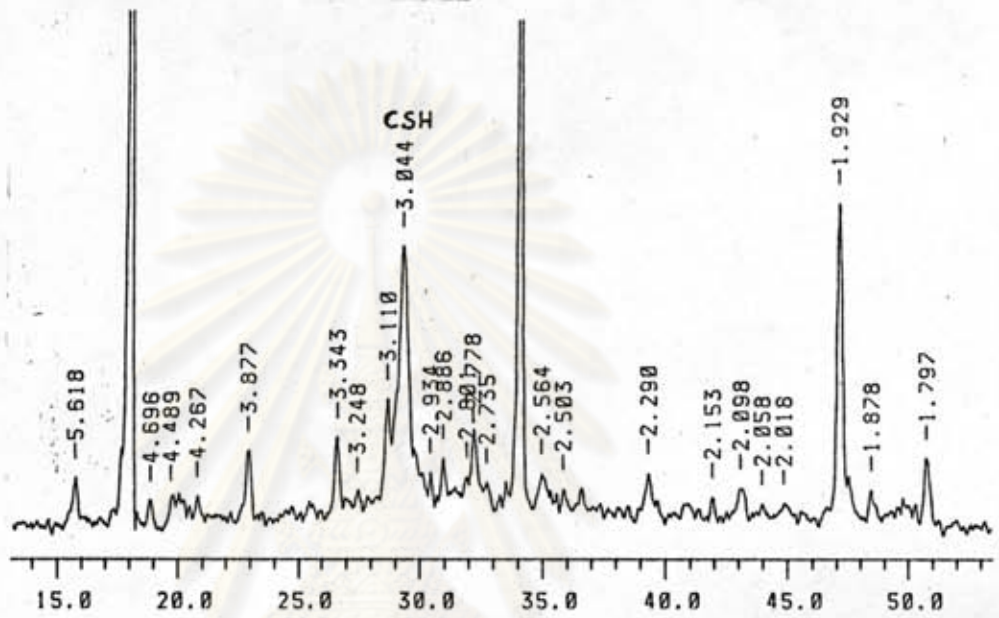
รูปที่ 5.19 - 5.23 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบ x-ray diffraction ของ วัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน จากรูปแบบที่ได้จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 3 : 1, 3.5 : 1 และ 4 : 1 มีความสูงของ peak ของ CSH ที่ 28 วัน มากกว่าที่ 7 วัน แต่สำหรับอัตราส่วน 4.5 : 1 และ 5 : 1 ความสูงของ peak ของ CSH ที่ 28 วัน และที่ 7 วัน จะไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก แสดงว่าวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ที่อัตราส่วนผสม 3 : 1, 3.5 : 1 และ 4 : 1 จะมีการเพิ่มขึ้นของ CSH ตามระยะเวลาบ่ม ส่วนอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 การเพิ่มของ CSH ตามระยะเวลาบ่มจะน้อยมาก หรือไม่มีเลย



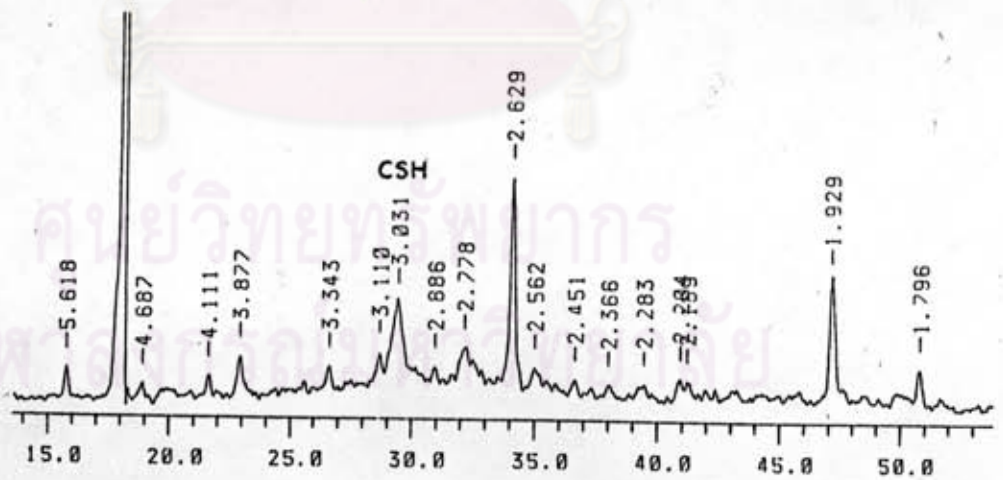
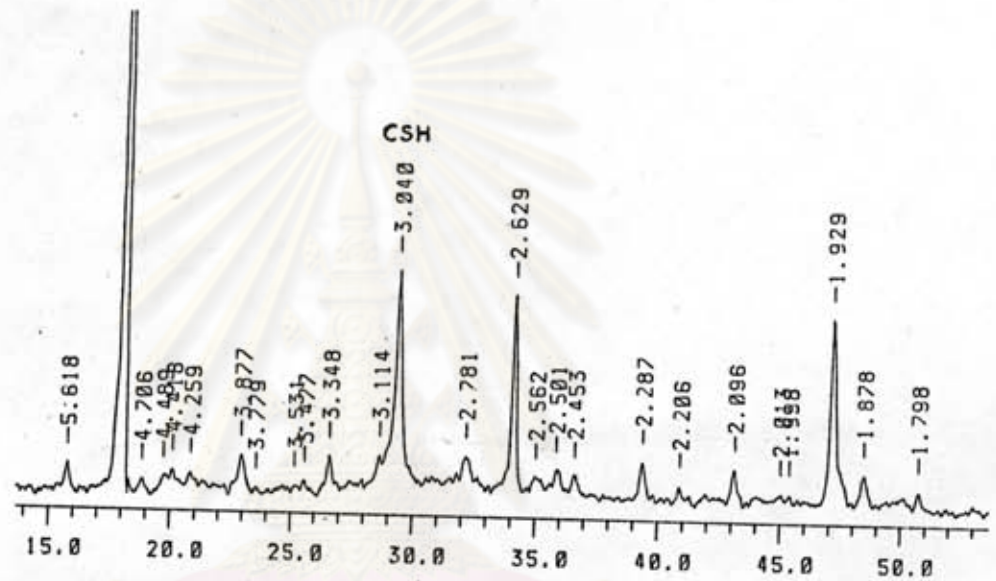
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



