บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมของส่วนผสมกากแร่สังกะสีปูนขาว การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมจะศึกษาควบคู่ไปกับ การเปลี่ยนแปลงทางด้านส่วนประกอบของส่วนผสมซึ่งได้จากการทำ X-ray diffraction ของกากแร่สังกะสีเมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษาสมบัติของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว จะแยกแสดงผลเป็นหัวข้อดังนี้

- คุณสมบัติทางด้านการบดอัด
- คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัด
- การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน
- คุณสมบัติทางด้านความคงทน
- ผลการทดสอบการชะละลาย
- ผลของอุณหภูมิ
- ผลการทดสอบหาค่า CBR

การวิเคราะห์ผลความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว จะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านแร่และเคมี ตามที่ได้ศึกษาไว้แล้วในบทที่ 4 มาประกอบการพิจารณา

5.1 คุณสมบัติทางด้านการบดอัด

ตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดได้จากการนำกากแร่สังกะสีที่มีความชื้นประมาณ 90% ไปอบ ที่อุณหภูมิไม่เกิน 80 °ซ แล้วบดให้ร่วนด้วย ฆ้อนยางจากนั้นจึงนำไปผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ โดยน้ำหนัก ส่วนผสมแห้งที่ได้จะเริ่มผสมน้ำ โดยใช้กระบอกฉีดเพื่อให้ละอองน้ำกระจายอย่างทั่วถึง แล้วทำการบดอัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้น จากนั้นจะนำตัวอย่างส่วนผสมออกจากแบบที่บดอัดไว้ และเพิ่มปริมาณน้ำอีกประมาณ 4-5 ครั้งจนกระทั่งค่าหน่วยน้ำหนักเปียกของส่วนผสมที่ทำการบดอัดลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้น จึงหยุดการทดลอง สำหรับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจะผสมด้วยปริมาณ 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.2.1

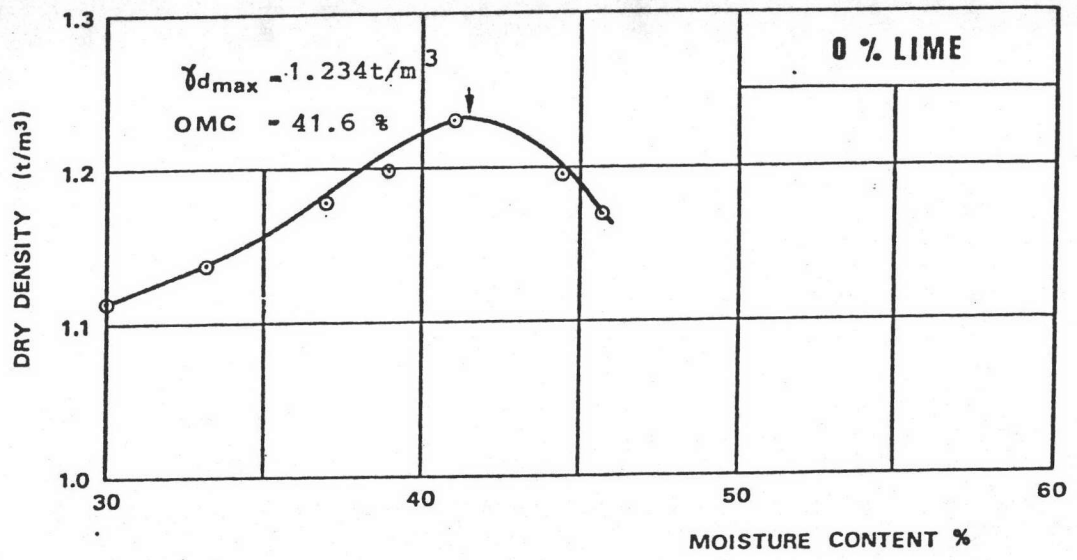
รูปที่ 5.1 แสดง Compaction curve ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณปูนขาวในส่วนผสมที่ 1%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8%, 10% และ 12% โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสมของส่วนผสมที่เปอร์เซนต์ปูนขาวต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้ Standard Proctor ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

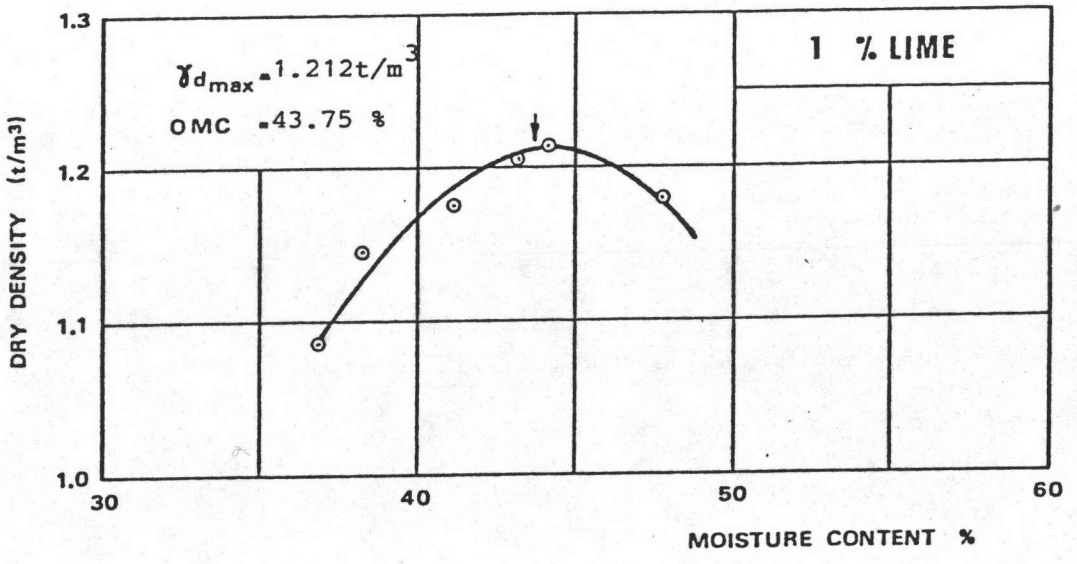
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณปูนขาวในส่วนผสม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณปูนขาวในส่วนผสมเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงในขณะที่ปริมาณความชื้น ที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปูนขาวมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่ากากแร่สังกะสีทำให้ส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่มีปริมาณปูนขาวมาก มีค่าความหนาแน่นแห้งภายหลังการบดอัดลดลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ electrolyte content ของน้ำในช่องว่างมวลดินสูงขึ้น เกิดปฏิกิริยา cation exchange ทำให้อนุภาคของกากแร่สังกะสีมีแนวโน้ม ที่จะเกาะและจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำให้อนุภาคกากแร่สังกะสีจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและแน่น แต่เนื่องจากพลังงานในการบดอัดมีค่าเท่าเดิมจึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงไป แม้ว่ากากแร่สังกะสีจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ ก็ตามแต่ผลเนื่องจากหน่วยน้ำหนักของปูนขาวที่มีค่าน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักของกากแร่สังกะสีและการเพิ่มขึ้นของ cation ที่ได้จากปูนขาวทำให้พฤติกรรมเป็นไปดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น สำหรับปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเพื่อการบดอัดส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับปูนขาวโดยเฉพาะปูนขาวที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นประเภท Quick lime เสียส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมเพิ่มขึ้น

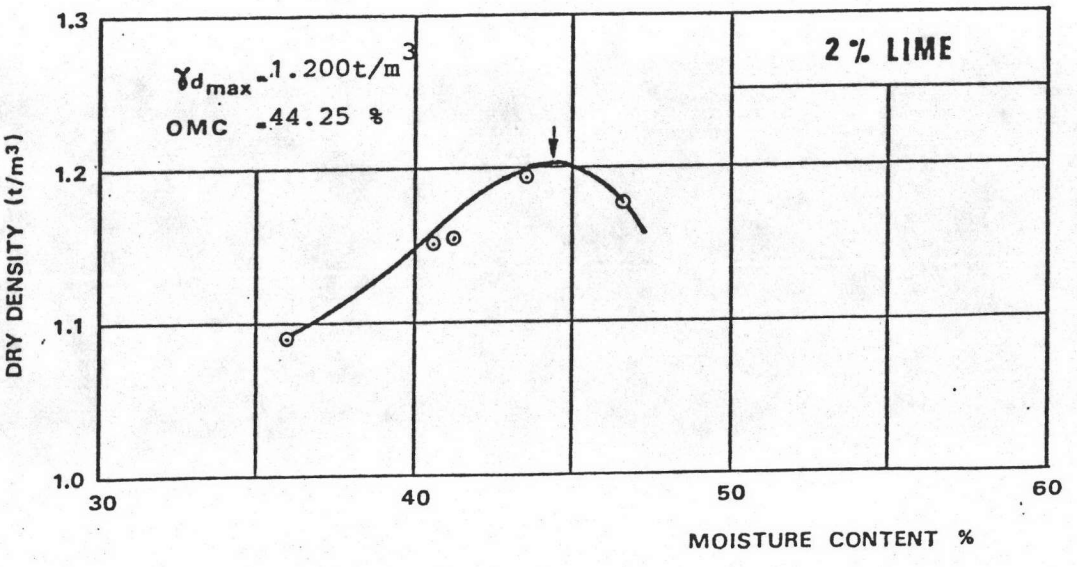
ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ ดังกล่าวจะใช้เป็นข้อมูลในการเตรียมก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาวนั้น ๆ เพื่อการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ทดสอบความคงทนโดยขบวนการ Wetting & Drying และทดสอบผลการชะละลาย ก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวดังกล่าว จะเป็นรูปทรงกระบอกตามแบบมาตรฐานที่บดอัด กล่าวคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 ม.ม. และสูง 116.6 ม.ม.

5.2 คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม

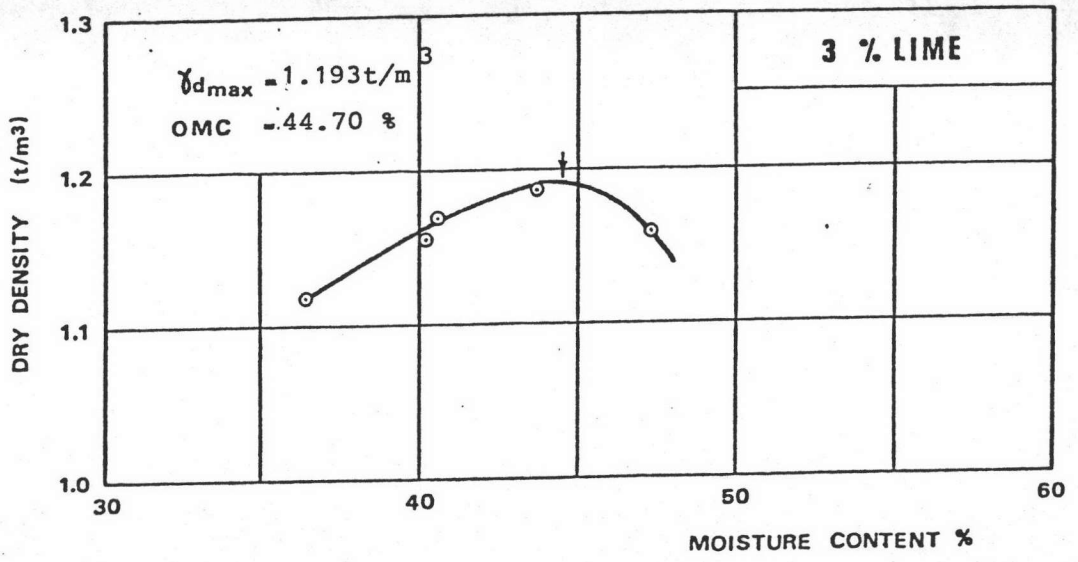
ในการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของกากแร่สังกะสีเมื่อผสมด้วยปูนขาวสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า Unconfined Compressive Strength, q_u ซึ่งเป็นค่าแรงกดสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ของก้อนตัวอย่างกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่เตรียมจากการบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้นี้ ไม่สามารถนำไปใช้เทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดทั่ว

