

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างปูนเม็ด

ปูนเม็ด (Clinker) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีการเก็บตัวอย่างจาก บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โรงงานสระบุรี เริ่มตั้งแต่เดือน กันยายน 2547 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2548 รวม 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 7 กิโลกรัม (ดังอธิบายเป็นเลขที่ตัวอย่างและวันที่ที่เก็บในตารางที่ 4.1) นำปูนเม็ดที่ได้จากการเก็บตัวอย่างทั้งหมดเข้าสู่ขั้นตอนการบดลดขนาดให้สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ก่อนทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 (ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) เพื่อให้ได้ตัวอย่างเป็นของเหลวใส จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง ICP สามารถสรุปเป็นความเข้มข้นสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่าง 30 วัน ได้ดังตารางที่ 4.2 (สำหรับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP เฉลี่ย 3 ซ้ำ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.) และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ดตลอดช่วงที่มีการเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.1-4.5 โดยเรียงลำดับตามความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจพบ

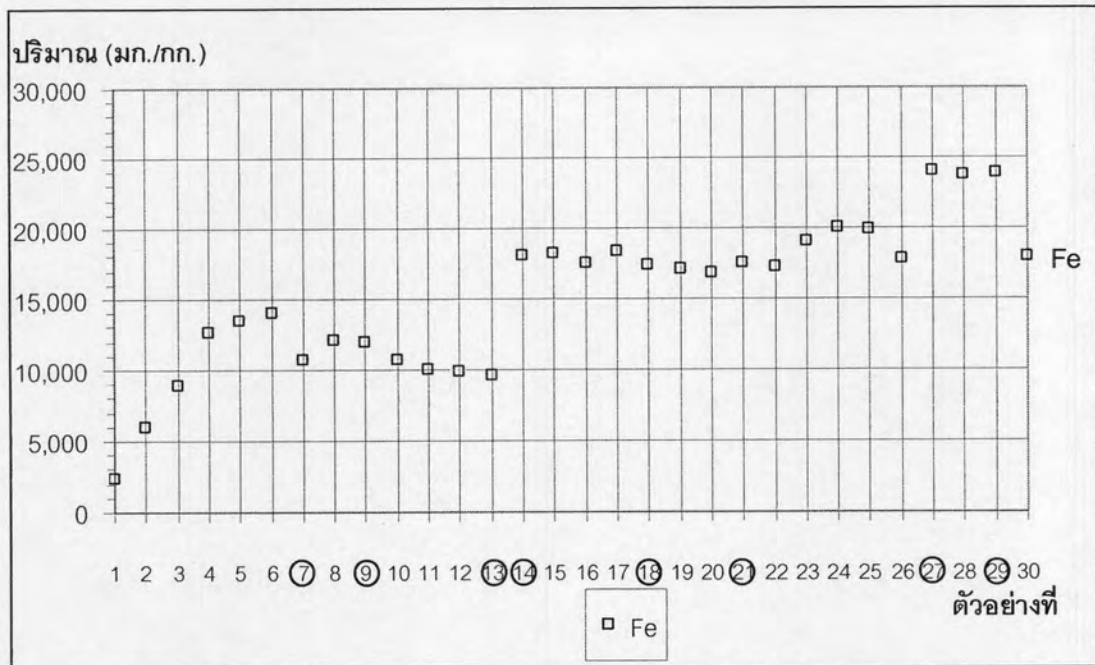
ตารางที่ 4.1 วันที่เก็บตัวอย่างปูนเม็ดที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่	วันที่เก็บ	ตัวอย่างที่	วันที่เก็บ	ตัวอย่างที่	วันที่เก็บ	ตัวอย่างที่	วันที่เก็บ
1	14/09/47	7	20/10/47	14	6/01/48	26	01/02/48
2	16/09/47	8	21/10/47	15	8/01/48	27	03/02/48
3	21/09/47	9	22/10/47	16	10/01/48	28	05/02/48
4	23/09/47	10	23/10/47	17	12/01/48	29	07/02/48
5	27/09/47	11	24/10/47	18	16/01/48	30	09/02/48
6	30/09/47	12	25/10/47	19	18/01/48		
		13	26/10/47	20	20/01/48		
				21	22/01/48		
				22	24/01/48		
				23	26/01/48		
				24	28/01/48		
				25	30/01/48		

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นสูงสุด-ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของโลหะหนักชนิดต่างๆในปูนเม็ด

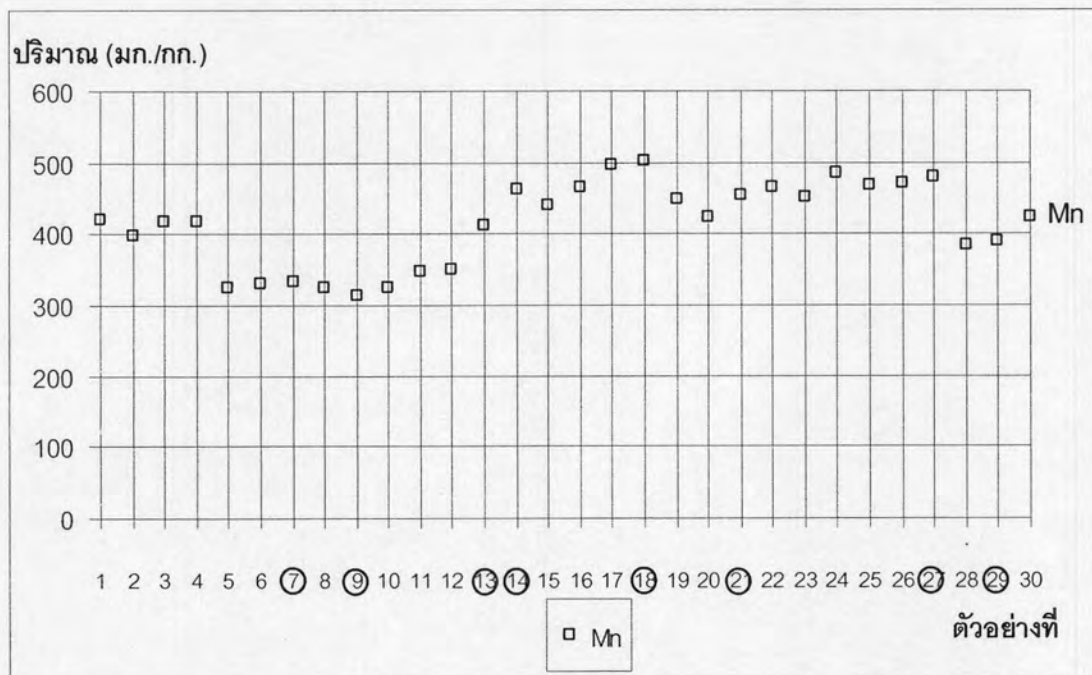
ชนิดของ โลหะหนัก	ปูนเม็ด			
	ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.
Ag	0.110	< 0.02	0.020	0.020
As	19.320	< 0.09	1.280	4.780
Ba	154.990	< 0.003	76.090	67.350
Be	< 0.001	< 0.01	< 0.001	0.000
Cd	2.800	< 0.01	0.180	0.690
Co	13.810	2.340	8.820	3.250
Cr	88.400	29.150	44.120	13.530
Cu	274.120	9.580	18.900	72.660
Fe	24,044.730	2,434.980	15,220.050	5,165.510
Ga	< 0.04	< 0.04	< 0.04	0.000
Hg	< 0.04	< 0.04	< 0.04	0.000
Mn	501.630	315.170	414.560	57.750
Ni	38.100	14.910	27.550	7.690
Pb	46.880	< 0.11	6.160	12.750
Se	23.160	< 0.10	9.720	8.970
Sr	281.090	126.290	213.260	41.750
Tl	< 0.25	< 0.25	< 0.25	0.000
V	87.500	40.110	68.510	14.970
Zn	342.350	33.140	86.690	85.290