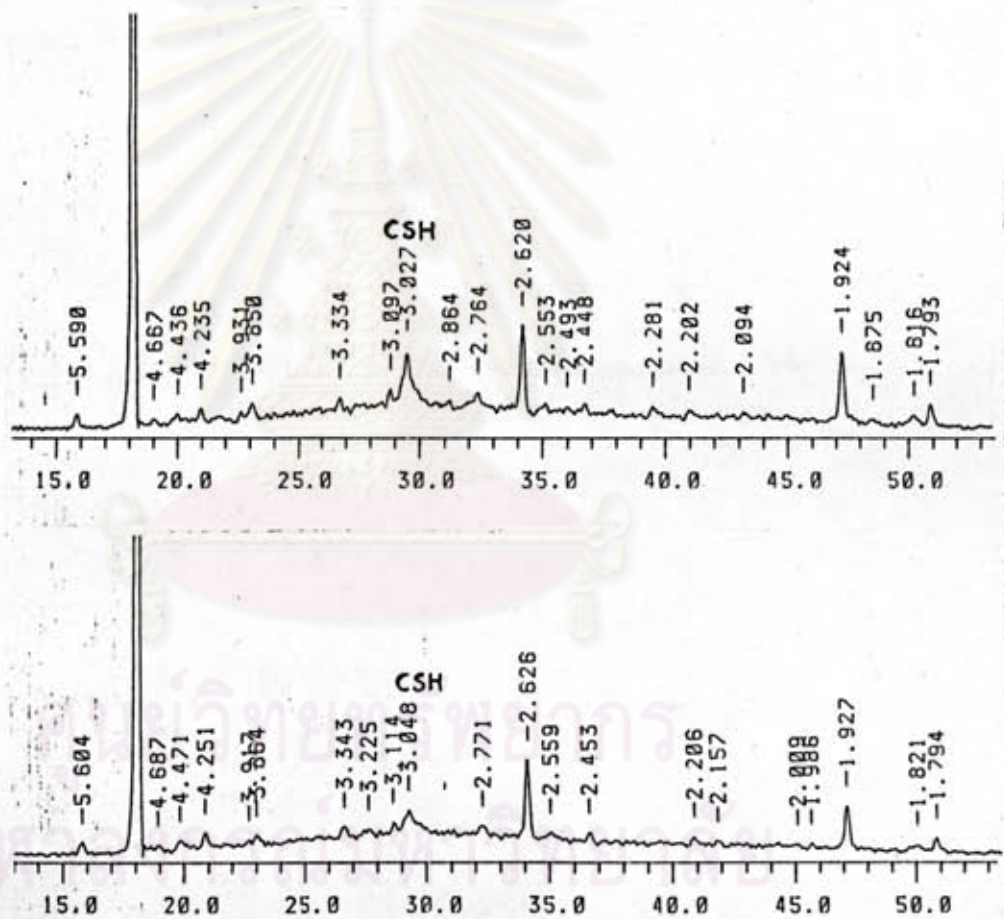
รูปที่ 5.19 x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน (ล่าง) และ 28 วัน (บน)



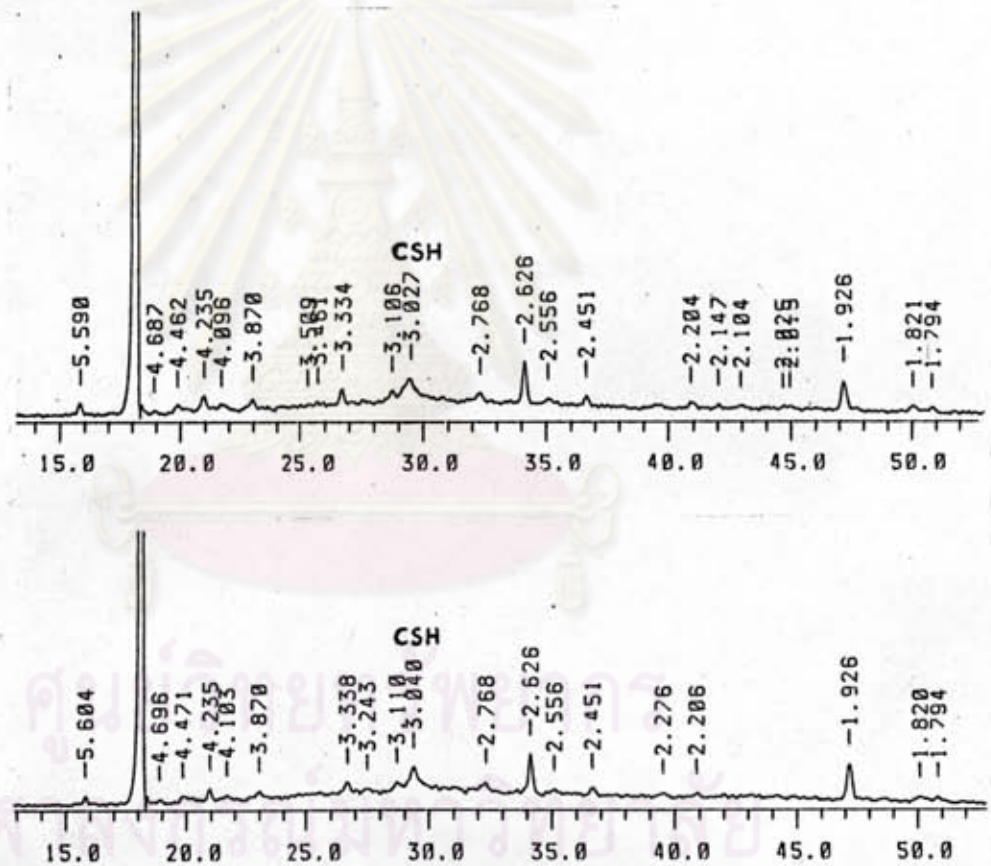
รูปที่ 5.20 x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3.5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน (ล่าง) และ 28 วัน (บน)



รูปที่ 5.21 x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนด์
อัตราส่วน 4 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน (ล่าง) และ 28 วัน (บน)



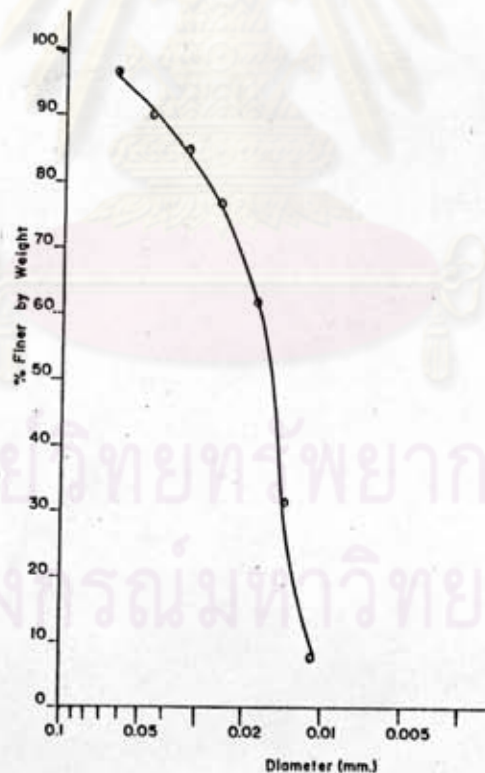
รูปที่ 5.22 x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 4.5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน (ล่าง) และ 28 วัน (บน)