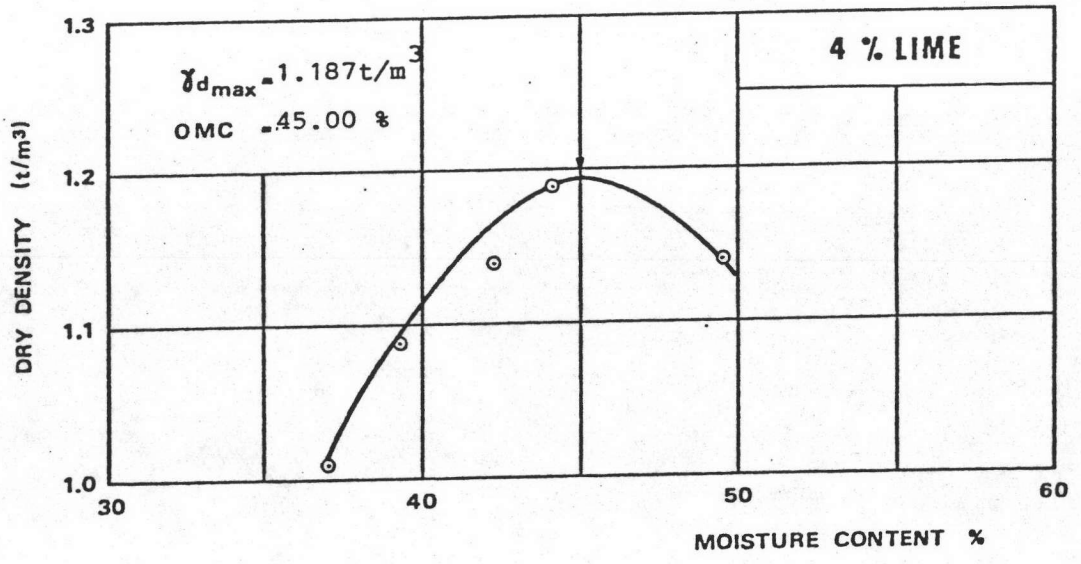


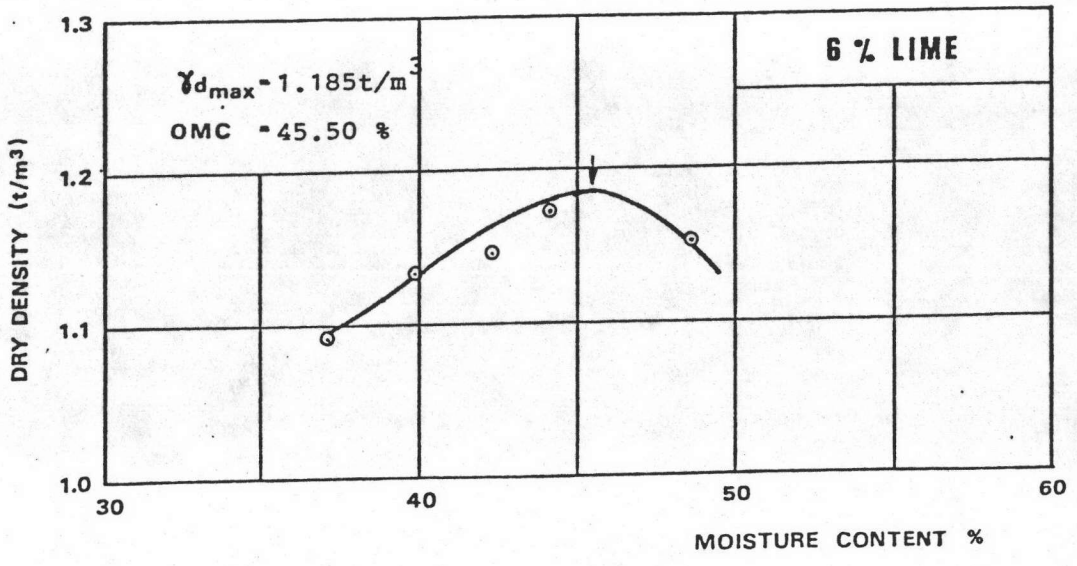




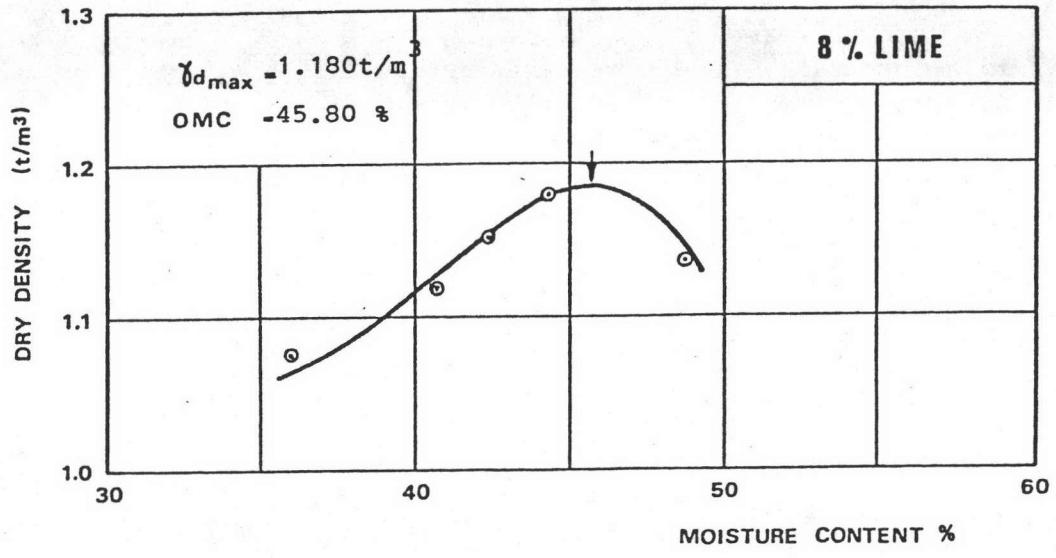
รูปที่ 5.1 Compaction curve ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

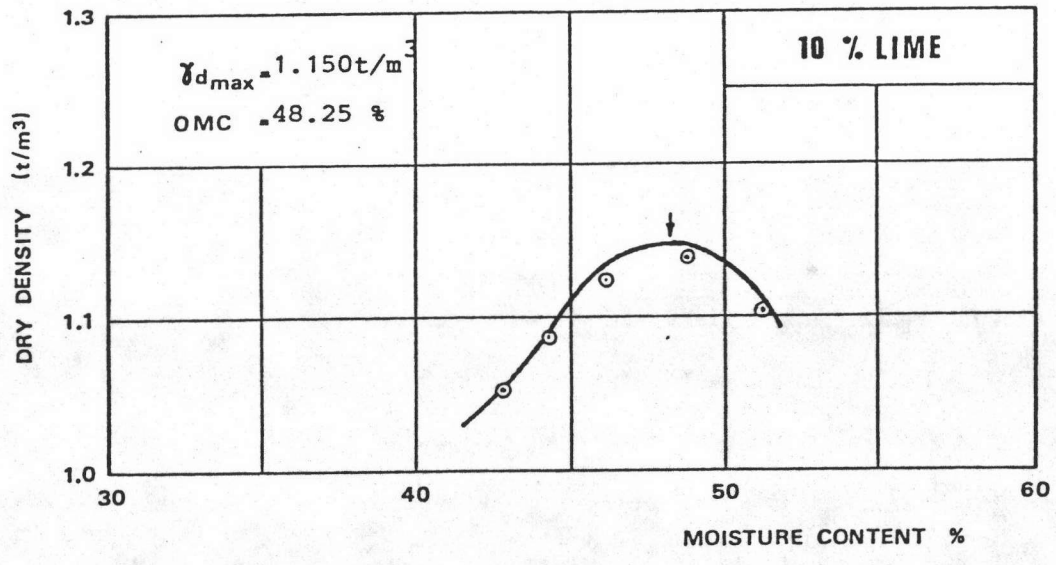

3 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ = 1.193t/m^3
OMC = 44.70 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %

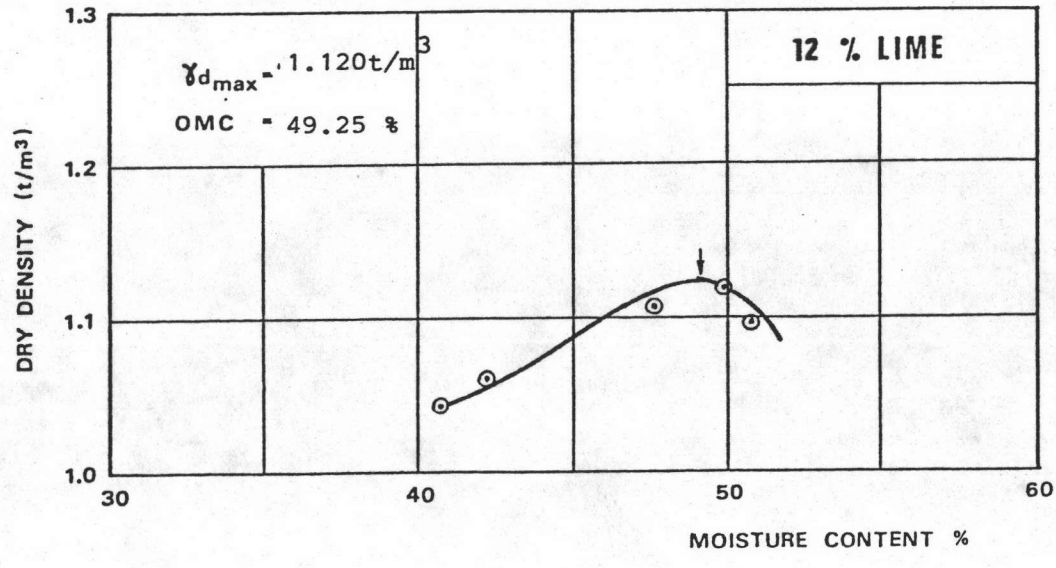

4 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ = 1.187t/m^3
OMC = 45.00 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %


6 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ = 1.185t/m^3
OMC = 45.50 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %

รูปที่ 5.1 (ต่อ)


8 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ =1.180t/m^3
OMC =45.80 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %

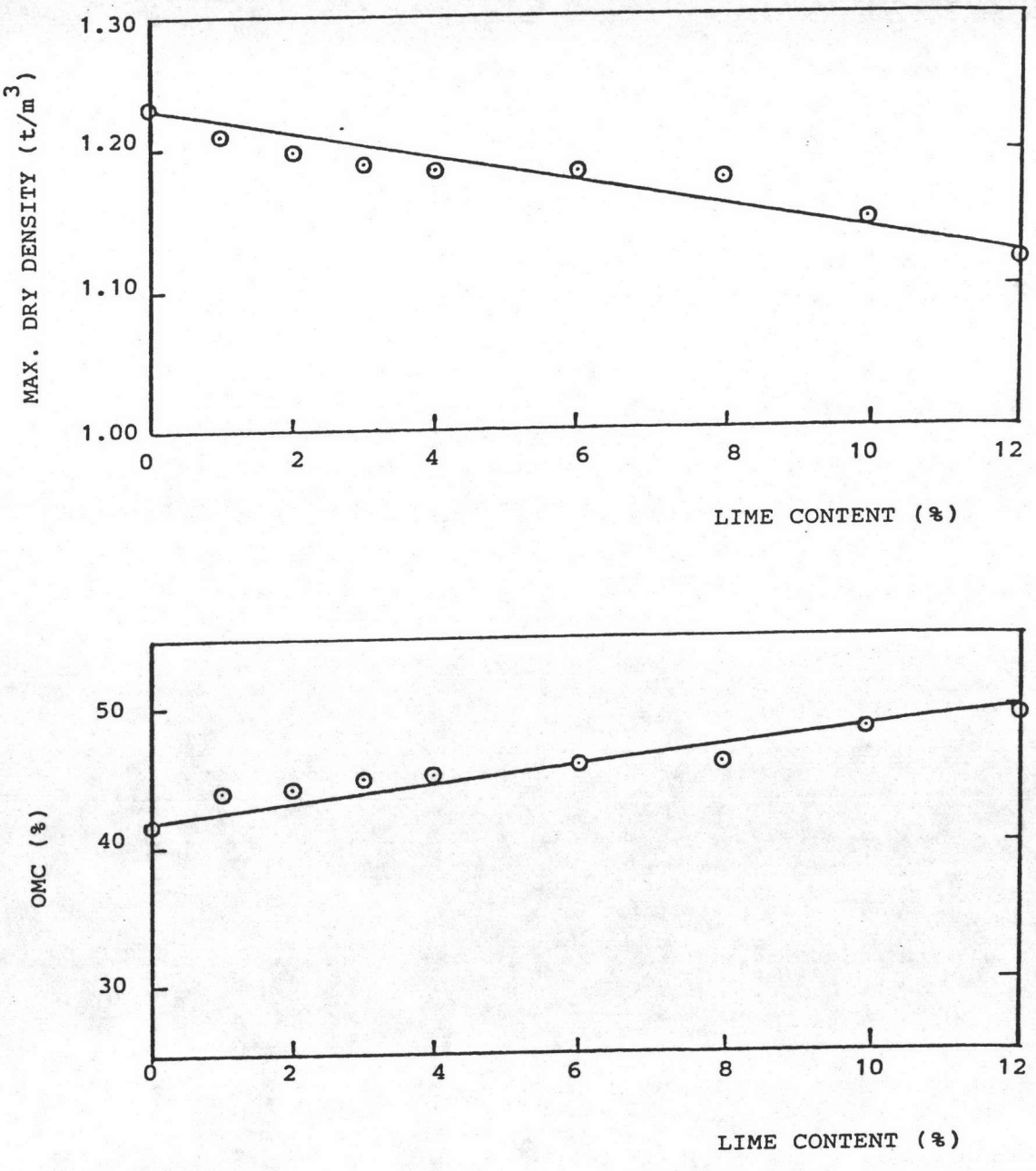

10 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ =1.150t/m^3
OMC =48.25 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %


12 % LIME
$\gamma_{d_{max}}$ =1.120t/m^3
OMC = 49.25 %
DRY DENSITY (t/m^3)
1.3
1.2
1.1
1.0
30
40
50
60
MOISTURE CONTENT %

รูปที่ 5.1 (ต่อ)

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการบดอัดส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ปริมาณปูนขาว (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) (ตัน/ม^3)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) (%)
0	1.234	41.60
1	1.212	43.75
2	1.200	44.25
3	1.193	44.70
4	1.187	45.00
6	1.185	45.50
8	1.180	45.80
10	1.150	48.25
12	1.120	49.25



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น
กับปริมาณปูนขาวในส่วนผสม

ไปที่ได้ จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ได้ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างมีค่าเพียงประมาณ 1.15 เท่า เท่านั้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะใช้ค่ากำลังรับแรงอัดดังกล่าวในการเปรียบเทียบผลระหว่างก้อนตัวอย่างส่วนผสมเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณปูนขาว อุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม นอกจากนี้ยังเป็นดัชนีที่สำคัญที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลังของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว โดยเฉพาะการศึกษาถึงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic

ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณปูนขาวตามที่ได้ทำการทดสอบการบดอัด (หัวข้อ 5.1) และแปรเปลี่ยนระยะเวลาบ่มที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 30 วัน, 60 วัน, 90 วัน, และ 180 วัน