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ด (รูปที่ 4.2-4.5) จะเห็นได้ว่าแมงกานีส (Mn) สตรอนเทียม (Sr) สังกะสี (Zn) และแบเรียม (Ba) มีความเข้มข้นสูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นตามลำดับ โดยแมงกานีสมีความเข้มข้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 414 มก./กก. ส่วนสตรอนเทียมนั้นมีความเข้มข้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 213 มก./กก. และโลหะทั้งหมดมีความเข้มข้นค่อนข้างผันผวนไปตามช่วงเดือนต่างๆ ที่เปลี่ยนไป โดยพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่จะสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2548 (ตั้งแต่ตัวอย่างที่ 14 เป็นต้นไป)



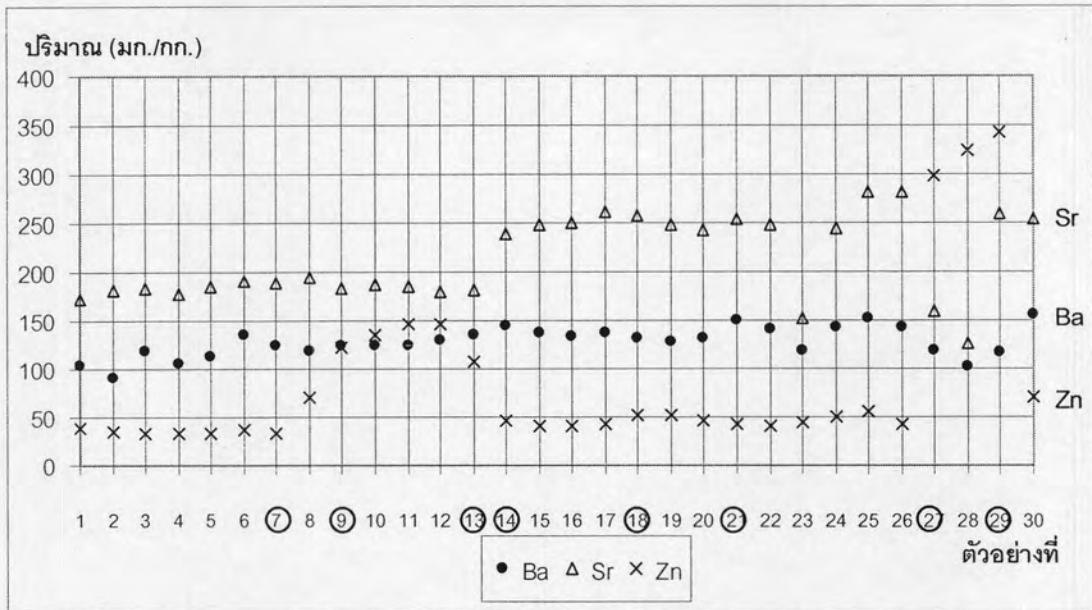
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Fe ในปูนเม็ด