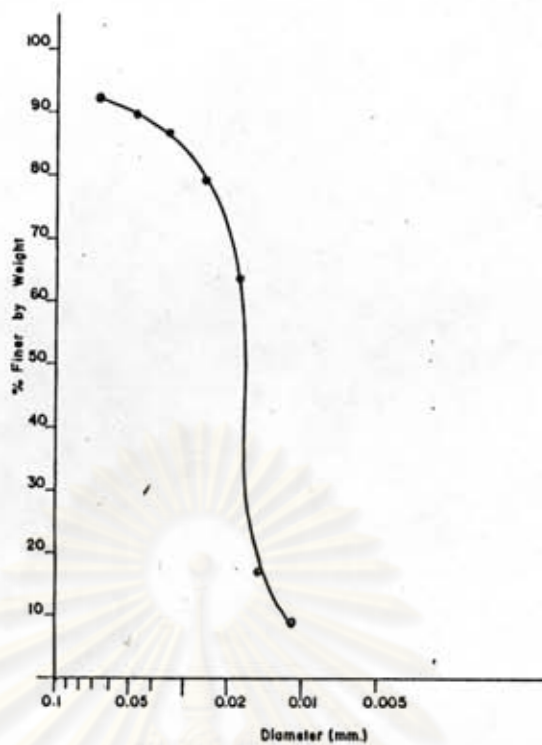
รูปที่ 5.23 x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนด์ อัตราส่วน 5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน (ล่าง) และ 28 วัน (บน)

5.5 คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมี

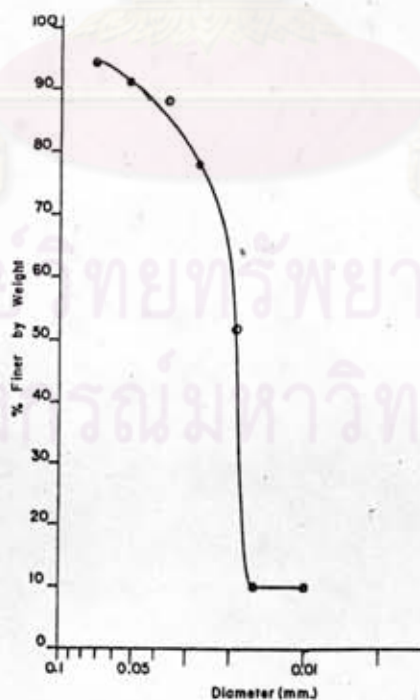
จากการทดสอบหาขนาดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ โดยวิธี Hydrometer Analysis จะได้การกระจายขนาดละเอียดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์อัตราส่วนต่างๆ กันที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน แสดงดังในรูปที่ 5.24 - 5.28 ตามลำดับ ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วงขนาดของ silt (ตามการจำแนกแบบ Unified soil classification) และจากการทดสอบ Atterberg Limit พบว่าวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ไม่มี Liquid Limit และ Plastic Limit แต่อย่างไรก็ดี ผลการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ



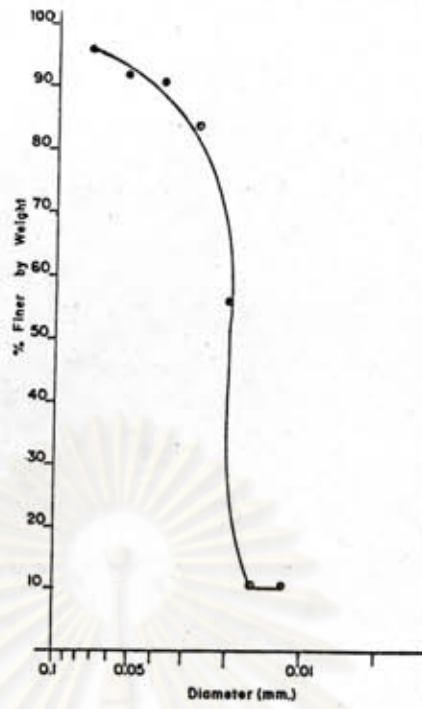
รูปที่ 5.24 การกระจายขนาดละเอียดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
อัตราส่วน 3 : 1



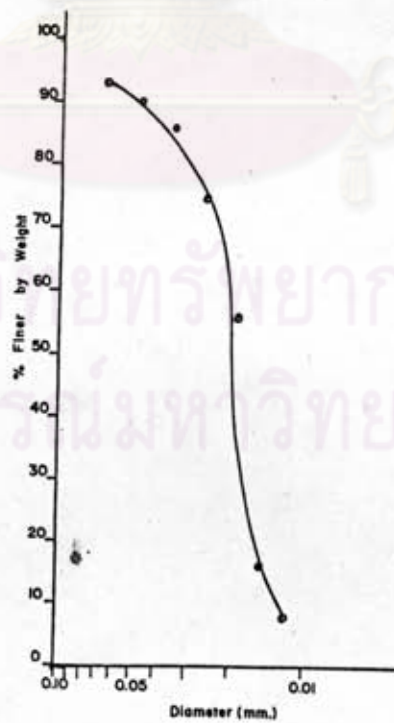
รูปที่ 5.25 การกระจายขนาดผละของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
อัตราส่วน 3.5 : 1



รูปที่ 5.26 การกระจายขนาดผละของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
อัตราส่วน 4 : 1



รูปที่ 5.27 การกระจายขนาดคละของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
อัตราส่วน 4.5 : 1



รูปที่ 5.28 การกระจายขนาดคละของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
อัตราส่วน 5 : 1

ตารางที่ 5.7 คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์

B.S:C	ระยะเวลาบ่ม, วัน																
	7				14				28				60				G _s
	Wn	PL	LL	ช	Wn	PL	LL	ช	Wn	PL	LL	ช	Wn	PL	LL	ช	
×	×	×	t/m ³	×	×	×	t/m ³	×	×	×	t/m ³	×	×	×	t/m ³		
3:1	182	-	-	1.27	187	-	-	1.27	180	-	-	1.27	185	-	-	1.27	2.96
3.5:1	214	-	-	1.24	210	-	-	1.24	217	-	-	1.24	206	-	-	1.24	2.95
4:1	242	-	-	1.22	252	-	-	1.22	238	-	-	1.22	234	-	-	1.22	2.93
4.5:1	255	-	-	1.20	270	-	-	1.20	260	-	-	1.20	252	-	-	1.20	2.90
5:1	293	-	-	1.18	300	-	-	1.18	289	-	-	1.18	295	-	-	1.18	2.89