5.2.1 ผลของปริมาณปูนขาว

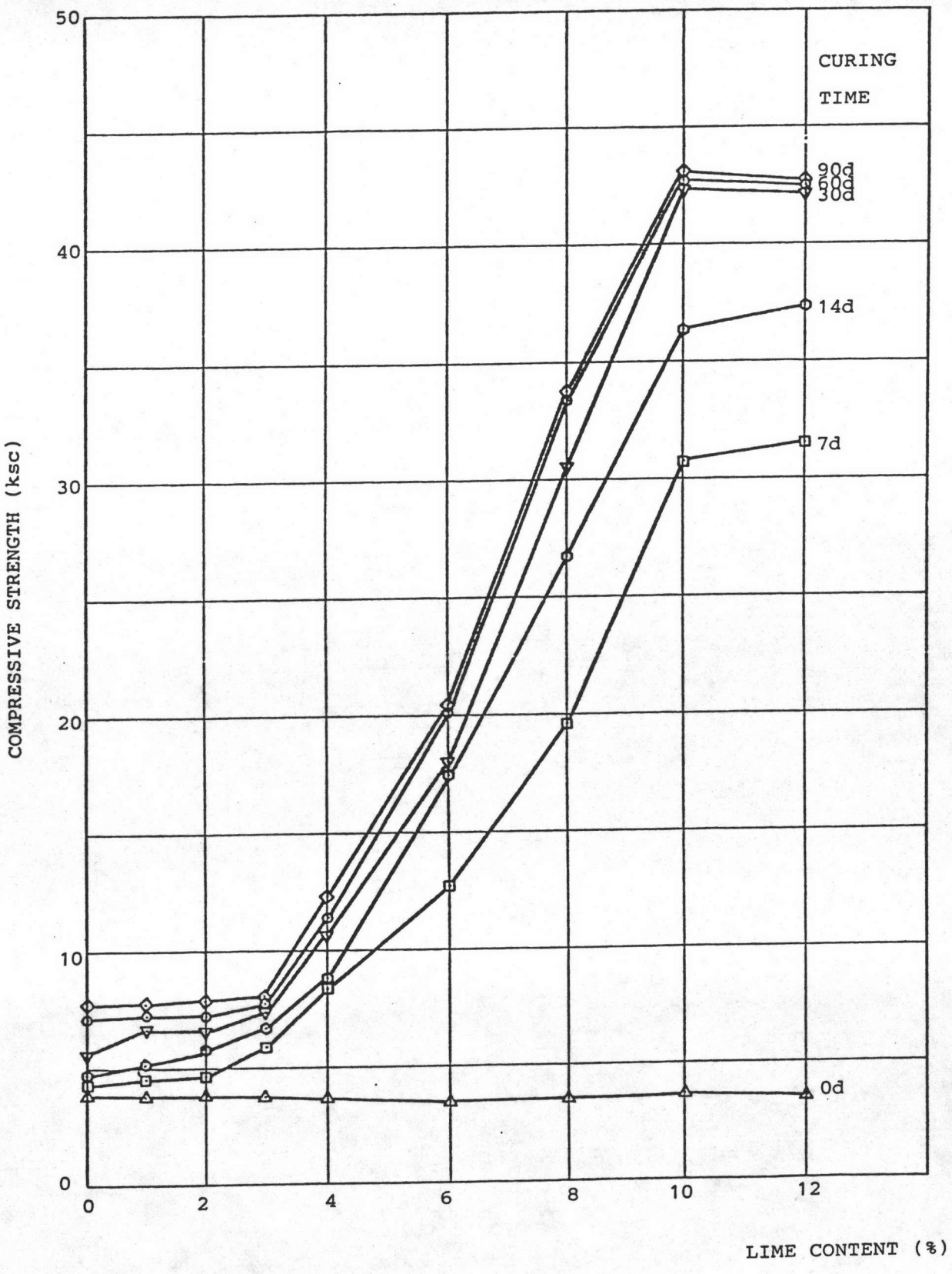
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณปูนขาวเมื่อบ่มก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง (เฉลี่ยประมาณ 27 °ซ) ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณปูนขาวในส่วนผสมน้อยกว่า 3% โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 3% โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวและระยะเวลาบ่มอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว มีการพัฒนากำลังอย่างมีนัยสำคัญและเมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่า10% โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 3% ปูนขาวเกือบทั้งหมดจะถูกใช้ในการ Neutralize สารประกอบซัลเฟตในกากแร่สังกะสี และ/หรือใช้ไปในปฏิกิริยา cation exchange กับกากแร่สังกะสี ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในกากแร่สังกะสีอย่างทั่วถึง และไม่ใช่ปฏิกิริยาหลักที่จะก่อให้เกิดการพัฒนากำลังของส่วนผสม กล่าวคือผลจากปฏิกิริยา cation exchange นี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมเป็นส่วนใหญ่ เช่นทำให้ค่าพิกัดความเหลวของส่วนผสมลดลง เนื่องจากวงน้ำ double layer ลดลง โดยจะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกำลังน้อยมาก

2. เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่า 3% พบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าส่วนผสมมีปริมาณปูนขาวมากพอที่จะ neutralize กากแร่สังกะสี และ/หรือทำปฏิกิริยา cation exchange และมีส่วนที่เหลือไปทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่าง Free lime หรือ $Ca(OH)_2$ ในปูนขาวกับออกไซด์ อิสระในกากแร่สังกะสี โดยเฉพาะ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ปริมาณปูนขาว (%)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2}) ที่ระยะเวลาบ่ม						
	0 วัน	7 วัน	14 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
0	3.80	4.14	4.59	5.60	7.00	7.75	7.78
1	3.70	4.43	5.10	6.67	7.23	7.80	7.83
2	3.76	4.65	5.77	6.56	7.12	7.90	7.95
3	3.56	5.83	6.67	7.29	7.35	8.00	7.98
4	3.76	8.30	8.69	10.60	11.25	12.22	12.25
6	3.42	12.73	17.44	17.94	20.13	20.25	20.31
8	3.76	19.62	26.74	30.61	33.64	32.24	33.08
10	3.98	30.27	36.44	42.44	42.89	42.61	43.01
12	3.27	31.62	37.42	42.05	42.05	42.61	42.60



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณปูนขาว

ซิลิก้า และอลูมิน่าเกิดเป็นสารประกอบใหม่พวก แคลเซี่ยมซิลิเกตและอลูมิเนี่ยมซิลิเกต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานเช่นเดียวกับตัวประสานที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ นอกจากนี้การที่เพิ่มปริมาณปูนขาวในส่วนผสมขึ้น จะทำให้ค่าpH ของส่วนผสมสูงขึ้นยังผลให้การแตกตัวของซิลิก้า และอลูมิน่า เพิ่มขึ้นด้วย ปฏิกิริยา pozzolanic นี้จะเกิดภายหลังปฏิกิริยา cation exchange โดยเป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้เวลานานกว่าแต่ผลจากปฏิกิริยานี้จะมีผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสม

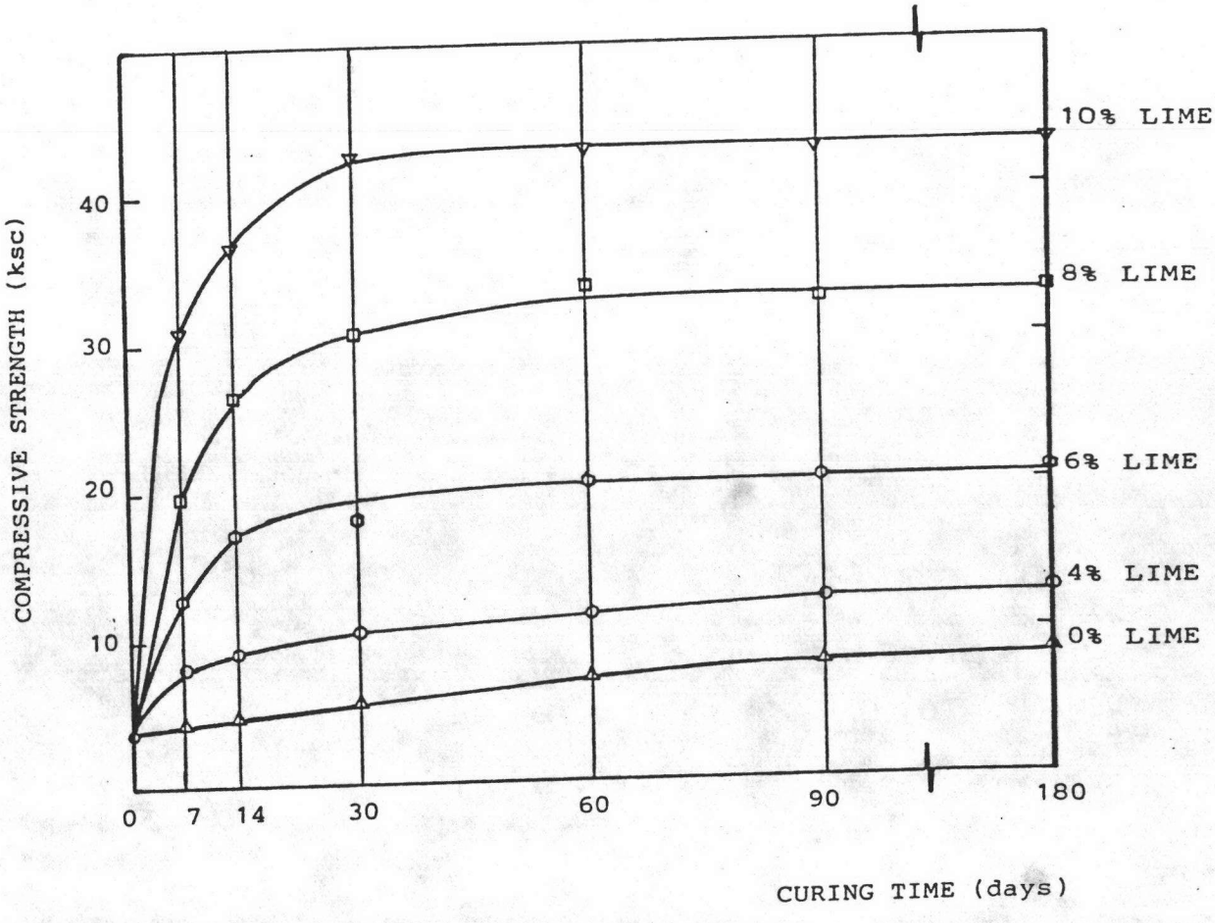
3. เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวถึง 10% พบว่าปฏิกิริยา pozzolanic จะเกิดเกือบสมบูรณ์ กล่าวคือปริมาณ Free lime (CaO) หรือ $Ca(OH)_2$ กับปริมาณออกไซด์อิสระในกากแร่สังกะสีเกือบสมดุลย์กัน เป็นผลให้ถ้าเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่านี้ก็จะไม่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวที่มากกว่า 10% มีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

5.2.2 ผลของระยะเวลาบ่ม

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมกับระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 0 วันจนถึง 180 วัน ซึ่งพบว่าส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว จะเกิดการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วมากในระยะเวลา 30 วันและหลังจากนั้น อัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมจะเกิดขึ้นน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นลักษณะทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศ (Air dry) ทำให้ปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลงเรื่อย ๆ จากข้อเท็จจริงที่ว่าปฏิกิริยา pozzolanic จะมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความชื้นด้วย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าภายหลังระยะเวลาบ่ม 30 วัน ก้อนตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยา pozzolanic น้อยมาก ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ผลของปริมาณความชื้นลดลงจะทำให้ก้อนตัวอย่างส่วนผสมแข็งมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบก้อนตัวอย่างกากแร่สังกะสีที่ไม่ได้ผสมปูนขาว กล่าวคือค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาบ่ม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการแปรเปลี่ยนของปริมาณความชื้น ซึ่งมีค่าลดลงจาก 40% (ตัวอย่างที่ทิ้งไว้ในอากาศ 1 วัน) เหลือเพียงประมาณ 11.4% (ตัวอย่างที่ทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลา 90 วัน)

5.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน

การศึกษาในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบแร่ภายในส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ซึ่งมีผลให้ส่วนผสมเกิดการพัฒนากำลังตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ5.2



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มของส่วนผสมของกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

การวิเคราะห์ได้ใช้วิธี X-ray diffraction ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับวิธี X-ray diffraction ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ในการวิจัยได้ใช้เครื่อง X-ray ยี่ห้อ JEOL รุ่น JDX 8030 ของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นรุ่นที่นำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ส่วนประกอบแร่ การวิเคราะห์จะกระทำกับตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวทันทีภายหลัง ที่ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม โดยเตรียมตัวอย่างแบบ powder sample

รูปที่ 5.5 แสดงเครื่อง X-ray ยี่ห้อ JEOL รุ่น JDX 8030 ของประเทศญี่ปุ่น ที่ทำงานโดยเชื่อมโยงกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้การวิเคราะห์ส่วนประกอบแร่สะดวกและรวดเร็ว

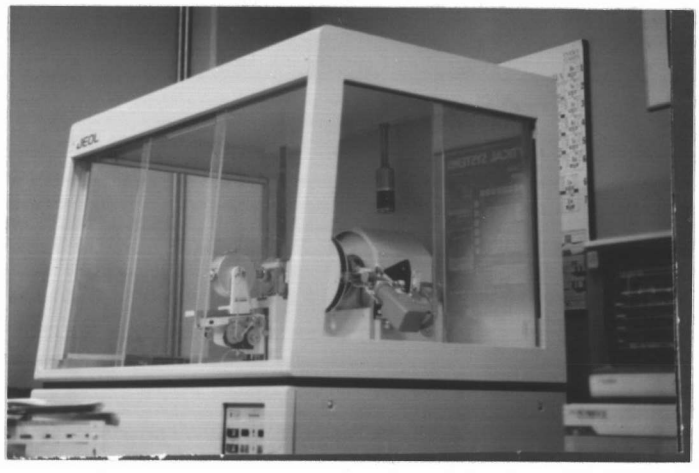
5.3.1 ผลของปริมาณปูนขาว

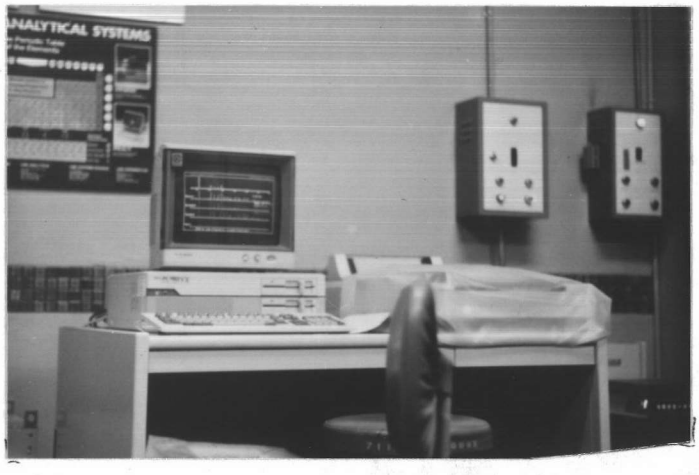
รูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงตัวอย่าง X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาวต่าง ๆ เมื่อบ่มส่วนผสมเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ ซึ่งพบว่า diffraction diagram ของส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาว 1% ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวในส่วนผสมมากขึ้นจะพบสารประกอบ calcium silicate ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมอยู่ 2 รูปแบบคือ