หมายเหตุ : ○ วงกลมแสดงตัวอย่างที่เลือกไปทดสอบการชะละลายต่อไป

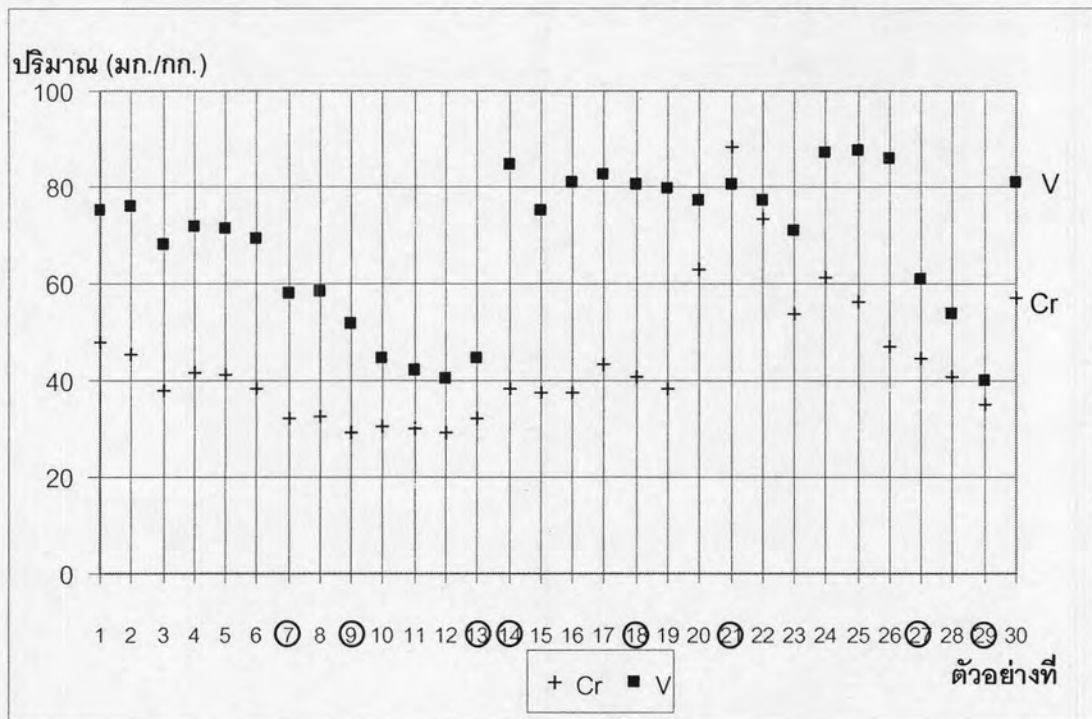


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Mn ในปูนเม็ด

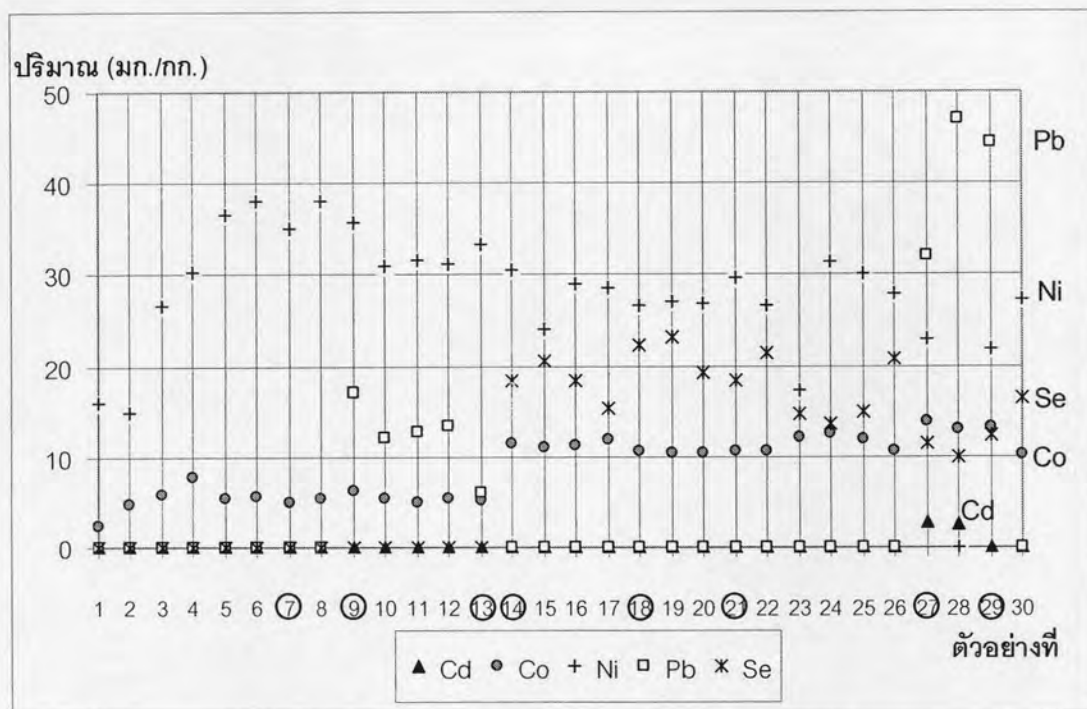
หมายเหตุ : ○ วงกลมแสดงตัวอย่างที่เลือกไปทดสอบการชะละลายต่อไป



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Ba Sr และ Zn ในปูนเม็ด
หมายเหตุ : ○ วงกลมแสดงตัวอย่างที่เลือกไปทดสอบการชะละลายต่อไป



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Cr และ V ในปูนเม็ด
หมายเหตุ : ○ วงกลมแสดงตัวอย่างที่เลือกไปทดสอบการชะละลายต่อไป



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Cd Co Ni Pb และ Sr ในปูนเม็ด
หมายเหตุ : ○ วงกลมแสดงตัวอย่างที่เลือกไปทดสอบการชะละลายต่อไป

4.1.1 การเลือกตัวอย่างซีเมนต์ไปทดสอบชะละลาย

ภายหลังการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดแล้ว นำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบและเลือกตัวอย่างรวม 8 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบการชะละลายต่อไปโดยมีเกณฑ์การตัดสินใจดังนี้

1. มีการกระจายตัวอย่างครอบคลุมทุกเดือน
2. โลหะหนักแต่ละชนิดมีความแตกต่างของปริมาณเริ่มต้นในปูนเม็ดอย่างเห็นได้ชัดเพื่อศึกษาผลการทดสอบการชะละลายที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะหนักมีปริมาณเริ่มต้นในปูนเม็ดที่แตกต่างกัน
3. ตัวอย่างปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปริมาณเริ่มต้นสูงๆ เพื่อศึกษาผลการชะละลายที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างที่มีโลหะหนักเริ่มต้นเป็นปริมาณมาก

ตัวอย่างปูนเม็ดที่เก็บมีทั้งสิ้น 4 เดือน ได้แก่ กันยายน ตุลาคม มกราคม และเดือนกุมภาพันธ์ (เก็บโดยบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด มหาชน แต่ละตัวอย่างเก็บ 1 ครั้ง ครั้งละ 7 กก) ซึ่งตัวอย่างซีเมนต์เดือนกันยายนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะนำมาทดสอบการชะละลายจึงเลือกใช้งานจากตัวอย่างที่เหลืออีก 3 เดือน เมื่อพิจารณาในแง่ของตัวอย่างที่มีปริมาณโลหะหนักสูงที่สุดได้ตัวอย่างวันที่

16 มกราคม 2548 โดยมีปริมาณ แอมงกานีสสูงที่สุดที่ 501.627 มก./กก.

22 มกราคม 2548 โดยมีปริมาณ โครเมียมสูงที่สุดที่ 88.398 มก./กก.

3 กุมภาพันธ์ 2548 โดยมีปริมาณ เหล็กสูงที่สุดที่ 24,044.727 มก./กก.

7 กุมภาพันธ์ 2548 โดยมีปริมาณ ทองแดงและสังกะสีสูงที่สุดที่ 274.120 มก./กก

และ 342.353 มก./กก. ตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างเดือนตุลาคม 2547 นั้น เลือกตัวอย่างวันที่ 20 และ 22 เนื่องจากโดยรวมแล้วมีปริมาณโลหะหนักใกล้เคียงกัน ยกเว้นโลหะหนักบางธาตุที่มีปริมาณแตกต่างกันอย่างมาก เช่น ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี สำหรับตัวอย่างอีก 2 วันที่เลือกคือ ตัวอย่างวันที่ 26 ตุลาคม 2547 และ 6 มกราคม 2548 ซึ่งมีปริมาณโลหะหนักแตกต่างกันอย่างชัดเจน ตารางที่ 4.3 เป็นตารางสรุปตัวอย่างที่นำไปทดสอบการชะละลายต่อไป โดยแสดงผลเฉพาะโลหะหนักที่มีผลต่อการพิจารณาเลือกตัวอย่างเท่านั้น (สำหรับชนิดละปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่พบในปูนเม็ดอยู่ในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.3 ภาพรวมความเข้มข้นของโลหะหนักบางชนิดในตัวอย่างซีเมนต์ที่เลือกไปทดสอบชะละลาย