ตารางที่ 5.8 ค่า pH ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ภายหลังจากการผสม

B.S:C	น้ำ	เบนโทไนท์ สแลอว์รี่	CB. after mixing
3:1	7	10	13-14
3.5:1	7	10	13-14
4:1	7	10	12-13
4.5:1	7	10	12-13
5:1	7	10	12

5.6 การคายนํ้าของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์

เมื่อนํ้าปูนซีเมนต์กับเบนโทไนท์ สเลอรี่ มาผสมกันแล้วตั้งทิ้งไว้ให้วัสดุผสมแข็งตัว จะมีนํ้าส่วนหนึ่งซึมออกมาจากวัสดุผสม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การคายนํ้า (bleeding) ของปูนซีเมนต์ นํ้าส่วนเกินที่ซึมออกมานี้มีปริมาณแตกต่างกันตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 5.9

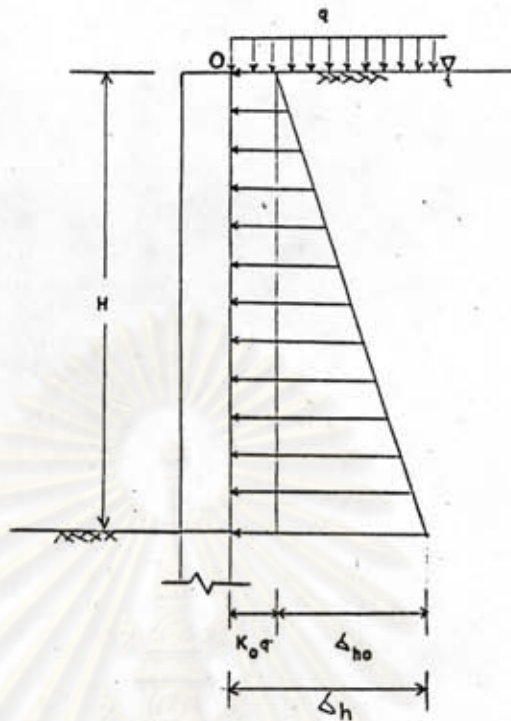
ตารางที่ 5.9 การคายนํ้าของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์

อัตราส่วนผสม BS.:C	ปริมาณนํ้าที่เกิด bleeding ต่อหน่วยปริมาตร cc./1,000 cc. of CB.	ปริมาณนํ้าที่เกิด bleeding ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด cc./cm. ²	ปริมาณนํ้าที่เกิด bleeding ต่อปริมาณนํ้าในตัวอย่าง %
3:1	10	0.49	1.1
3.5:1	15	0.74	1.7
4:1	20	0.98	2.1
4.5:1	30	1.48	3.2
5:1	25	1.23	2.6

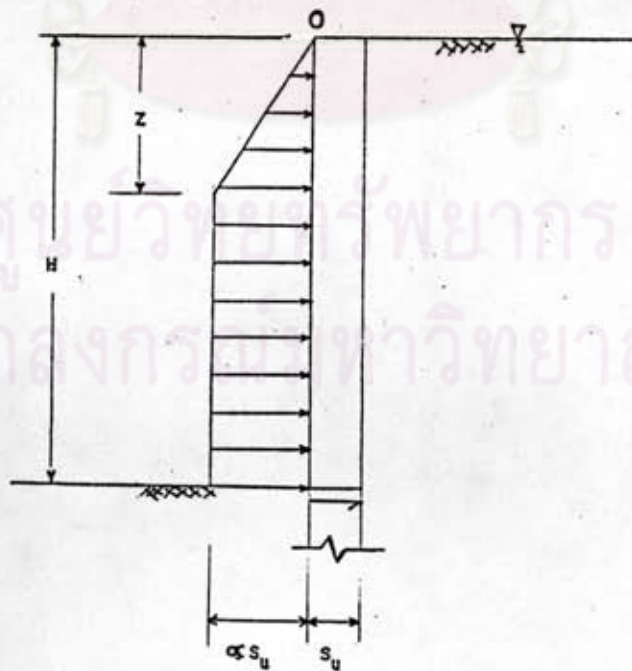
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.7 การคาดคะเนความลึกของการขุดดิน ที่กำลังของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์จะ
สามารถรับได้

ในการคาดคะเนความลึกของการขุดดินที่กำลังของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์จะ
สามารถรับได้ จะสมมติว่าวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความลึก
ซึ่งมีกำลังรับแรงเฉือนเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดแบบ unconfine ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน
ส่วนดินเหนียวที่อยู่ด้านหลัง diaphragm wall จะสมมติว่ามีค่า PI โดยเฉลี่ย เท่ากับ 40%
unit weight เท่ากับ 1.6 ton/m^3 และมีค่า OCR เท่ากับ 1.0 ค่า K_0 ของดินเหนียว
(หาโดยสมการที่ 2.5.7) มีค่าประมาณ 0.6 หน่วยแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำกับรอยต่อ
สมมติว่าอยู่ในรูปแบบของแรงดันดินในสภาพสถิตย์เช่นเดียวกับที่กระทำต่อผนัง diaphragm wall
ดังแสดงในรูปที่ 5.29 แรงต้านทานของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์จะสมมติว่ามีสองส่วน คือ
ส่วนที่สัมผัสกับผนัง diaphragm wall ทั้งสองข้าง และแรงต้านบริเวณฐานของรอยต่อ
ในส่วนที่สัมผัสกับผนัง diaphragm wall จะสมมติว่ามีค่าหน่วยแรงต้านทานที่จุดยอดของรอยต่อ
(จุด O ในรูปที่ 5.29) มีค่าเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงตามความลึกจนถึง
จุดหนึ่ง หลังจากนั้นหน่วยแรงต้านทานจะมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.30 สมมติฐานดังกล่าว
ได้จากความคิดที่ว่า เนื่องจากหน่วยแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำกับรอยต่อมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็น
เส้นตรงตามความลึก ดังนั้นหน่วยแรงต้านทานที่วัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์จะ mobilize
ขึ้นมาด้านแรงดันดินดังกล่าวน่าจะมีลักษณะเช่นเดียวกันด้วย และเมื่อหน่วยแรงต้านทานเกิด
mobilize ขึ้นเต็มที่แล้ว หลังจากนั้นหน่วยแรงต้านทานน่าจะมีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลัง
รับแรงเฉือนของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์คูณด้วย adhesion factor (α) ระหว่างวัสดุ
ผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์กับคอนกรีต (ผนัง diaphragm wall) ค่า adhesion factor
ดังกล่าวจะอาศัยจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesion factor กับ Undrained shear
strength ของดินเหนียวสำหรับงานเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 5.31 ส่วนแรงต้านทาน
บริเวณฐานของรอยต่อ จะสมมติว่ามีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
ระดับน้ำใต้ดินสมมติว่าอยู่ที่ระดับผิวดิน สำหรับรอยต่อจะสมมติว่ามีขนาดดังแสดงในรูปที่ 1.1