C_2SH พบ diffraction spacing ที่ peak 2.70 A° และ 1.90 A°

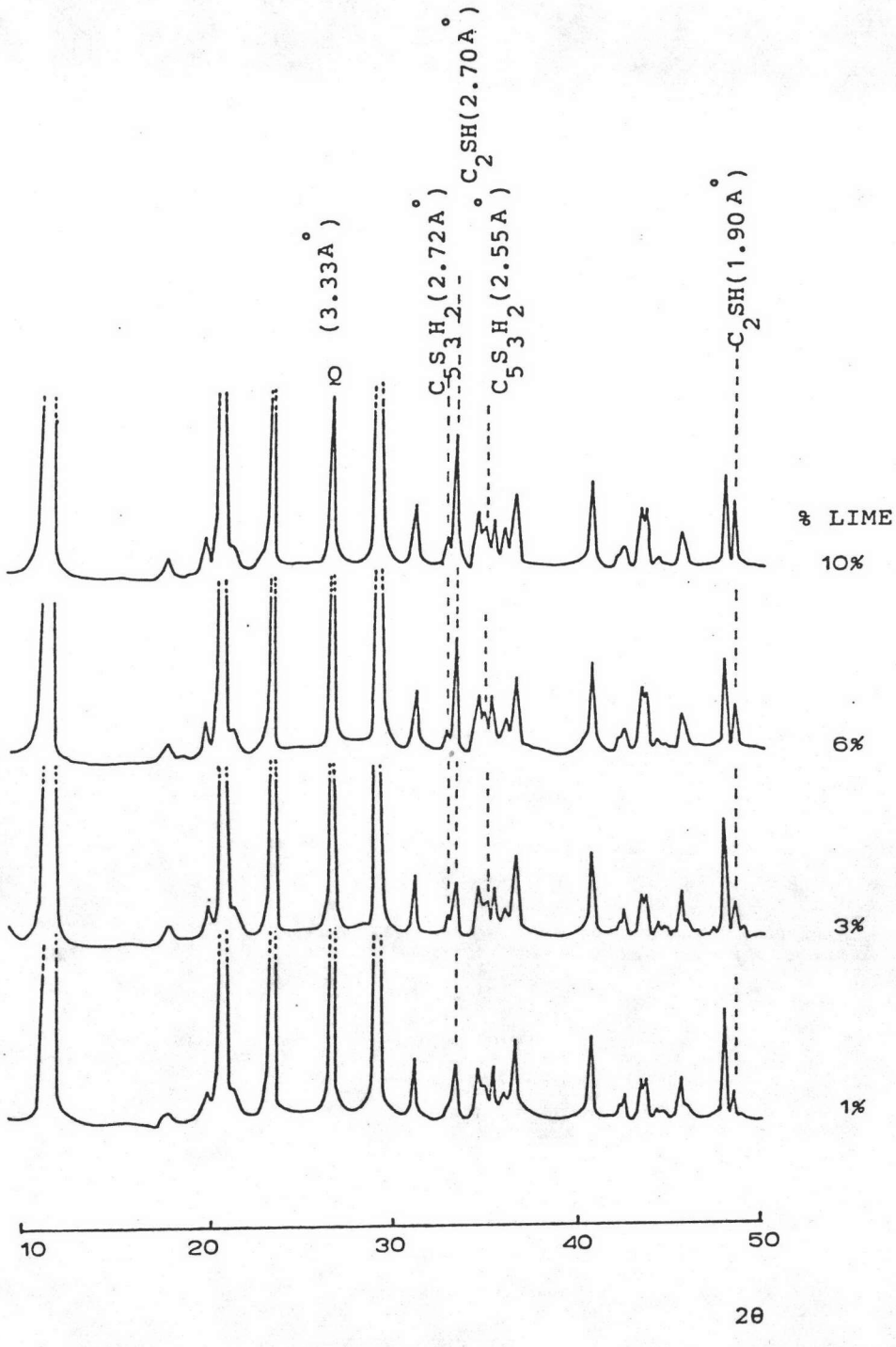
$C_5S_3H_2$ พบ diffraction spacing ที่ peak 2.72 A° และ 2.55 A°

เมื่อพิจารณา Intensity หรือ diffraction peak ของสารประกอบ calcium silicate ทั้ง 2 รูปแบบโดยเฉพาะ C_2SH จะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณปูนขาว ซึ่งพบทั้งตัวอย่างส่วนผสมที่บ่ม 7 วัน และ 30 วัน ในขณะเดียวกันจะพบว่า Intensity ของ Quartz (SiO_2) กลับลดลงตามปริมาณปูนขาว ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ diffraction peak หลักของ Quartz คือที่ Spacing 3.33 A° แสดงว่า บางส่วนของ SiO_2 จาก Quartz จะทำปฏิกิริยากับ free lime (CaO) หรือ $Ca(OH)_2$ ในปูนขาวและน้ำในส่วนผสมเกิดเป็นสารประกอบพวก Calcium silicate hydrate ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสานและพัฒนากำลังและเป็นเหตุผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาว สำหรับ diffraction diagram ที่ปริมาณปูนขาวอื่น ๆ ที่ไม่ได้แสดงไว้เนื่องจากมีรูปแบบของ diffraction diagram ที่ไม่แตกต่างจากผลที่ได้อธิบายไว้ดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะ diffraction diagram ของส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 2% จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับที่ปริมาณปูนขาว 1% และ diffraction diagram ของส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 12% จะใกล้เคียงกับที่ 10%

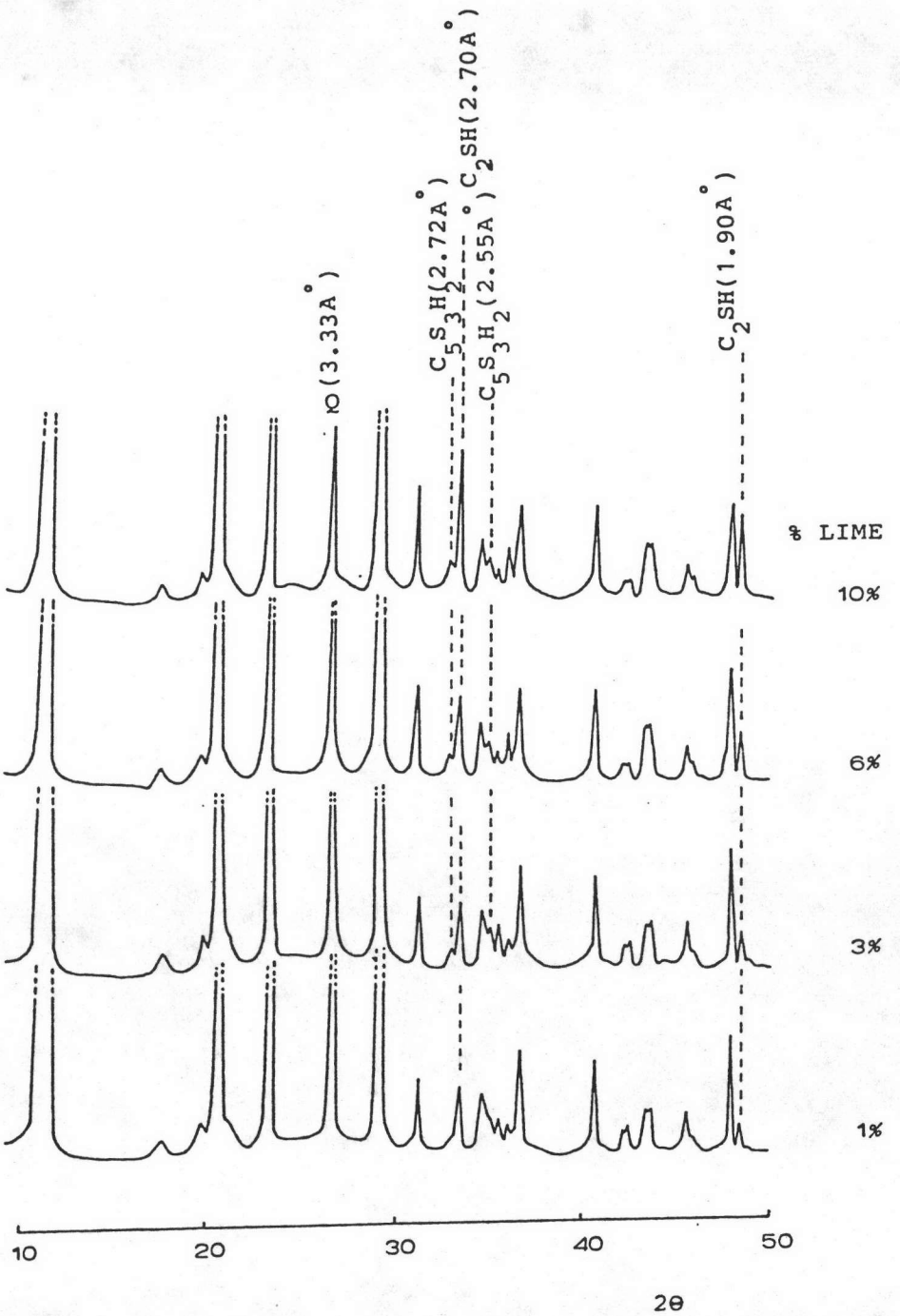




รูปที่ 5.5 แสดงเครื่อง X-ray ยี่ห้อ JEOL ที่ทำงานร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.6 X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี – ปูนขาว เมื่อบ่ม 7 วัน



รูปที่ 5.7 X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อบ่ม 30 วัน

ที่ปริมาณปูนขาวมากกว่า 3% พบว่าอัตราการเพิ่มของกำลังของส่วนผสมมีค่าสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะปริมาณปูนขาวมีเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยา cation exchange และเหลือพอที่จะไปทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการพัฒนากำลัง กล่าวคือ เริ่มพบสารประกอบ Calcium silicate จาก diffraction diagram และเมื่อปริมาณปูนขาวที่ 10% อัตราการเพิ่มกำลังมีค่าน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ Free lime หรือ $Ca(OH)_2$ กับออกไซด์อิสระในกากแร่สังกะสีเกือบสมดุลย์กัน ดังนั้นที่ปริมาณปูนขาว 12% ค่ากำลังรับแรงอัดจึงไม่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.3)

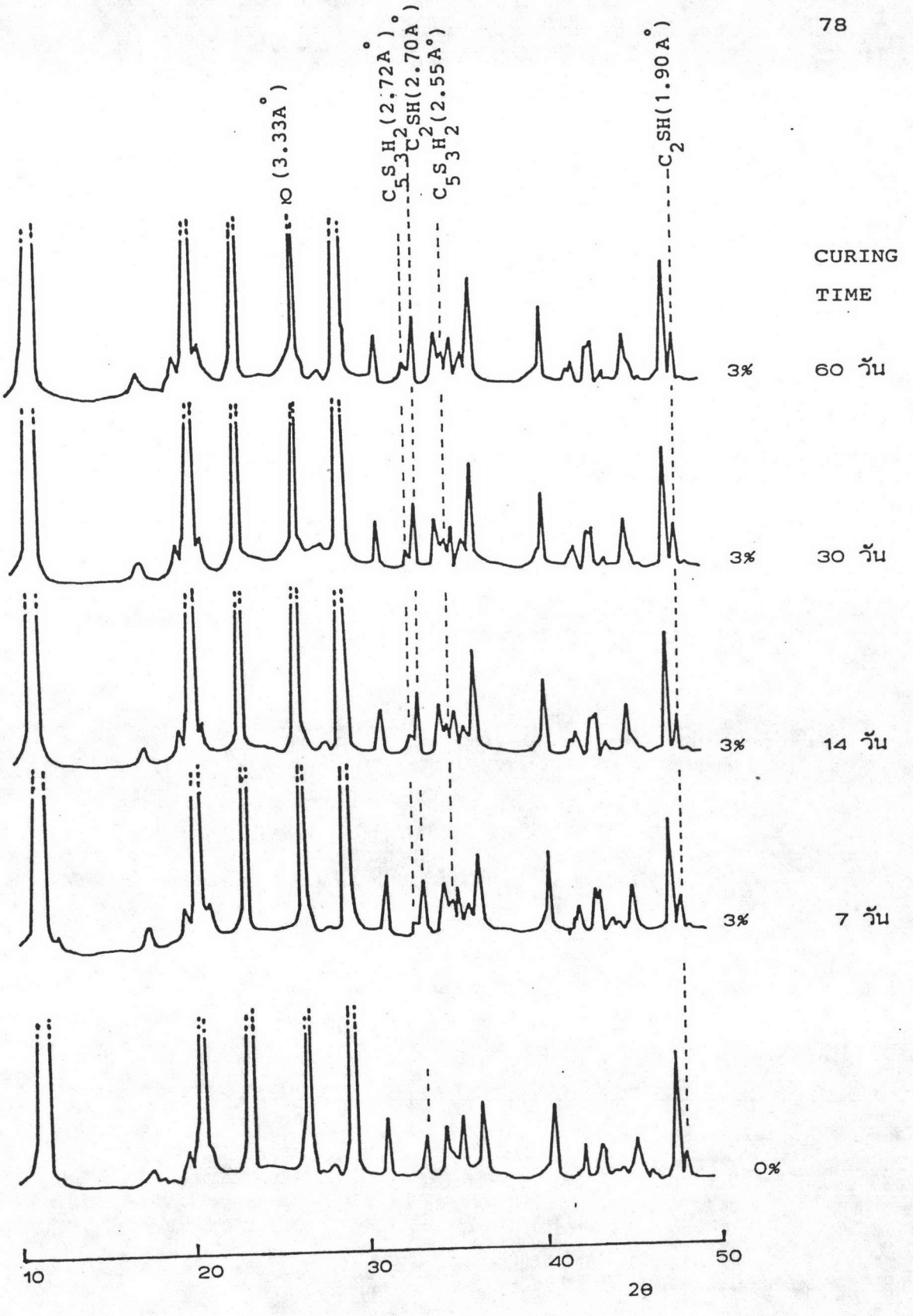
ในการพิจารณา diffraction peak ของสารประกอบที่เกิดใหม่จากการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray diffraction นี้ อาจจะไม่ชัดเจนมากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าหลักการวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะอาศัยการหักเหของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบผลึกของแร่หรือสารประกอบ ถ้าผลึกของสารประกอบมีขนาดใหญ่และสมบูรณ์ก็จะทำให้เกิดการหักเหของรังสีเอ็กซ์ ได้มากและชัดเจน แต่สำหรับสารประกอบที่เกิดใหม่ ถ้ามีปริมาณน้อยหรือโครงสร้างของผลึกยังไม่สมบูรณ์แล้ว ก็จะทำให้การหักเหของรังสีเอ็กซ์ ต่ำ ยังผลให้ค่า diffraction peak ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ในกรณีดังกล่าว ได้แก่การเกิดสารประกอบ $C_5S_3H_2$ ในส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