ตย.	วันที่	Ba	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	V	Zn
		มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.	มก./กก.
7	20/10/47	123.714	31.991	11.052	10,762.326	334.101	34.960	<0.110	<0.102	189.602	57.956	33.142
9	22/10/47	123.336	29.153	98.525	12,013.421	315.172	35.741	17.047	<0.102	183.500	51.542	122.170
13	26/10/47	135.731	32.177	66.183	9,597.753	411.040	33.272	6.154	<0.102	181.212	44.753	107.212
14	6/1/48	143.955	38.148	14.623	18,097.141	462.164	30.534	<0.110	18.308	238.882	84.518	47.082
18	16/1/48	131.671	40.864	15.401	17,351.372	501.627	26.728	<0.110	22.338	258.098	80.434	51.625
21	22/1/48	150.491	88.398	11.370	17,458.871	453.206	29.717	<0.110	18.436	252.979	80.571	42.166
27	3/2/48	117.603	44.603	202.334	24,044.727	480.598	22.859	31.975	11.516	160.094	60.956	297.372
29	7/2/48	116.890	34.864	274.120	23,831.049	388.851	21.953	44.420	12.399	258.966	40.109	342.353

4.2 การชะละลายของซีเมนต์เพสต์

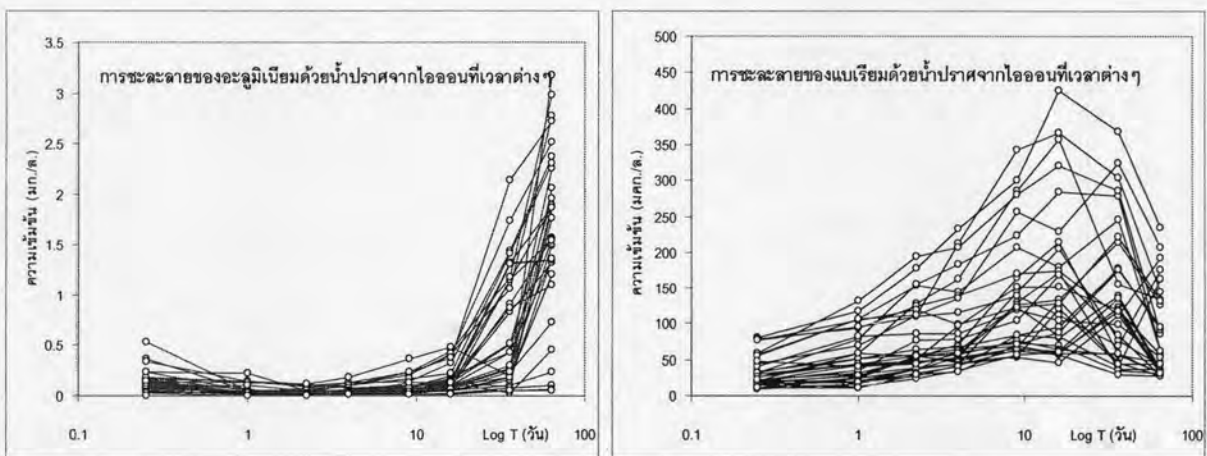
การใช้งานซีเมนต์ไปผลิตเป็นภาชนะบรรจุน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคนั้นการชะละลายที่เกิดจริงจะเกิดเพียงด้านเดียวคือภายในภาชนะที่สัมผัสกับน้ำ การศึกษาการชะละลายจึงได้ทดสอบการชะละลายเพียงด้านเดียวและอาศัยการประยุกต์การทดสอบจากมาตรฐานการ

ชะละลายของ EA NEN 7375:2004 มาเป็นตัวช่วยในการทดสอบเนื่องจากมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงคือ ไม่มีการกวนเขย่ารวมไปจนถึงไม่มีการทำลายตัวอย่าง

4.2.1 ภาพรวมผลการทดสอบการชะละลาย

จากการศึกษาการชะละลายของธาตุทั้งสิ้น 18 ชนิด ได้แก่ Ag Al As B Ba Be Ca Cd Cr Cu Fe Mn Ni Pb Se Sr V และ Zn พบว่ามีธาตุอยู่ 3 ชนิดที่ไม่สามารถตรวจวัดการชะละลายได้แก่ Ag As และ Se ส่วนธาตุที่มีการชะละลายออกมาบ้างเล็กน้อยได้แก่ Fe และ Cu ดังแสดงอยู่ในตารางที่ ข.65-ข.128 (ภาคผนวก ข.) การชะละลายโดยรวมมีตั้งแต่ระดับ มคก./ล. ไปจนถึงระดับ มก./ล. โดยธาตุแต่ละชนิดแสดงพฤติกรรมของการชะละลายแตกต่างกันออกไป ซึ่งมีทั้งชนิดที่มีแบบแผนชัดเจน ไปจนถึงธาตุที่ไม่พบแบบแผนในการชะละลายชัดเจนซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ในระดับต่ำ

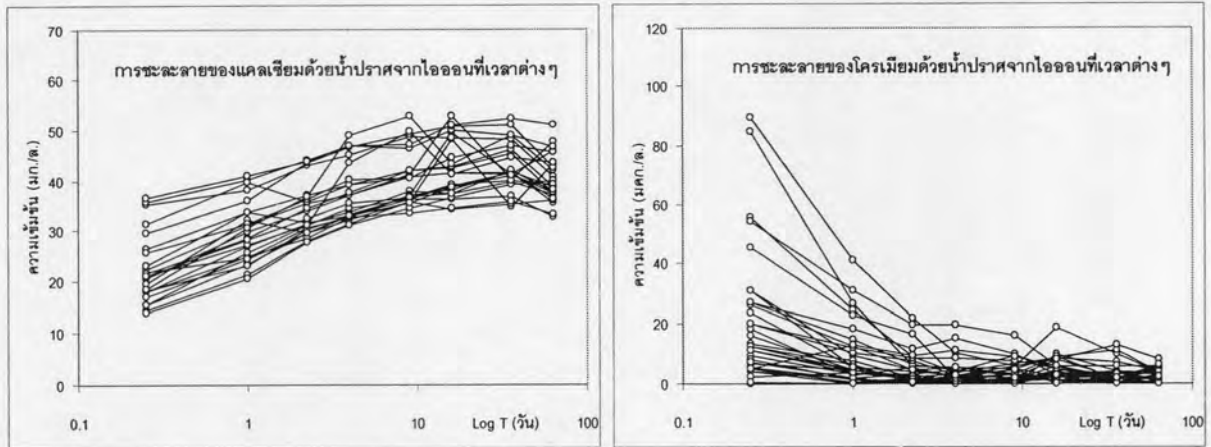
รูปที่ 4.6 – 4.8 แสดงการชะละลายของ Al Ba Ca Cr และ Sr ซึ่งเป็นการพล็อตรวมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทุกชุดทดสอบ (ทั้ง 8 วัน) ที่ L/S Ratio ทุกค่า (8 20 30 และ 40) โดยเลือกน้ำปราศจากไอออนเป็นตัวแทนของสารชะละลายเพื่อแสดงภาพรวมของการชะละลายของธาตุที่มีการชะละลายอย่างมีแบบแผน โดย แกนตั้ง (y) เป็นความเข้มข้น มีหน่วยเป็น มคก./ล. และ มก./ล. ส่วนแกนนอน (x) เป็น Log ของเวลา มีหน่วยเป็นวัน