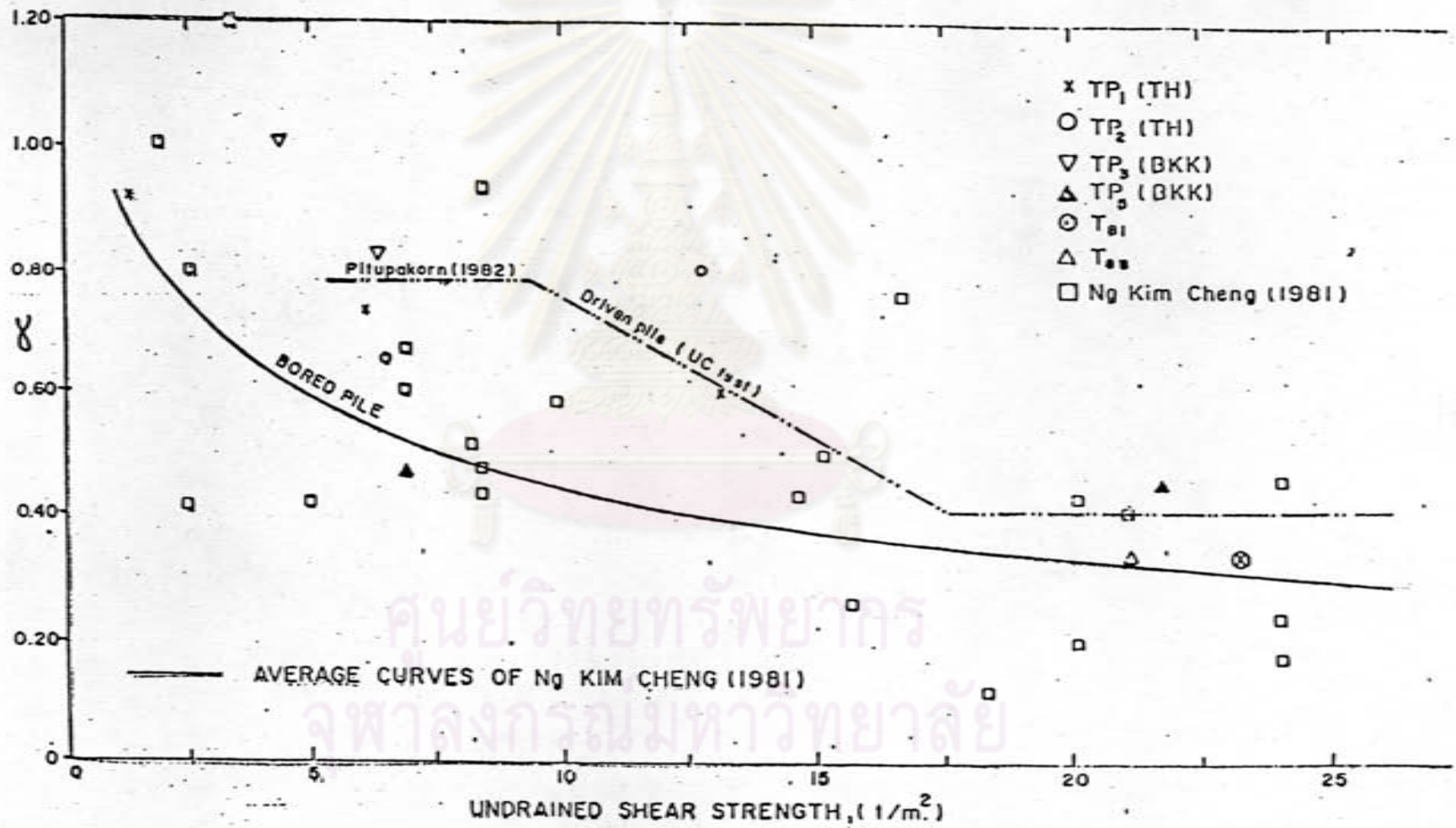


รูปที่ 5.29 การกระจายของหน่วยแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำกับรอยต่อ



รูปที่ 5.30 การกระจายของแรงดันด้านทานของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
(α = adhesion factor)

รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง adhesion factor กับ undrained shear strength (สูตรสำหรับกราฟ)



ในการคำนวณหาระยะ Z และความลึกของการขุด H จะใช้สมการของการสมดุลย์ 2 สมการ คือ ผลรวมของแรงในแนวราบ และ โมเมนต์รอบจุดยอดของรอยต่อ (จุด O ใน รูปที่ 5.30) มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ผลรวมของแรงในแนวราบมีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$\begin{aligned} & (\alpha S_u / F.S) (H-Z) (L) (2) + (1/2) (\alpha S_u / F.S) (Z) (L) (2) \\ & - (1/2) (\Delta_{ho} + 2K_o q) (H) (S) = 0 \end{aligned} \quad (5.7.1)$$

ผลรวมของโมเมนต์รอบจุดยอดของรอยต่อเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\begin{aligned} & (\alpha S_u / F.S) (H-Z) (L) (2) [Z + (H-Z) / 2] + (1/2) (\alpha S_u / F.S) (Z) (L) (2) (2Z/3) \\ & - [(1/2) (\Delta_{ho}) (H) (S) (2H/3) + K_o q (H) (S) (H/2)] = 0 \end{aligned} \quad (5.7.2)$$

- เมื่อ
- α = adhesion factor
 - S_u = กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์
 - F.S = Safety faetor
 - q = Surcharge
 - L = ความหนาของรอยต่อ
 - S = ความกว้างของรอยต่อ
 - Δ_{ho} = หน่วยแรงดันด้านข้างของดินในสภาพสถิตย์
 - K_o = สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิตย์