5.3.2 ผลของระยะเวลาบ่ม

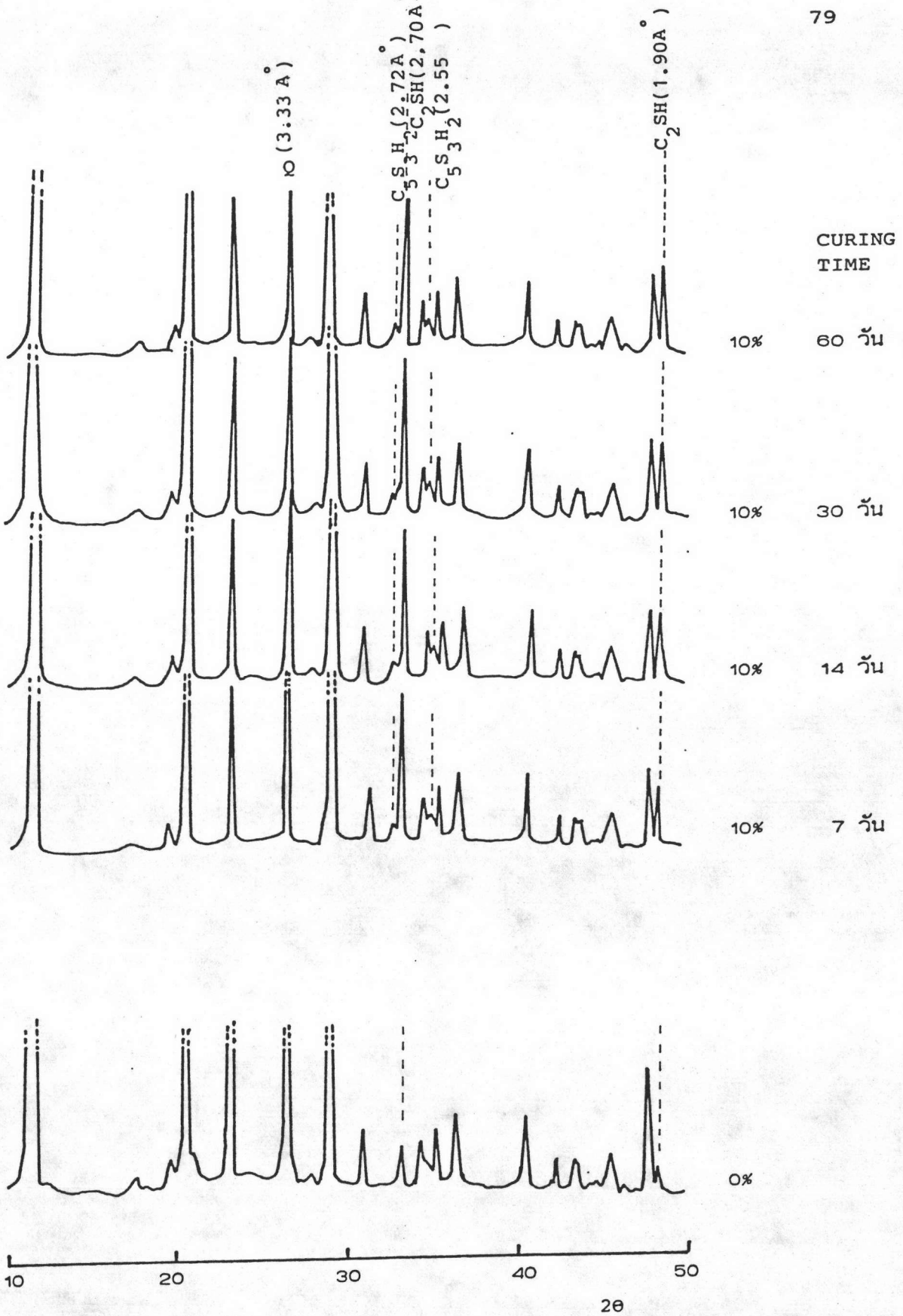
ระยะเวลาบ่มเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการศึกษานี้ สืบเนื่องจากปฏิกิริยา pozzolanic เป็นปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 5.8 และ 5.9 แสดงตัวอย่าง X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาว 3% และ 10% ตามลำดับ โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาบ่ม เมื่อพิจารณา diffraction intensity อาจกล่าวได้ว่า เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นปริมาณ C_2SH และ $C_5S_3H_2$ ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะที่แร่ Quartz (SiO_2) ลดลง โดยเฉพาะ diffraction diagram ของส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 10% (รูปที่ 5.9) จะสังเกตได้ชัดเจน อย่างไรก็ดี diffraction diagram ของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ระยะเวลา 60 วัน จะไม่แตกต่างไปจาก diffraction diagram ของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ระยะเวลา 30 วัน ผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลาบ่มมากกว่า 30 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเหตุผลก็ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.2.2

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโดยวิธี X-ray diffraction ดังกล่าวทำให้ทราบว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดหรือการพัฒนากำลัง



รูปที่ 5.8 X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปูนขาว 3%



รูปที่ 5.9 X-ray diffraction diagram ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปูนขาว 10%

ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวหรือระยะเวลาบ่ม ส่วนใหญ่สืบเนื่องจากการเกิดสารประกอบ calcium silicate ในรูปแบบ C_2SH และ $C_5S_3H_2$ ขึ้นมาในส่วนผสม

5.4 คุณสมบัติทางด้านความคงทน

การศึกษาความคงทนของก้อนตัวอย่างกากแร่สังกะสี-ปูนขาวได้กระทำการทดสอบด้วยขบวนการ Wetting & drying ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 559 โดยการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมที่บดอัดที่ปริมาณความชื้นเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ได้ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

ในการทดลองจะนำก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ตามมาตรฐานไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 42 ชั่วโมง แล้วนำก้อนตัวอย่างมาขัดด้วยแปรงลวดทองเหลืองรอบตัวอย่าง 2 รอบ การนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำและอบให้แห้งดังกล่าว 1 ครั้ง ถือว่าเป็น 1 รอบ (Cycle) ซึ่งการทดสอบจะกระทำจนครบ 12 รอบ แล้วหาค่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่สูญเสียเมื่อเทียบกับก่อนเริ่มทำการทดสอบ

การทดสอบความคงทนจะใช้ค่าน้ำหนักที่สูญเสีย ค่าการดูดซึมน้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนตัวอย่างเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ซึ่งรายละเอียดและวิธีการหาค่าดังกล่าวได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.2.4

ตารางที่ 5.3 แสดงเปอร์เซนต์น้ำหนักที่สูญเสียของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เนื่องจากขบวนการ Wetting & drying ที่รอบต่างๆ ของการทดสอบ ในระหว่างการทดสอบพบว่าก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 2% ไม่สามารถทำการทดสอบได้กล่าวคือก้อนตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ และ/หรือเสียรูปหลังจากแช่น้ำไปได้ 2 ชั่วโมง ในรอบที่ 1 ของการทดสอบ สำหรับก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 3% นั้น ไม่สามารถหาค่าน้ำหนักสูญเสียได้เนื่องจากก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติ/เสียรูป เมื่อผ่านขบวนการแช่น้ำและอบแห้งได้เพียง 2 รอบของการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้แสดงว่าก้อนตัวอย่างส่วนผสมยังไม่เกิดการประสานรวมตัวเป็นก้อนได้ กล่าวคือปริมาณปูนขาวในส่วนผสม (น้อยกว่า 3%) เกือบทั้งหมดถูกใช้ไปในปฏิกริยา Cation exchange หรือการ neutralize กากแร่สังกะสีและการที่ก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาว 3% ยังคงสภาพในการทดสอบตามขบวนการแช่น้ำและอบแห้งได้ 2 รอบแรกนั้น ก็เนื่องจากว่าที่ปูนขาว 3% เมื่อบ่มเป็นเวลา 7 วัน จะมีปูนขาวบางส่วนทำปฏิกริยา pozzolanic ซึ่งเป็นผลให้เกิดการประสานกันบ้าง ผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบแร่ในส่วนผสม เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณปูนขาว 1% และ 2% เมื่อบ่มที่เวลา 7 วัน (รูปที่ 5.6) ไม่พบการเปลี่ยนใน

ขณะที่ตัวอย่างส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาว 3% จะพบว่า สารประกอบ C_2SH ที่ diffraction spacing 1.90 A° และ 2.70 A° เริ่มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

รูปที่ 5.10 แสดงการวิบัติและเสียรูปของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ปริมาณปูนขาว 2% และ 3% โดยที่ปริมาณปูนขาว 2% ก้อนตัวอย่างจะแตกออกเป็นก้อนย่อย ๆ ส่วนที่ปริมาณปูนขาว 3% ก้อนตัวอย่างจะแตกออกเป็นก้อนใหญ่

สำหรับก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 4% ขึ้นไป สามารถทำการทดสอบได้จนครบ 12 รอบ โดยที่ก้อนตัวอย่างยังคงสภาพรูปทรงกระบอก ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับ จำนวนรอบที่ทดสอบซึ่งพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียรวมจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนรอบของการทดสอบ และเมื่อปริมาณปูนขาวในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นค่าน้ำหนักที่สูญเสียรวมจะลดลงค่อนข้างเด่นชัด จนกระทั่งปริมาณปูนขาวในส่วนผสมตั้งแต่ 8% ขึ้นไป ค่าน้ำหนักที่สูญเสียรวมที่แต่ละรอบของการทดสอบจะไม่แตกต่างกันมากนัก ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมตามหัวข้อที่ 5.2 และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของส่วนผสมตามหัวที่ 5.3 กล่าวคือก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 4% ขึ้นไป จะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยา pozzolanic ระหว่าง Free lime(CaO) หรือ $Ca(OH)_2$ ในปูนขาวกับ Silicate ในกากแร่สังกะสีเป็นผลให้ได้สารประกอบใหม่คือ C_2SH ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสานทำให้ส่วนผสมมีกำลังและแข็งเพิ่มขึ้น สารประกอบใหม่ C_2SH นี้ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาว และระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.12 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความคงทนด้วยขบวนการ Wetting & Drying ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักที่สูญเสียรวม ค่าการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่ส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 8% ขึ้นไปจะคงสภาพหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ที่ปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 8% ปฏิกิริยา Pozzolanic ยังเกิดไม่สมบูรณ์กล่าวคือผลของ Cementation จากปฏิกิริยา Pozzolanic ยังมีน้อยกว่าการลดลงของค่าความหนาแน่นแห้งของก้อนตัวอย่างส่วนผสมเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาว ทำให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียค่าการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่น และปริมาณช่องว่าง

ตารางที่ 5.3 น้ำหนักสูญเสียของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ระหว่างการทดสอบความคงทน

ปูนขาว (%)	% น้ำหนักสูญเสียที่รอบที่												หมายเหตุ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ตัวอย่างแตกก่อน
4	0.2	1.93	2.88	3.37	4.81	5.53	6.41	6.89	7.85	8.94	9.45	10.20	
6	0.63	1.30	2.23	2.68	3.35	3.53	3.90	4.20	4.70	5.39	5.41	6.40	
8	0.25	0.90	1.00	1.30	1.53	1.90	2.27	2.51	2.70	2.85	3.10	3.46	
10	0.15	0.17	0.50	0.95	1.35	1.65	1.93	2.10	2.35	2.65	2.95	3.25	
12	0.14	1.12	1.10	1.23	1.35	1.97	2.30	2.68	3.12	3.40	3.62	3.62	

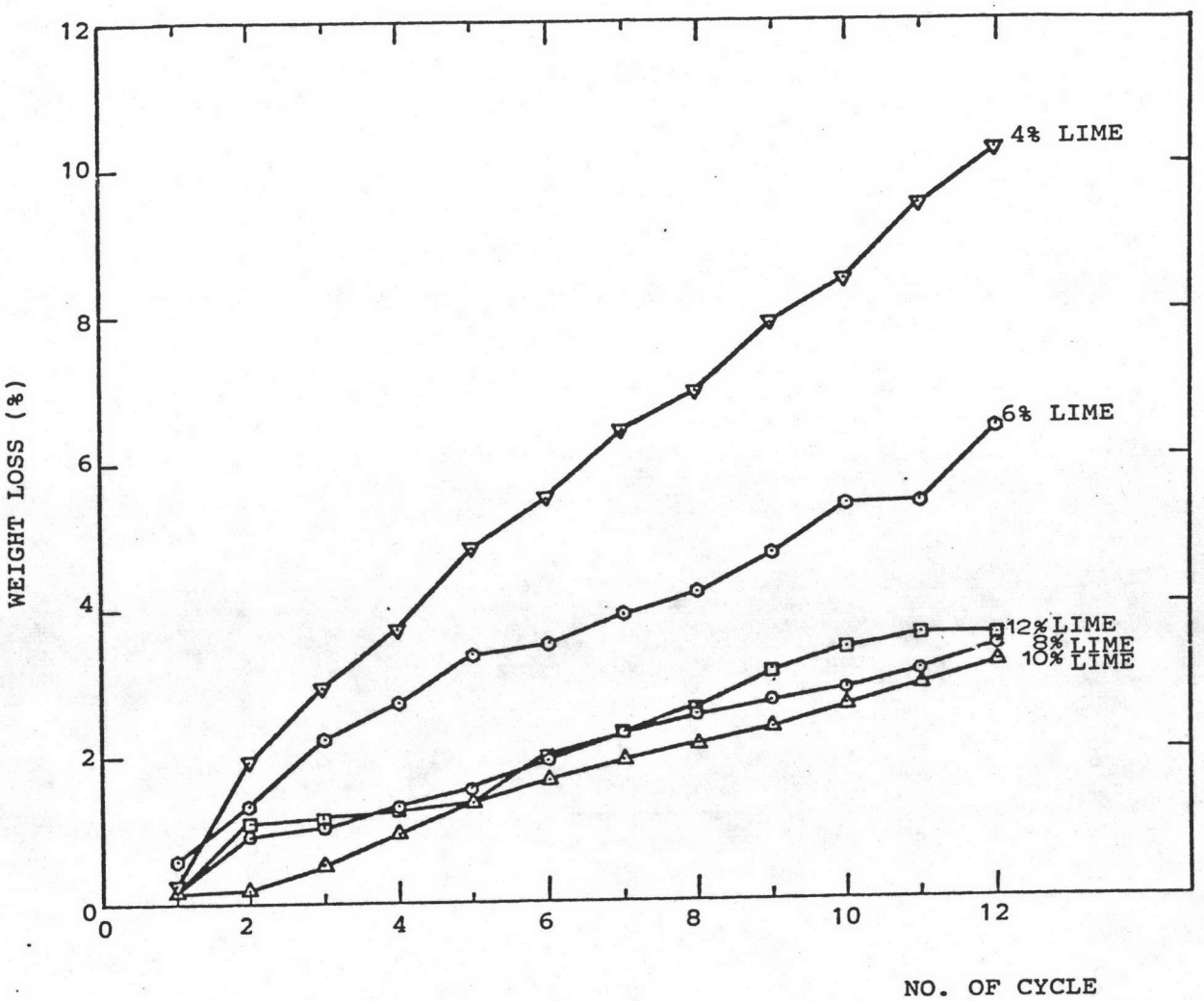
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบความคงทนของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ปูนขาว (%)	น้ำหนักสูญเสีย (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (%)
4	10.20	3.96	0.17
6	6.40	5.14	0.17
8	3.46	2.34	0.08
10	3.25	2.28	0.08
12	3.62	2.20	0.09