รูปที่ 4.6 ภาพรวมการชะละลายของ (ซ้าย) Al (ขวา) Ba ด้วยน้ำปราศจากไอออน

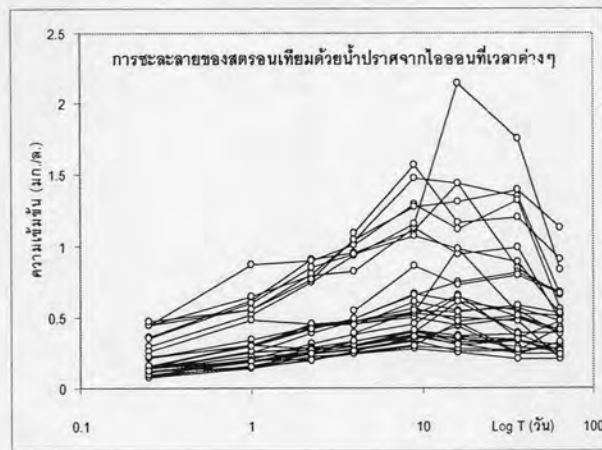
จากภาพที่ 4.6 (ซ้าย) แสดงภาพรวมการชะละลายของ Al ตลอดการทดสอบซึ่งจะเห็นได้ว่า Al เกิดการชะละลายตั้งแต่ช่วงแรกของการทดสอบ (6 ชั่วโมงแรก) จากนั้นความเข้มข้นของ Al ลดต่ำลงระหว่างการทดสอบและเกิดการชะละลายของ Al อีกครั้งในช่วงท้ายของการทดสอบ (ตั้งแต่ 16 วัน – 64 วัน) สำหรับการชะละลายของ Ba นั้นแสดงอยู่ในภาพที่ 4.6 (ขวา) ซึ่งความ

เข้มข้นของ Ba ถูกชะละลายออกมาตั้งแต่ในช่วงแรกของการทดสอบและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา การทดสอบแต่กลับลดลงเมื่อถึงช่วงท้ายของการทดสอบ โดยการชะละลายสูงสุดของ Ba อยู่ที่ประมาณ 9-16 วัน



รูปที่ 4.7 ภาพรวมการชะละลายของ (ซ้าย) Ca (ขวา) Cr ด้วยน้ำปราศจากไอออน

สำหรับการชะละลายของ Ca และ Cr นั้นแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งการชะละลายของ Ca นั้นเริ่มเกิดตั้งแต่ช่วงแรกของการทดสอบการชะละลายและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบแต่ช่วงท้ายของการทดสอบพบว่า ปริมาณแคลเซียมที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.7 ส่วนการชะละลายของ Cr นั้นเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการทดสอบเนื่องจากโครเมียมไม่สามารถตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์จึงถูกดูดติดอยู่บนผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์และเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าเมื่อทำการทดสอบการชะละลาย (Seidel, 1959 อ้างถึงใน Achternbosch และคณะ, 2003) และความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเมื่อเวลาของการทดสอบผ่านไป เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของ Cr จะมีค่าสูงที่สุดในสภาวะที่เป็นกลาง (van der Sloot และคณะ, 1997) ซึ่งแตกต่างจากในสภาวะการชะละลายที่ผ่านการทดสอบแล้วโดยมีภาวะเป็นด่างจึงไม่เกิดการชะละลายของโครเมียม



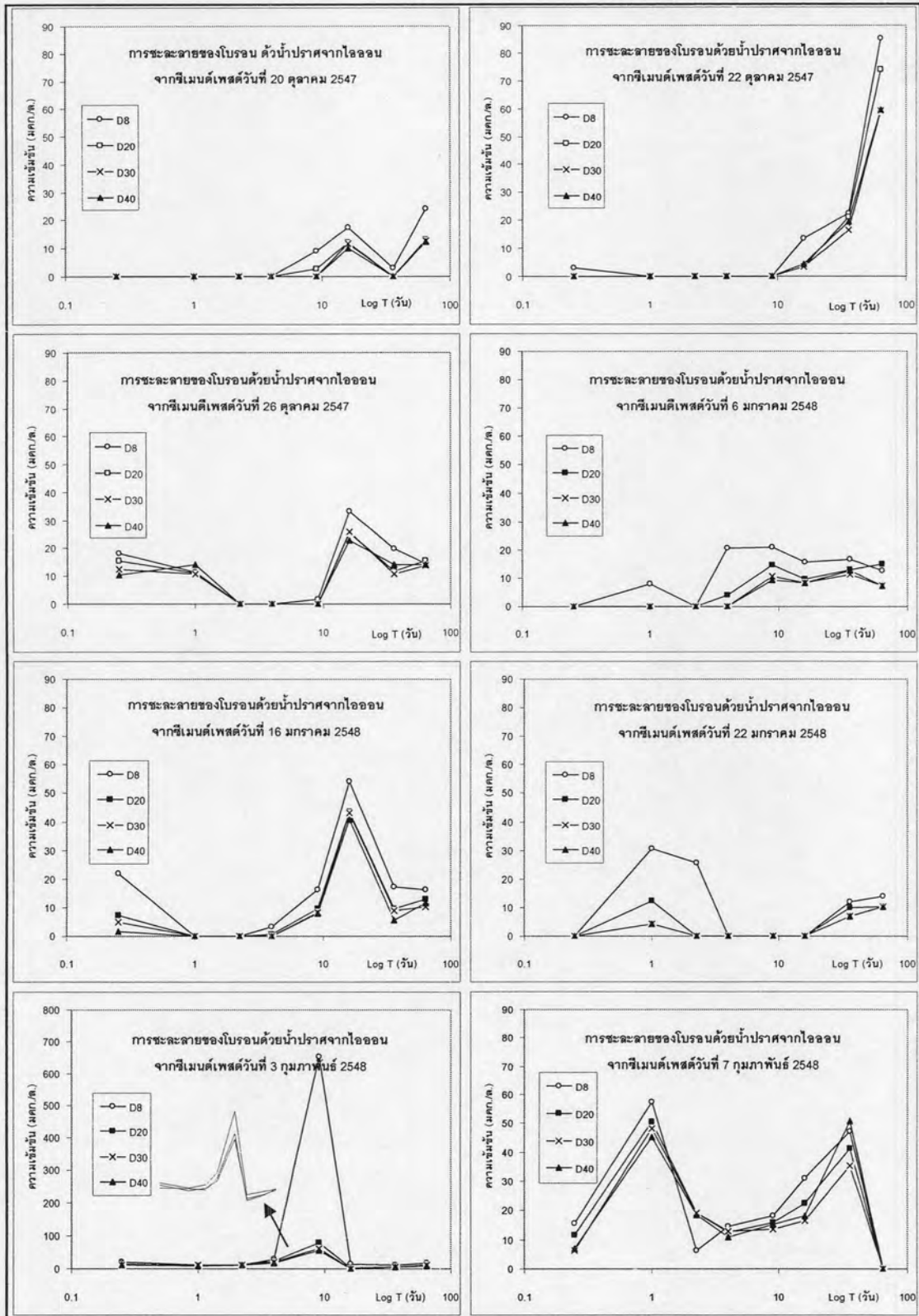
รูปที่ 4.8 ภาพรวมการชะละลายของสตรอนเทียมด้วยน้ำปราศจากไอออน

การชะละลายของสตรอนเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.8 นั้นมีความใกล้เคียงกับ Ba กล่าวคือ เกิดการชะละลายตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบและมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่ความเข้มข้นกลับลดลงเมื่อถึงช่วงท้ายของการทดสอบ รูปที่ 4.9-4.16 แสดงการชะละลายของธาตุที่ไม่พบแบบแผนชัดเจน ได้แก่ B Be Cd Mn Ni Pb V และ Zn

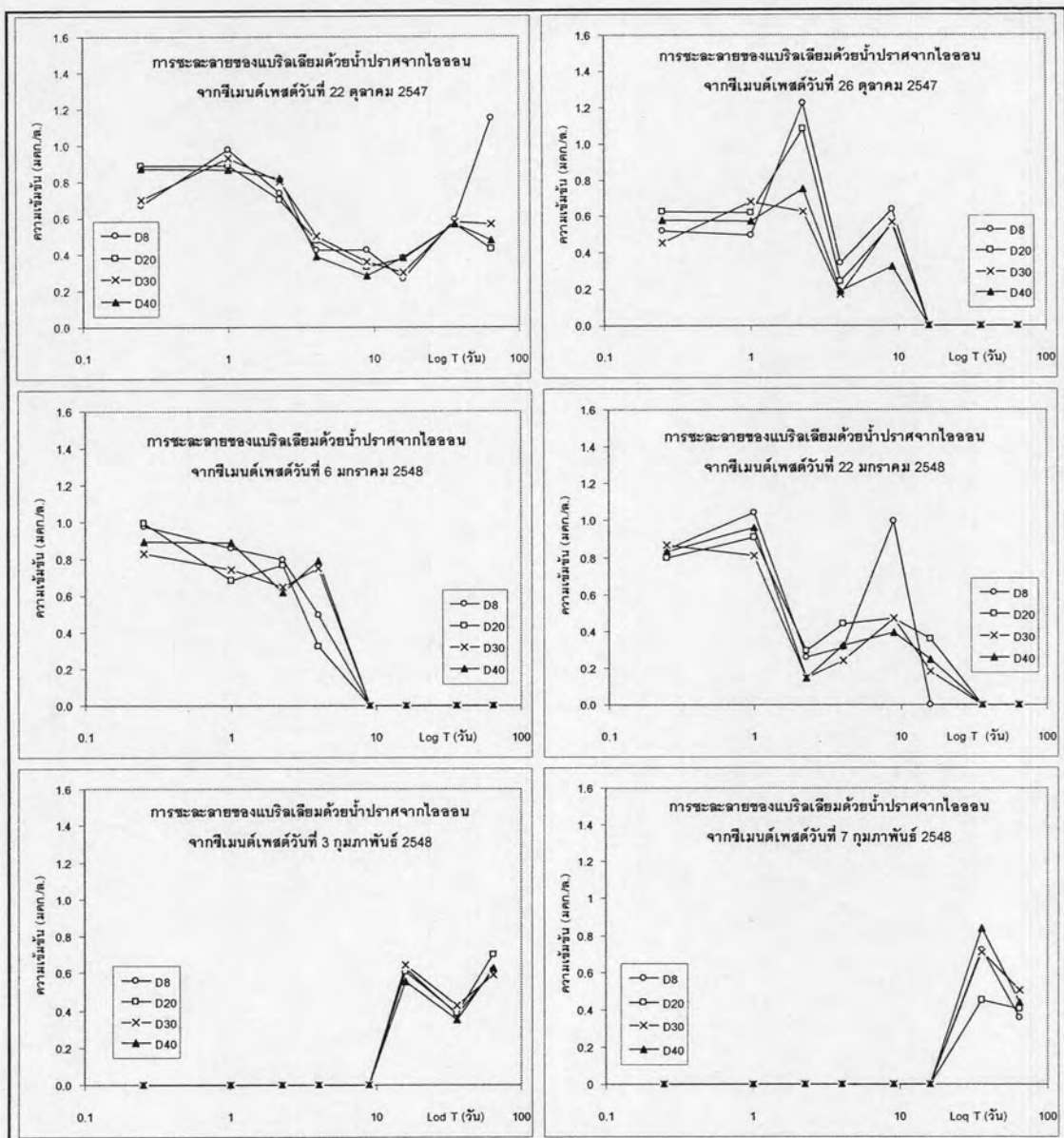
การชะละลายของ B ดังแสดงในรูปที่ 4.9 มีความแตกต่างกันในแต่ละวัน โดยรวมการชะละลายเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ ส่วนการชะละลายของ Be แสดงอยู่ในรูปที่ 4.10 จะสามารถแบ่งการชะละลายออกได้คร่าว ๆ เป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแรกจะเกิดการชะละลายตั้งแต่ช่วงแรกของการทดสอบ (ตัวอย่างเดือนตุลาคม และเดือนมกราคม) และความเข้มข้นของ Be ลดลงเมื่อถึงช่วงสุดท้ายของการทดสอบ กับอีกกลุ่มหนึ่ง คือตัวอย่างเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งการชะละลายของ Be ออกจากซีเมนต์เพสต์ในเดือนนี้จะกลับกับส่วนที่กล่าวมาข้างต้น คือเกิดการชะละลายเมื่อการทดสอบเริ่มเข้าสู่ช่วงกลางและท้าย รูปที่ 4.11 แสดงความแปรปรวนในการชะละลายอย่างมากของ Cd