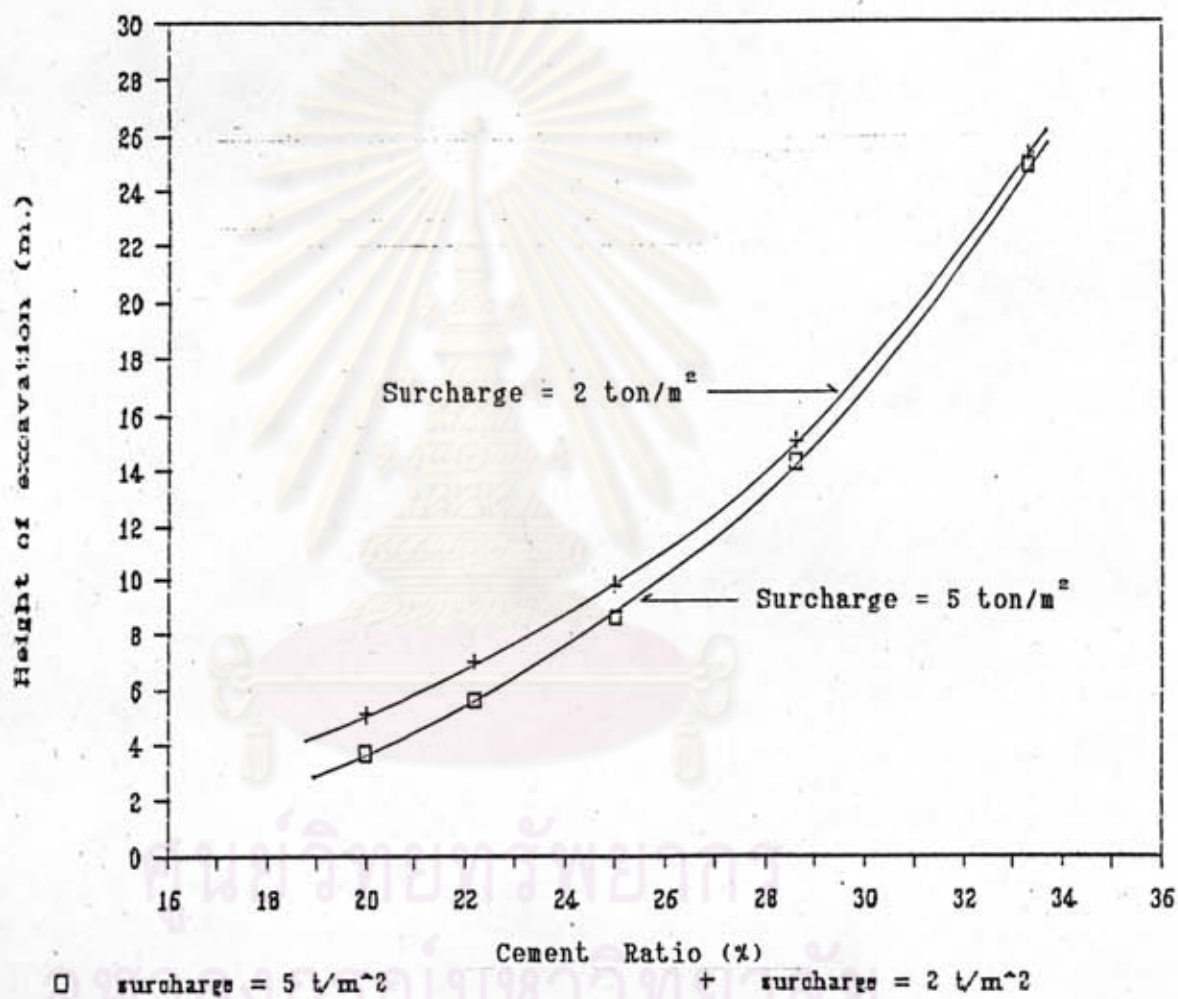
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับเบนโทไนท์ สเลอรี่ กับความลึกของการขุดดิน, H เมื่อตัวประกอบปลอดภัยมีค่าเป็น 1.0, 1.25 และ 1.5 แสดงไว้ในรูปที่ 5.32 - 5.34 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสม 3 : 1 (cement ratio = 33.3%) [ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในโครงการ International Trade Center ซึ่งสามารถขุดห้องใต้ดินลงไปลึกถึง 18.5 เมตร โดยไม่ปรากฏการพังทลายของรอยต่อ] โดยมี

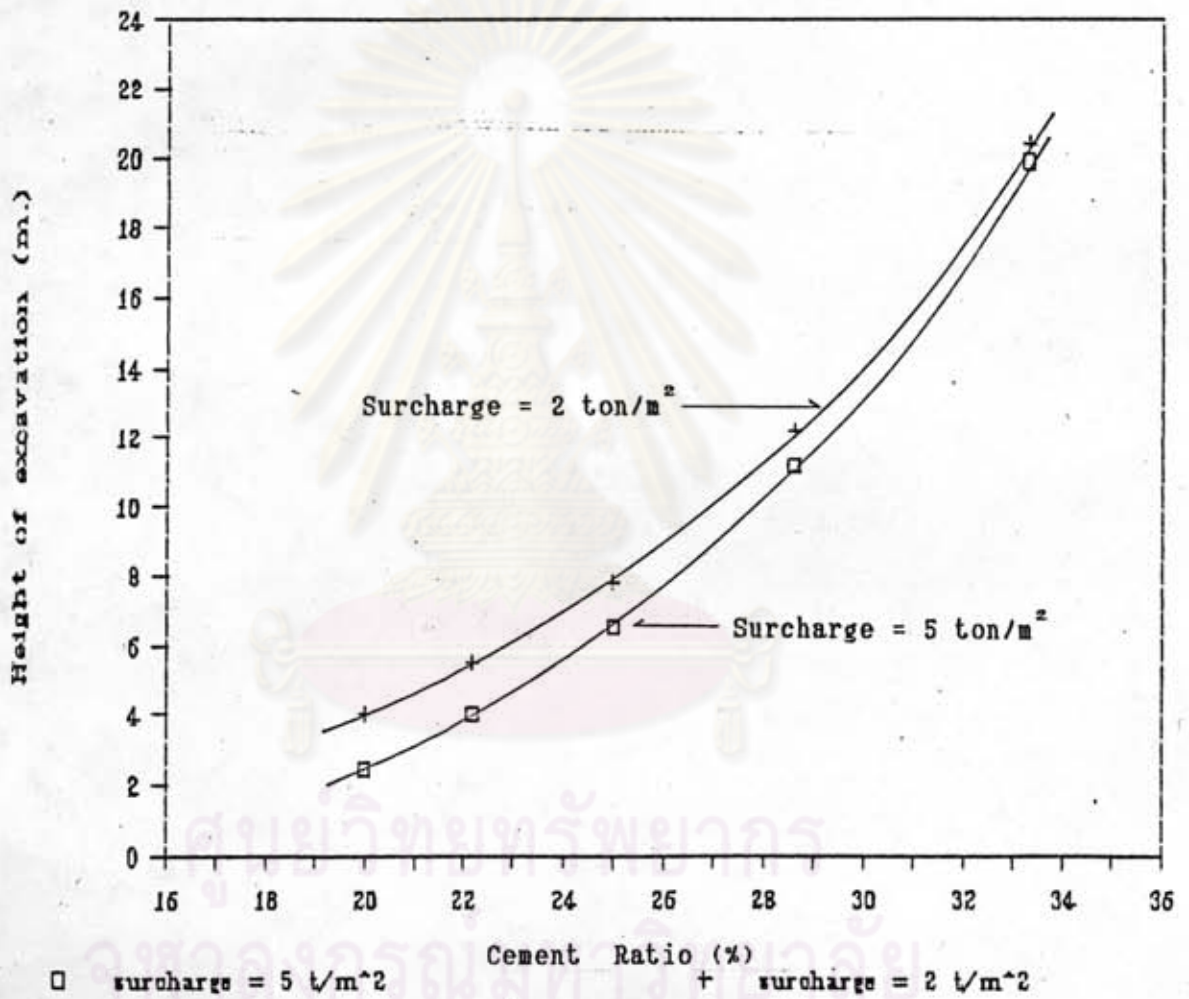
surcharge เท่ากับ 5 ton/m^2 จะได้ว่าวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ สามารถทนความลึกของการขุดสูงสุด (F.S = 1.0) ได้ 25 เมตร แต่ถ้าใช้ F.S เท่ากับ 1.25 ความลึกของการขุดดินจะได้ประมาณ 20 เมตร จากรูปที่ 5.31 จะได้ว่าถ้าความลึกของการขุดดินเท่ากับ 18.5 เมตร ส่วนประกอบปลอดภัยจะมีค่าประมาณ 1.35