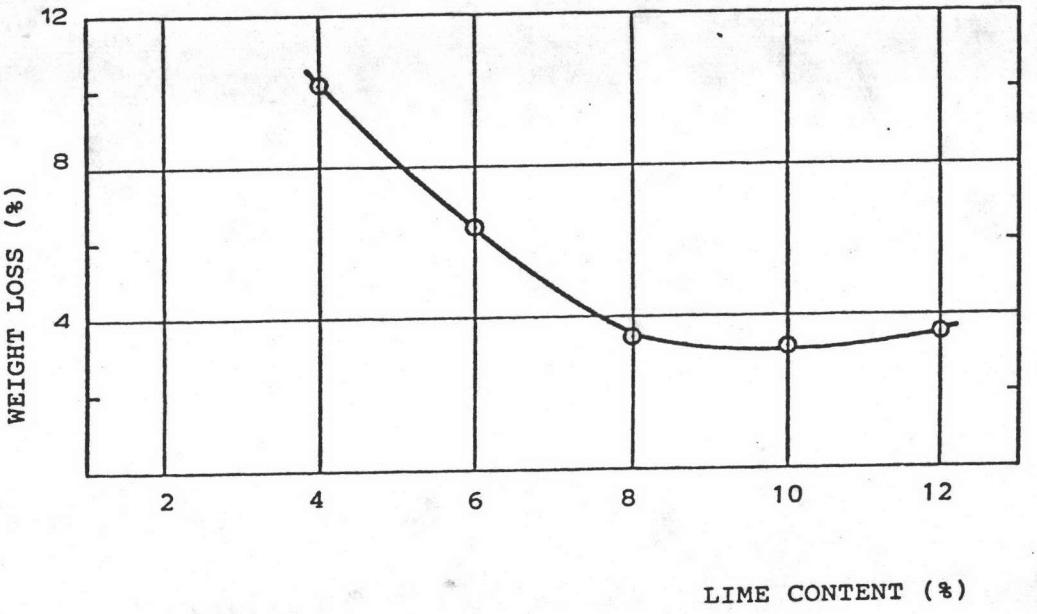
ก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี
กับปูนขาว 2% เสียสภาพจากการเป็น
ก้อนรูปทรงกระบอก ภายหลังการแช่ในน้ำ
2 ชั่วโมง

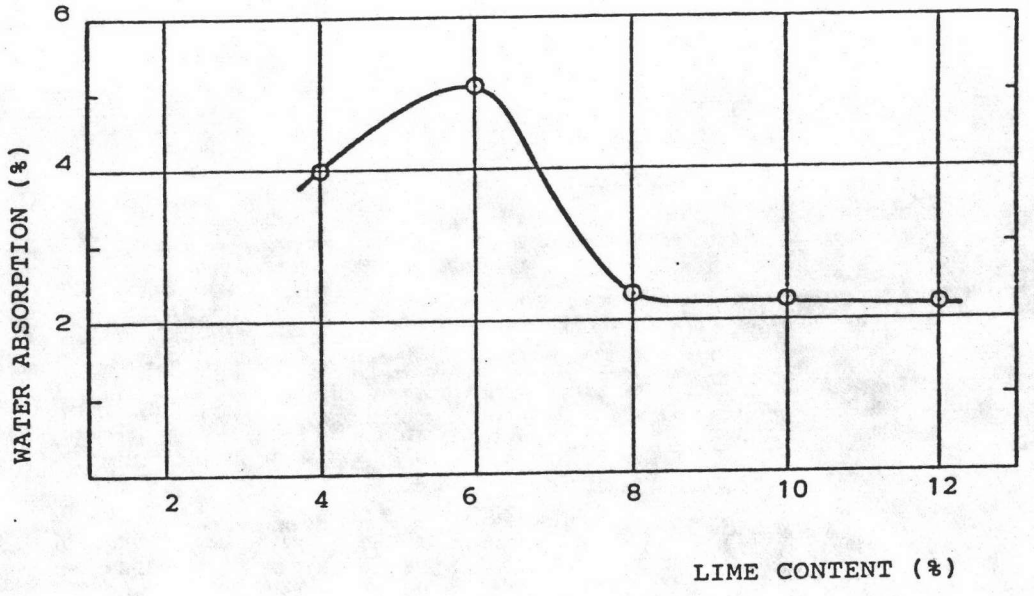
ก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี
กับปูนขาว 3% เสียสภาพจากการ
เป็นก้อนภายหลังการแช่น้ำในรอบที่ 2

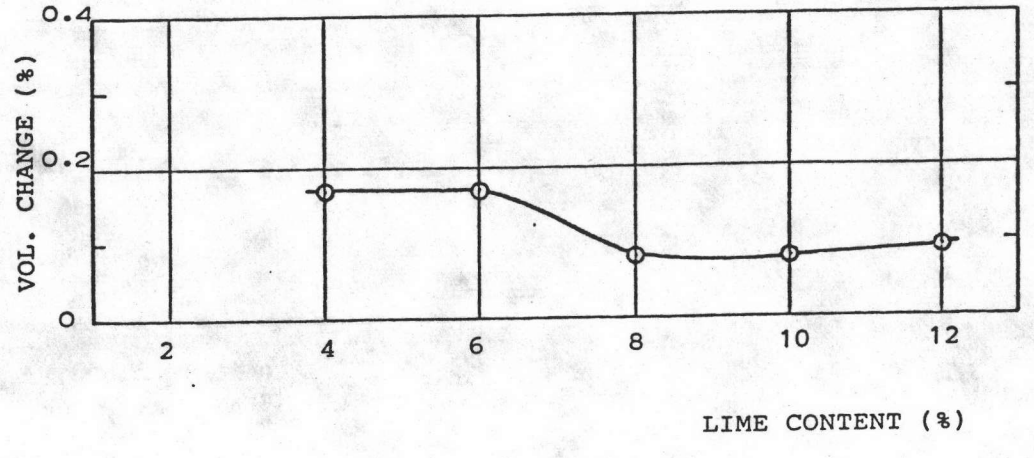
รูปที่ 5.10 แสดงการวิบัติและเสียรูปของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว
ที่ปริมาณปูนขาว 2% และ 3%



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว กับจำนวนรอบที่ทดสอบ







รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักที่สูญเสีย ค่าการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนปริมาตรของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ที่ปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 6% ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและที่ปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 6% ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างจะเริ่มลดลงจนปริมาณปูนขาวถึง 8% จะเริ่มคงที่ แสดงว่าที่ปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 6% ผลของ Cementation จากปฏิกิริยา pozzolanic จะมีมากพอที่ทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดเสถียรภาพทางด้านความคงทน นอกจากนี้ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อาจจะเกิด plug ขึ้นที่ช่องว่างทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

สำหรับเกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติทางด้านความคงทน ของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ASTMได้กำหนดไว้ว่า น้ำหนักสูญเสียสูงสุด(maximum weight loss)มีค่าได้ไม่เกิน 14 %

5.5 ผลการทดสอบการชะละลาย

เนื่องด้วยกากแร่สังกะสีมีโลหะหนักจำนวก แคดเมี่ยม(Cd) ตะกั่ว(Pb) และสังกะสี(Zn) ซึ่งมีผลต่อสภาวะแวดล้อม โดยโลหะหนักเหล่านี้ในกากแร่สังกะสีจะอยู่ในรูปของเกลือซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ ในการศึกษาถึงผลอันนี้จะเป็นเพียงการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยที่จะจำลองแบบการชะละลายโลหะหนักตามธรรมชาติ สำหรับรายละเอียดและวิธีการได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.2.5 และในภาคผนวก

การทดสอบการชะละลายกระทำเพื่อพิจารณาผลการปรับปรุงเสถียรภาพของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ว่าส่วนผสมมีเสถียรภาพเพียงพอที่จะยึดเกาะหรือป้องกันโลหะหนักที่อาจมีอยู่ในกากแร่สังกะสีไม่ให้ถูกชะละลายออกมาได้ พร้อมทั้งพิจารณาหาปริมาณปูนขาวที่ต่ำที่สุด ที่จะใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของส่วนผสมเพื่อจุดประสงค์ดังกล่าว ปริมาณปูนขาวที่จะพิจารณาจะเป็นปริมาณปูนขาวในกรณีของ Solidification approach

สำหรับการศึกษาผลการชะละลายได้กำหนดภาวะ ที่จะใช้ทำการทดสอบดังนี้

- ปริมาณน้ำที่ใช้ 4,000 ลบ.ซ.ม.
- จำนวนการกวน 650 รอบ/นาที
- อุณหภูมิขณะกวน 70 ° ซ
- เวลาที่ใช้กวน 2 ชั่วโมง
- น้ำหนักก้อนตัวอย่าง 1,300 - 1,400 กรัม

รูปที่ 5.13 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

วิธีการทดสอบทำได้โดยการวางก้อนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบในภาชนะ เติมน้ำให้ท่วมตัวอย่างประมาณ 4,000 ลบ.ซ.ม. จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิน้ำจนถึง 70 °ซ และควบคุมอุณหภูมิไว้แล้วทำการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อกวนจนครบเวลานำน้ำในภาชนะมาแยกสารแขวนลอยออก แล้วนำของเหลวที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขีดจำกัดดังนี้

ปริมาณสังกะสี (Zn)	วัดได้ต่ำสุด	0.008	ppm
ปริมาณแคดเมี่ยม (Cd)	วัดได้ต่ำสุด	0.009	ppm
ปริมาณตะกั่ว (Pb)	วัดได้ต่ำสุด	0.080	ppm

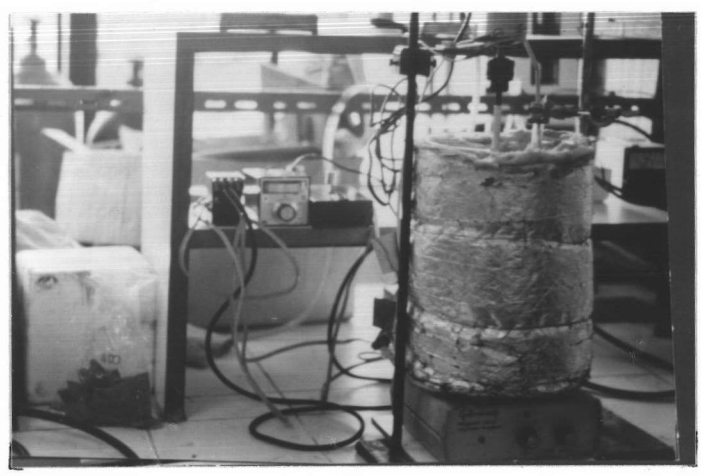
ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ว่าด้วยเรื่องปริมาณโลหะหนักที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานมีอยู่ด้วยกัน 11 ธาตุ เนื่องจากกากแร่สังกะสีมีโลหะหนักที่สำคัญ 3 ธาตุด้วยกัน ได้แก่ Zn, Cd และ Pb ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักจึงศึกษาเพียง 3 ธาตุนี้เท่านั้น

ตารางที่ 5.5 แสดงเกณฑ์ปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงาน

ตารางที่ 5.6 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่าง ส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ซึ่งพบว่าก้อนตัวอย่างกากแร่สังกะสีที่ไม่ได้ผสมปูนขาว ที่ผ่านการทดสอบการชะละลายตามภาวะและเงื่อนไขดังกล่าวจะมีปริมาณ Zn และ Cd ในสารละลายสูงถึง 115.6 ppm และ 1.504 ppm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม ยกเว้นปริมาณ Pb ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.08 ppm

ที่ปริมาณปูนขาว 0.5% เมื่อบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 4 วัน 5 วัน และ 7 วัน พบว่าภายหลังการทดสอบการชะละลายปริมาณของ Zn ในสารละลายจะลดลงมาก กล่าวคือมีค่าเพียงประมาณ 0.3 - 0.5 ppm ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานมาก แต่ปริมาณ Cd ถึงแม้จะลดลง แต่ก็ยังไม่น่าพอใจกล่าวคือยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย

ที่ปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 0.75% ขึ้นไป ก้อนตัวอย่างที่บ่มตั้งแต่ 4 วันขึ้นไป จะมีปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในสารละลายภายหลังการชะละลายต่ำกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะปริมาณ Cd จะมีค่าน้อยกว่า 0.009 ppm ซึ่งเป็นขีดจำกัดของเครื่องมือที่จะวัดได้ ทำให้ไม่ทราบปริมาณ Cd ที่แท้จริงในสารละลาย อย่างไรก็ดีอาจประเมินได้ว่าปริมาณโลหะหนักในสารละลายควรลดลงตามปริมาณปูนขาวในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณ Zn ในสารละลายซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไม่สัมพันธ์



รูปที่ 5.13 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย

ตารางที่ 5.5 เกณฑ์ปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

โลหะหนัก	Max. Standard content (ppm)
Zn	5.0
Cd	0.03
Pb	0.2

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ปูนขาว (%)	จำนวนวันที่บ่ม (วัน)	ปริมาณโลหะหนัก (ppm)		
		Zn	Cd	Pb
0*	7	115.6	1.504	<0.080
0.5*	4	0.480	0.03	<0.080
	5	0.493	0.048	<0.080
	7	0.329	0.340	<0.080
0.75	4	0.032	<0.009	<0.080
	5	0.026	<0.009	<0.080
	7	0.035	<0.009	<0.080
1.0	4	0.174	<0.009	<0.080
	5	<0.008	<0.009	<0.080
	7	0.009	<0.009	<0.080
2	7	0.015	<0.009	<0.080
3	7	0.055	<0.009	<0.080
4	7	0.105	<0.009	<0.080
6	7	0.014	<0.009	<0.080
10	7	0.073	<0.009	<0.080

หมายเหตุ * ตัวอย่างที่ให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด

กับปริมาณปูนขาวในส่วนผสมอาจเป็นเพราะว่าปริมาณ Zn ที่มีอยู่ในกากแร่สังกะสีแต่ละก้อนตัวอย่างมีความไม่สม่ำเสมอก็เป็นไปได้