ความเข้มข้นของ Mn ที่ชะละลายออกมาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ในแต่ละวันมีความแตกต่างมากอยู่ในช่วงประมาณ 0-400 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งยังพอเห็นภาพรวมของการชะละลายได้คือการชะละลายเกิดขึ้นมากในช่วงกลางของการทดสอบและลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการทดสอบ

Ni Pb และ V แสดงความแปรปรวนในการชะละลายอย่างมากเช่นเดียวกับ Cd ดังแสดงในรูปที่ 4.13 -4.15 ตามลำดับ ส่วน Zn เกิดการชะละลายเป็นช่วงๆ ตลอดการทดสอบ โดยพบว่าค่า L/S Ratio เท่ากับ 8 มีการชะละลายสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอื่น ๆ โดยแสดงภาพรวมการชะละลายของ Zn ไว้ในรูปที่ 4.16

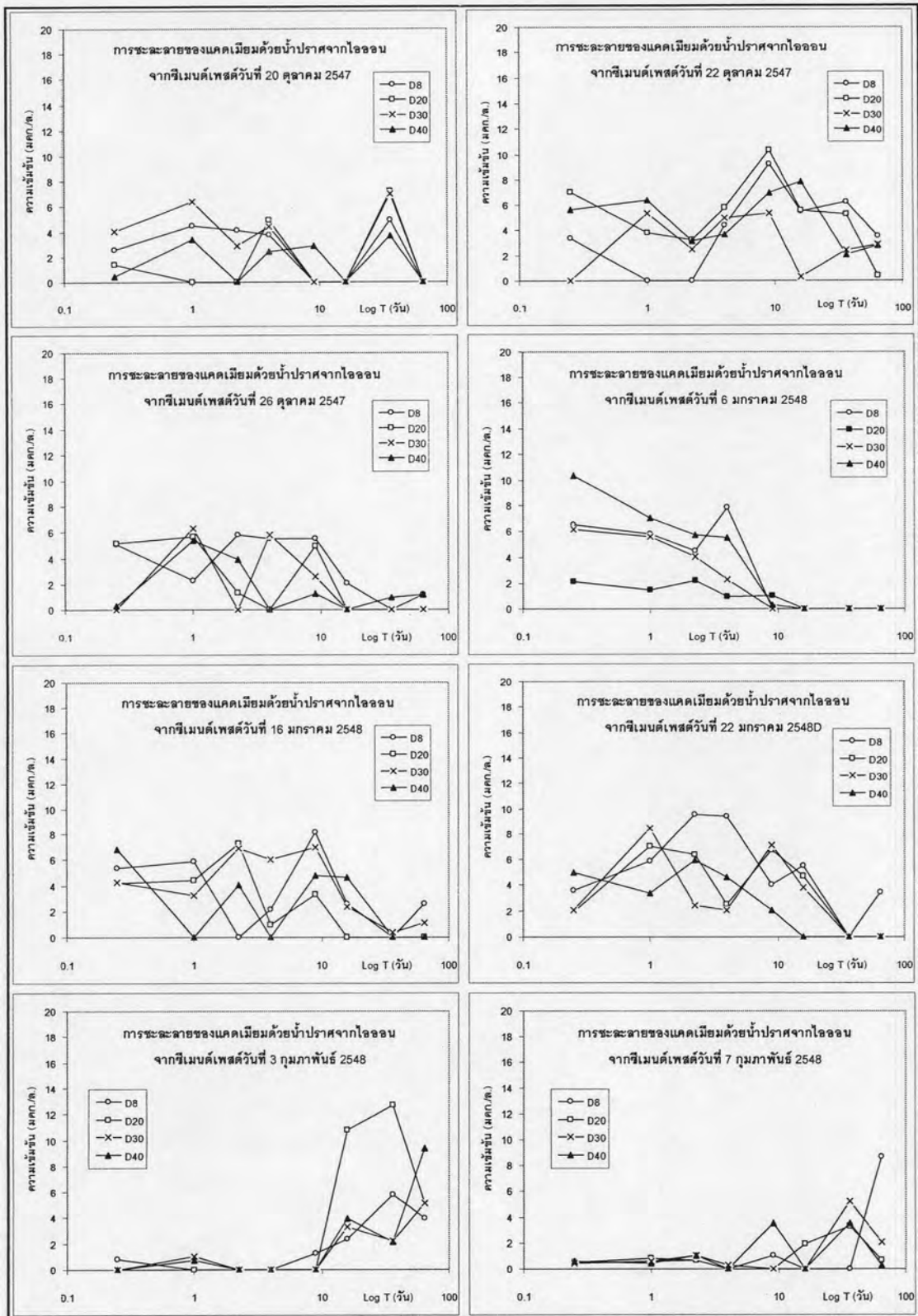


รูปที่ 4.9 ภาพรวมการชะละลายของ B จากตัวอย่างซีเมนต์พิเศษต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน
คำอธิบายกราฟ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ $L/S = 8$