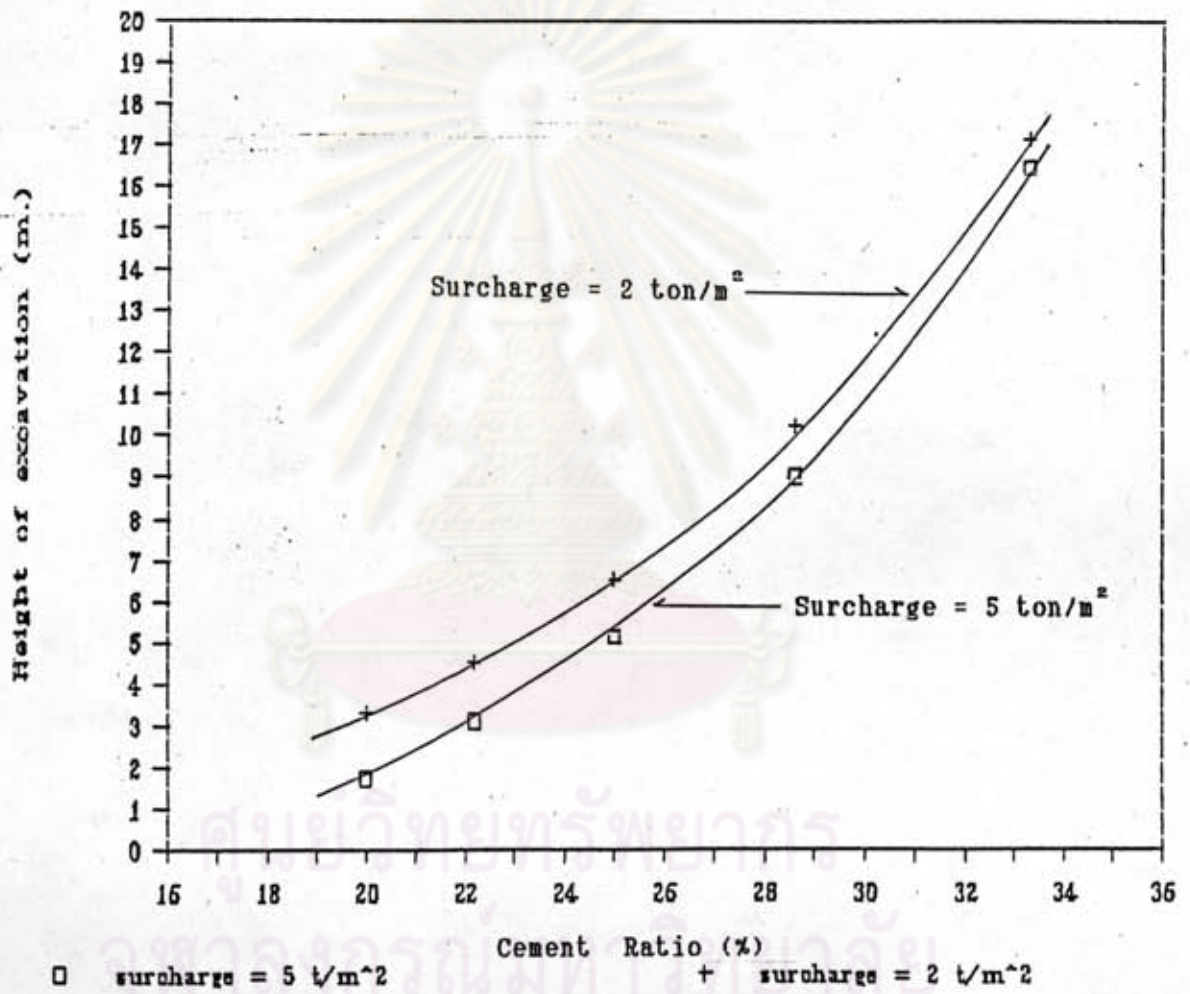
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