ในระหว่างการทดลอง ก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสีที่มีปริมาณปูนขาว 3% และน้อยกว่าจะแตกในระหว่างการทดสอบการชะละลาย โดยเฉพาะการแตกของก้อนตัวอย่างจะมีความแตกต่างกันตามปริมาณปูนขาวในส่วนผสม กล่าวคือที่ปริมาณปูนขาว 3% ก้อนตัวอย่างจะแตกออกเป็นก้อน ๆ (เสียสภาพจากรูปทรงกระบอกเดิมก่อนทดสอบ) และก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณปูนขาว 2% จะมีการเสียสภาพที่รุนแรงขึ้น จนกระทั่งก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 1% ลดลงไป ก้อนตัวอย่างจะมีการเสียสภาพในลักษณะพังทะลายกองรวมกันที่ก้นภาชนะ (ลักษณะคล้ายโคลน) และจากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในสารละลายพบว่าต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ ได้แก่ $Zn(OH)_2$, $Cd(OH)_2$, และ $Pb(OH)_2$ และตกตะกอนมารวมกันที่ก้นภาชนะซึ่งเป็นคุณสมบัติของธาตุโลหะที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ เป็นผลให้สารละลายส่วนบนเมื่อแยกไปวิเคราะห์จึงพบปริมาณโลหะหนักน้อยมาก

สำหรับก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสีที่มีปริมาณปูนขาวตั้งแต่ 4% ขึ้นไป พบว่าภายหลังการทดสอบการชะละลาย ก้อนตัวอย่างยังคงสภาพเหมือนเดิมก่อนทำการทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก และข้อสังเกตุในระหว่างการทดสอบจึงอาจสรุปได้ว่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่จะใช้ในการป้องกันโลหะหนักออกจากกากแร่สังกะสีที่มีต่อการชะละลายไม่ควรน้อยกว่า 4% ทั้งนี้เป็นเพราะว่าที่ปริมาณปูนขาว 4% จะทำให้ก้อนตัวอย่างส่วนผสมเกิดการยึดประสานและคงสภาพอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกริยา Pozzolanic ตามที่ได้กล่าวไว้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3

นอกจากนี้แล้วในการทดสอบยังได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อการชะละลาย ที่สำคัญมีอยู่ 3 ตัวแปรคือ

1. อุณหภูมิ

น้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความสามารถละลายเกลือหรือสารประกอบบางชนิด ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายได้ดี จึงทำให้น้ำเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะทำการศึกษา ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 60 °ซ จนถึง 80 °ซ โดยใช้ตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4% และ pH ของน้ำที่ชะละลายมีค่าเท่ากับ 7

ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4% โดยแปรเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำในระหว่างการทดสอบซึ่งพบว่าปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ทั้ง 2 ตัวอย่าง โดยที่อุณหภูมิในการชะละลายที่ 80 °ซ จะให้ปริมาณ Zn สูงกว่าที่ 60 °ซ เพียงเล็กน้อย

2. ความเป็นกรด (pH)

โดยทั่วไปแล้วความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำมีผลต่อการชะละลาย และในสภาพที่เป็นจริงของกากแร่สังกะสีที่อยู่ในโรงงาน ก็ต้องพบกับสภาพที่เป็นกรดทำให้จำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงผลเนื่องจากความเป็นกรดของน้ำที่มาทำการชะละลายก้อนตัวอย่างในการทดสอบจะให้น้ำมีอุณหภูมิคงที่ที่ 80 ° ซ การเพิ่ม pH กระทำโดยการจะเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4% โดยแปรเปลี่ยนค่า pH จาก 4.5 จนถึง 7 จากผลที่ได้พบว่าความเป็นกรดจะมีผลต่อการชะละลายเพียงเล็กน้อย

3. การแตกเป็นชิ้นย่อย ๆ

ในการชะละลายพื้นที่ผิวที่จะถูกชะละลายมีผลต่อการชะละลายเป็นอย่างมาก กล่าวคือถ้าพื้นที่ผิวมีค่ามากการชะละลายก็ย่อมจะสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การทำตัวอย่างให้แตกเป็นชิ้นย่อย ๆ ก่อนการทดสอบจึงถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะทำการศึกษา สำหรับภาวะที่ใช้ในการทดสอบก็คืออุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่ที่ 80 °ซ pH มีค่าเท่ากับ 7 ตัวอย่างถูกทุบให้แตกออกเป็น 8 ชิ้น และส่วนผสมใช้ปริมาณปูนขาว 4%

ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่าง ซึ่งถูกทุบแตกออกเป็นชิ้นกับไม่ทุบแตก พบว่าปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ตัวอย่างทั้ง 2 ให้ผลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เป็นที่น่าสังเกตุว่าตัวอย่างที่ถูกทุบแตกพบปริมาณ Zn น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ทุบแตกเล็กน้อยทั้งนี้อาจเป็นเพราะความไม่สม่ำเสมอของปริมาณ Zn ในตัวอย่างกากแร่สังกะสีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดังได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวที่แปรเปลี่ยนอุณหภูมิในการชะละลาย

อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณโลหะหนัก (ppm)		
	Zn	Cd	Pb
60	0.064	<0.009	<0.08
80	0.089	<0.009	<0.08

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวที่แปรเปลี่ยนความเป็นกรดในการชะละลาย

ความเป็นกรด (pH)	ปริมาณโลหะหนัก (ppm)		
	Zn	Cd	Pb
7	0.089	<0.009	<0.08
6	0.59	<0.009	<0.08
4.5	0.062	<0.009	<0.08

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบการชะละลายก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ตัวอย่างไม่ทุบแตกกับทุบแตก

ลักษณะก้อนตัวอย่าง	ปริมาณโลหะหนัก (ppm)		
	Zn	Cd	Pb
ไม่ทุบให้แตก	0.089	<0.009	<0.08
ทุบให้แตก(8 ชิ้น)	0.076	<0.009	<0.08

จากการศึกษาต่อแปรทั้ง 3 ดังกล่าว พบว่ามีผลต่อการชะละลายเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้สืบเนื่องจากก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4% มีความแข็งอันเนื่องจากการเกิดการยึดประสานกัน และทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นได้

5.6 ผลของอุณหภูมิ

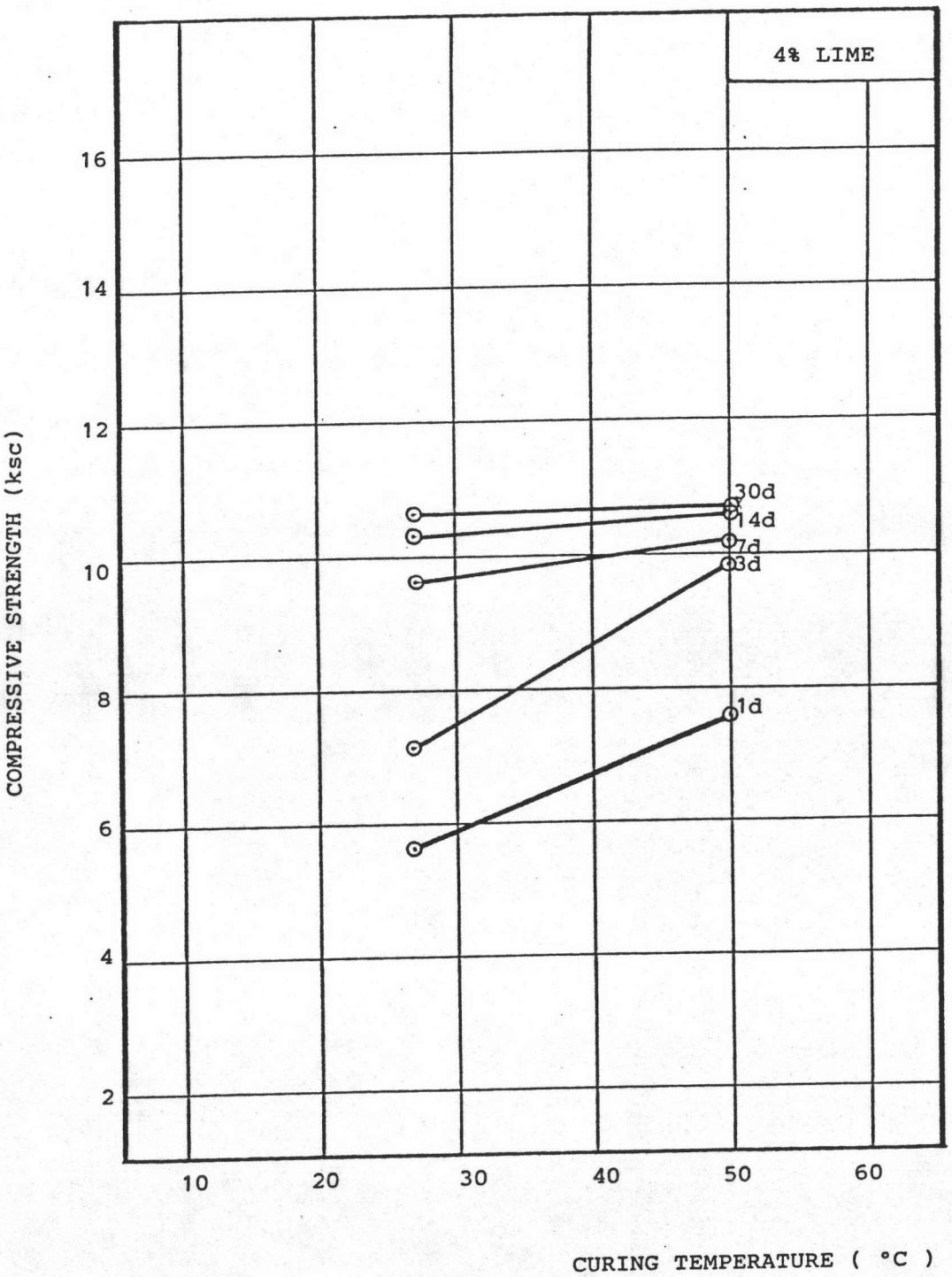
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ได้กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดเป็นดัชนีในการพิจารณา รายละเอียดในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3

การทดลองจะกระทำเฉพาะก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาวที่ 4% และ 10% เท่านั้น ซึ่งเป็นปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจากการศึกษาผลการชะละลายหรือ Solidification approach ตามหัวข้อที่ 5.5 และการทดลองค่ากำลังรับแรงอัดหรือ Engineering approach ตามหัวข้อที่ 5.2 ตามลำดับ

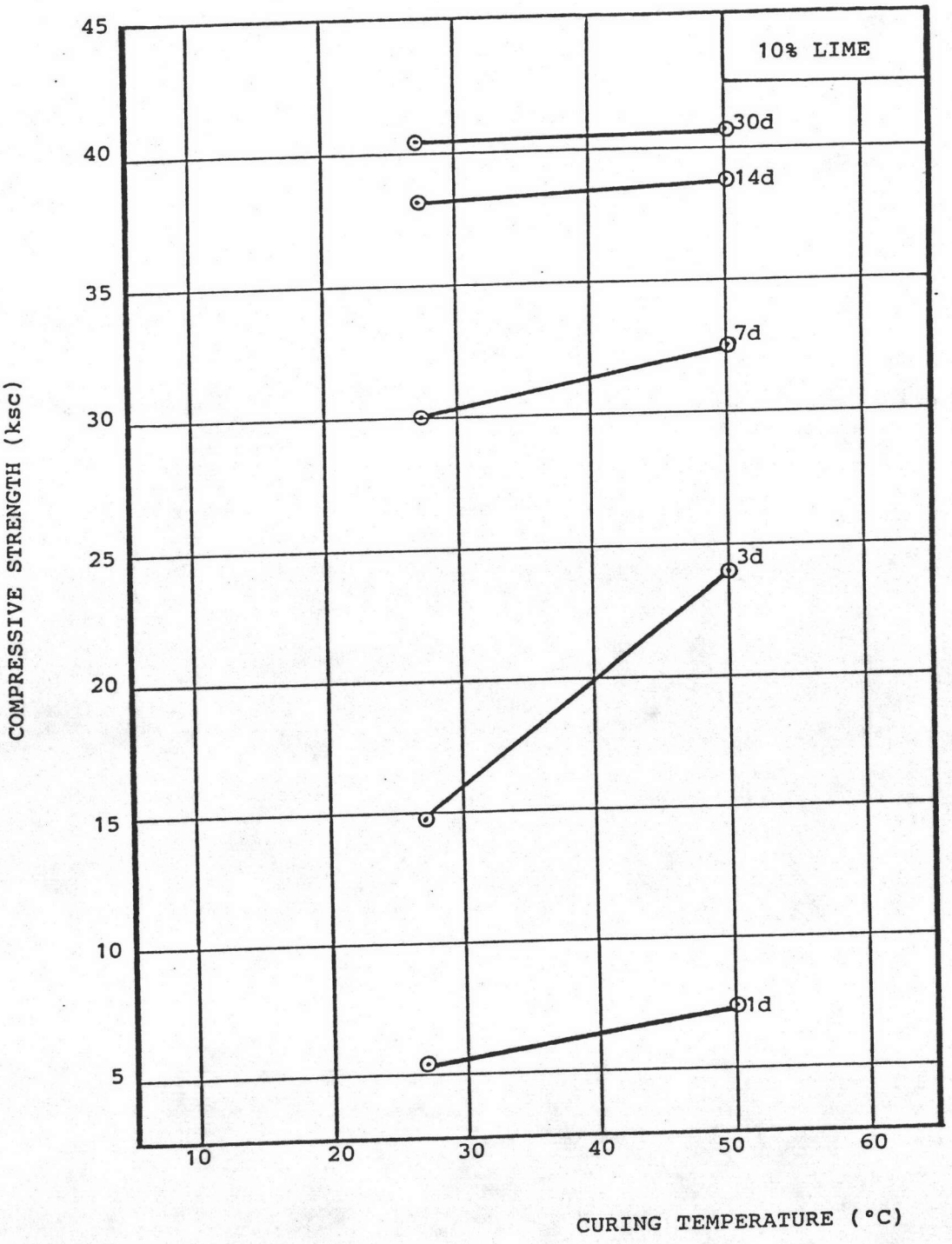
ตารางที่ 5.10 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ได้จากการทดสอบ รูปที่ 5.14 และ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอุณหภูมิบ่ม เมื่อส่วนผสมมีปริมาณปูนขาว 4% และ 10% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิบ่มเพิ่มขึ้นจาก 27 °ซ เป็น 50 °ซ ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4% (รูปที่ 5.14) จะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.40 เท่าที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน เมื่อระยะเวลาบ่มเป็น 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเพียง 1.06 เท่า ซึ่งเพิ่มขึ้นน้อยมาก และที่ส่วนผสมปริมาณปูนขาว 10% (รูปที่ 5.15) ผลของอุณหภูมิในการบ่มจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด เพิ่มขึ้นประมาณ 1.60 เท่าที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเพียง 1.08 เท่า ซึ่งเพิ่มขึ้นไม่มาก เช่นเดียวกับที่ปริมาณปูนขาว 4% แสดงว่าผลของอุณหภูมิในการบ่มจะมีผลเพียงที่ระยะเวลาบ่มน้อยกว่า 7 วันเท่านั้น

ตารางที่ 5.10 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ปริมาณปูนขาว (%)	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ซ.ม.^{2}) ที่อุณหภูมิในการบ่ม		เพิ่มขึ้น (เท่า)
		27 °ซ$^{(1)}$	50 °ซ$^{(2)}$	(2)/(1)
4	1	5.61	7.49	1.34
	3	7.13	9.98	1.40
	7	9.58	10.20	1.06
	14	10.29	10.60	1.03
	30	11.60	11.70	1.01
10	1	5.53	7.57	1.37
	3	14.78	24.00	1.62
	7	30.21	32.63	1.08
	14	38.25	38.75	1.01
	30	40.54	40.87	1.01



รูปที่ 5.14 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมากากแร่สังกะสี-ปูนขาว (4%)



รูปที่ 5.15 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว (10%)

5.7 ผลการทดสอบหาค่า CBR

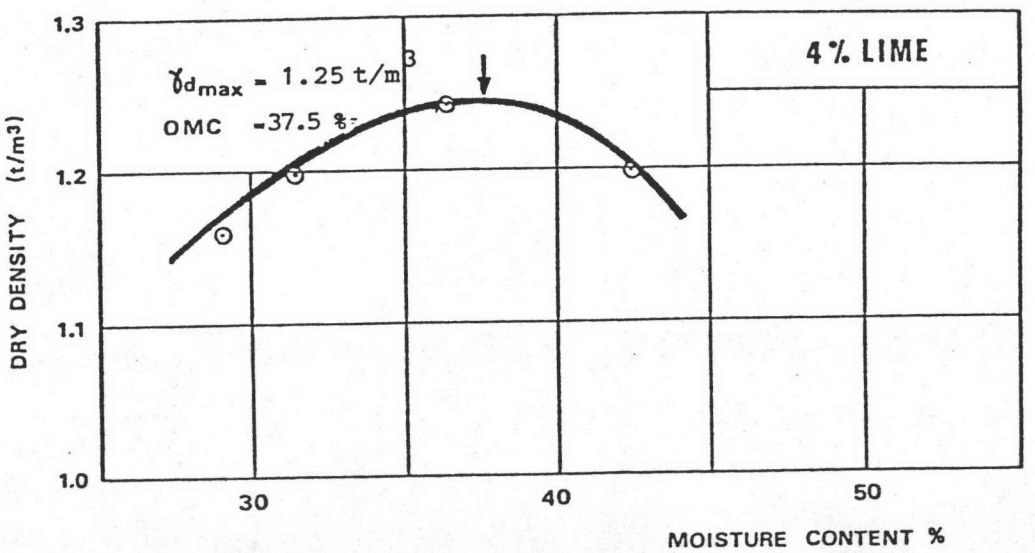
การทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ได้กระทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1883: Bearing ratio of laboratory compacted soils ซึ่งเป็นวิธีการทดลองที่กำหนดขึ้นเป็นมาตรฐานเพื่อหาค่าเปรียบเทียบ Bearing value ของวัสดุที่ทดลองกับหินมาตรฐาน ในกรณีที่จะกำหนดวัสดุทดลองเป็นวัสดุที่จะใช้ในงานก่อสร้างทาง ค่า CBR ที่ได้อาจนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างถนน และเพื่อใช้ควบคุมงานเมื่อบดทับให้ได้ความหนาแน่นและความชื้นตามต้องการ

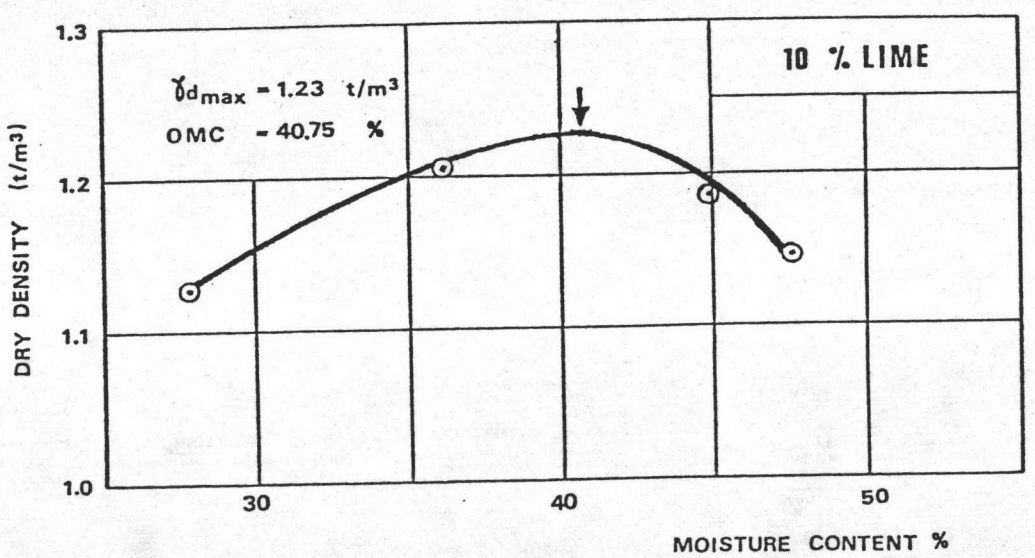
ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบหาค่า CBR ของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ปริมาณปูนขาว 4% และ 10% ซึ่งเป็นปริมาณปูนขาวที่พิจารณาในกรณีของ Solidification approach และ Engineering approach ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดวิธีการทดสอบได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.2.6

รูปที่ 5.16 แสดง Compaction curve ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อบดอัดตามวิธีมาตรฐานแบบ Modified Proctor ที่ปริมาณปูนขาว 4% และ 10%

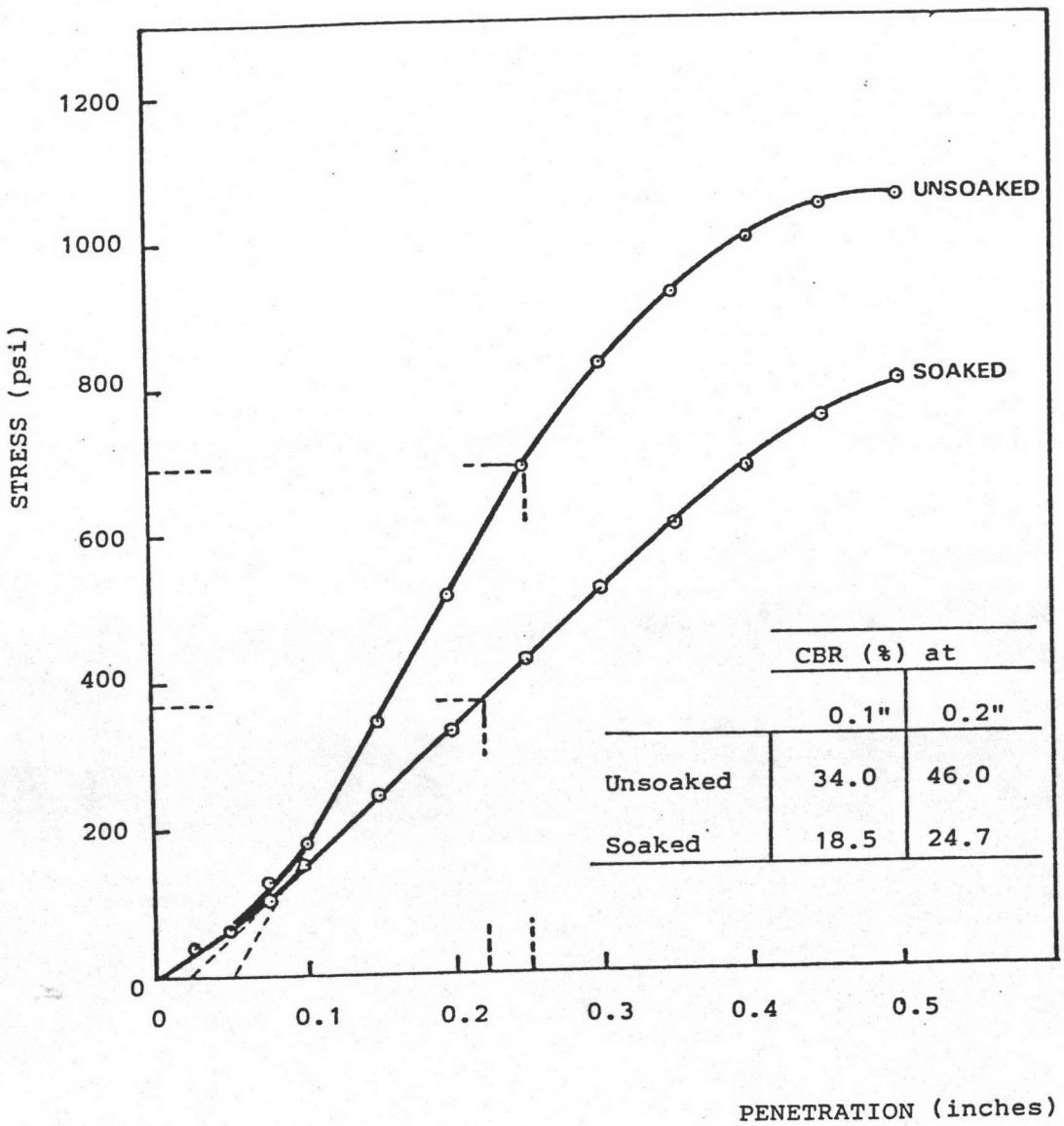
รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงผลการทดสอบหาค่า CBR ของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาว 4% และ 10% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาว 10% จะให้ค่า CBR สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป และสูงกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาว 4% ในกรณีที่ไม่แช่น้ำประมาณ 3 เท่าตัว และในกรณีแช่น้ำ 5 เท่าตัว ในทางปฏิบัติทั่วไปจะนิยมให้ค่า CBR กรณีแช่น้ำและที่ระยะ penetration 0.1 นิ้ว

ผลการทดสอบหาค่า CBR ดังกล่าวจะสอดคล้องกับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและความคงทน ซึ่งได้อธิบายไว้แล้ว ค่า CBR ที่ได้นี้ จะเป็นดัชนีอีกตัวหนึ่ง ที่จะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว และยังสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการที่จะนำส่วนผสมดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมต่อไป

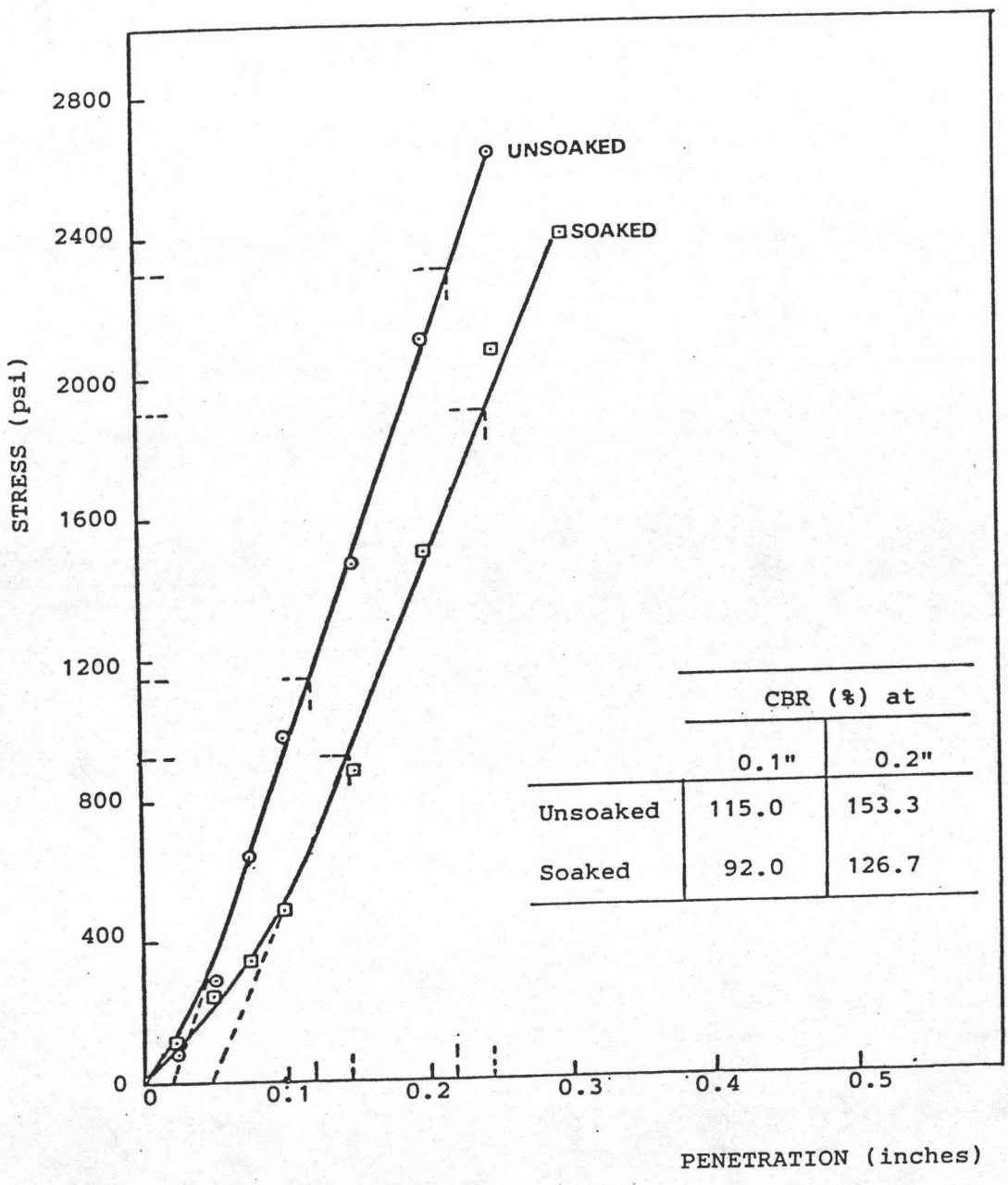




รูปที่ 5.16 Compaction curve ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว
(Modified Proctor)



รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบหาค่า CBR ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาว 4%



	CBR (%) at	
	0.1"	0.2"
Unsoaked	115.0	153.3
Soaked	92.0	126.7

รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบหาค่า CBR ของส่วนผสมกากแร่สังกะสีกับปริมาณปูนขาว 10%