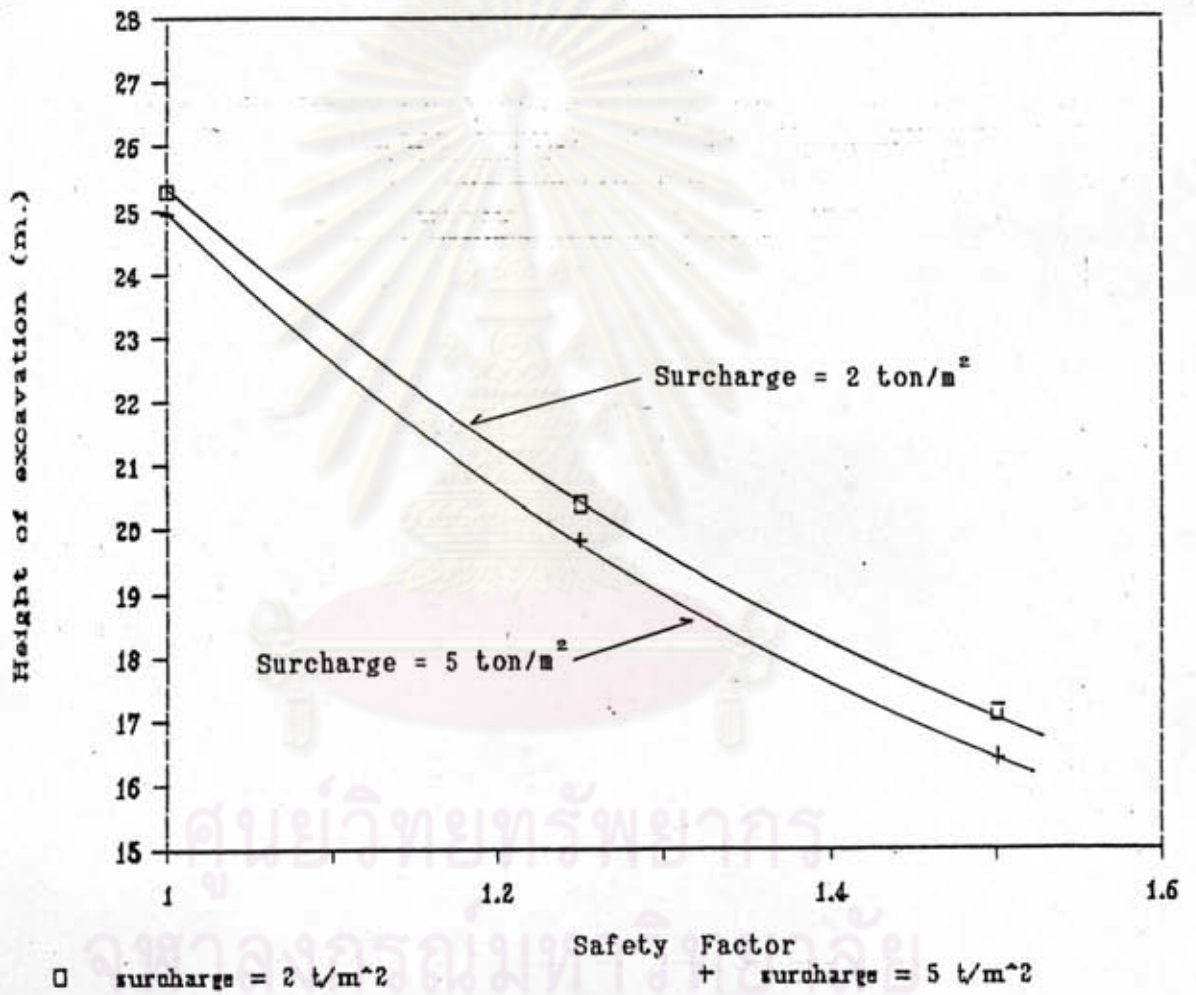
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการขุดดิน (F.S = 1.0).



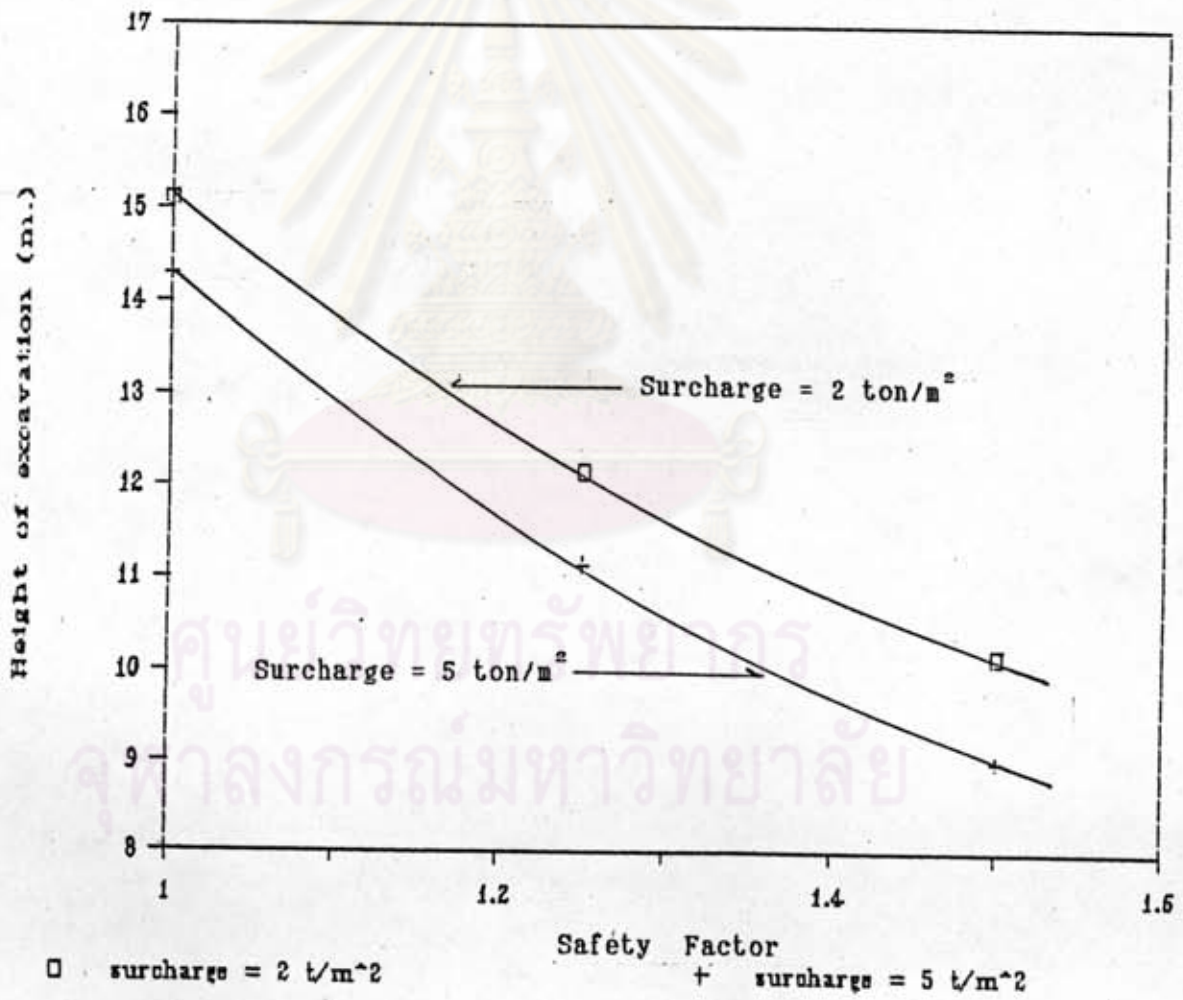
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการขุดดิน (F.S = 1.25)



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการขุดดิน (F.S = 1.5)



รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับส่วนประกอบปลอดภัย (F.S) ของอัตราส่วนผสม 3 : 1



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับส่วนประกอบปลอดภัย (F.S) อัตราส่วนผสม 3.5 : 1