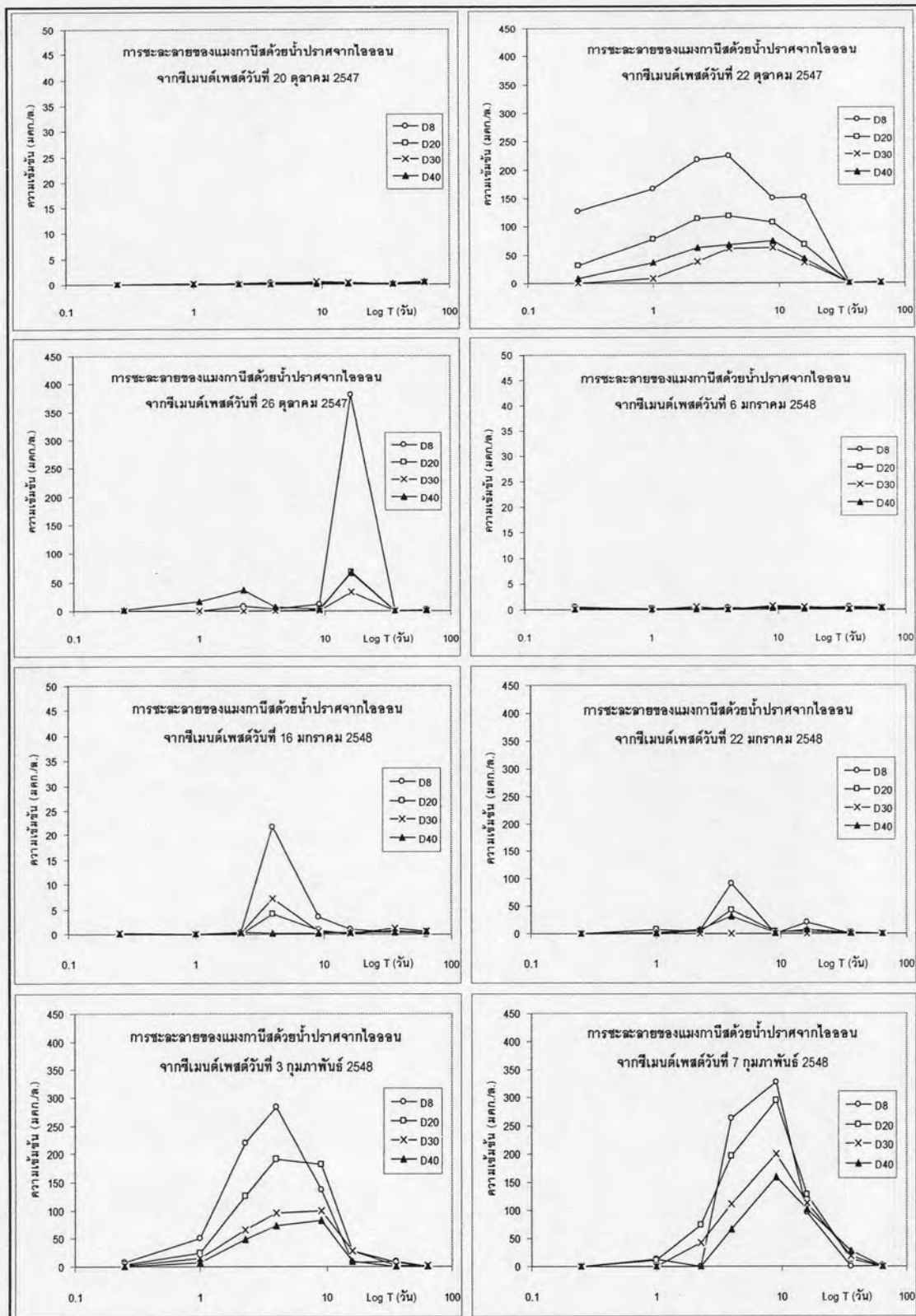
รูปที่ 4.10 ภาพรวมการชะละลายของ Be จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน

คำอธิบายกราฟ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ $L/S = 8$

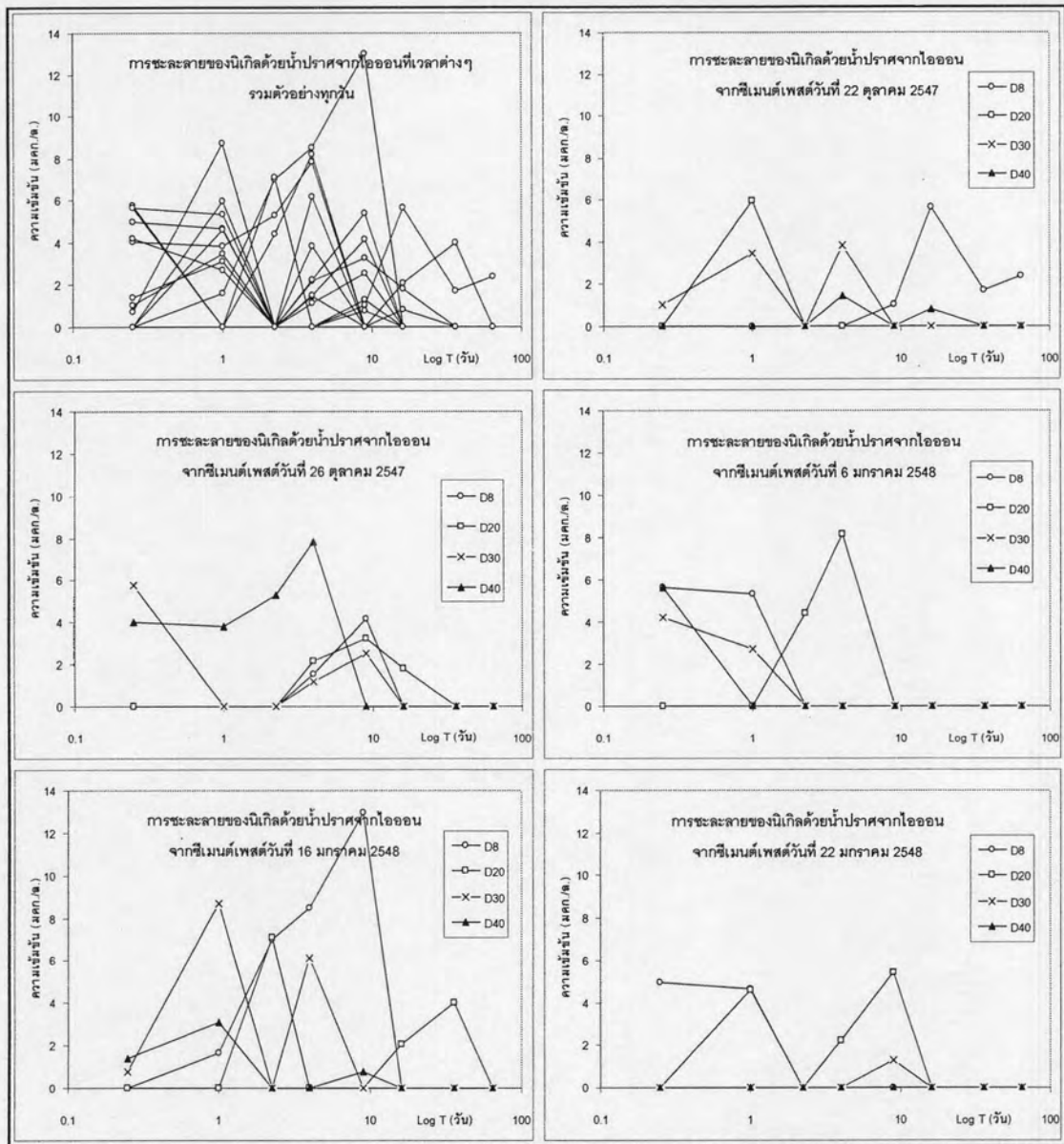


รูปที่ 4.11 ภาพรวมการชะละลายของ Cd จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน

คำอธิบายกราฟ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ L/S = 8

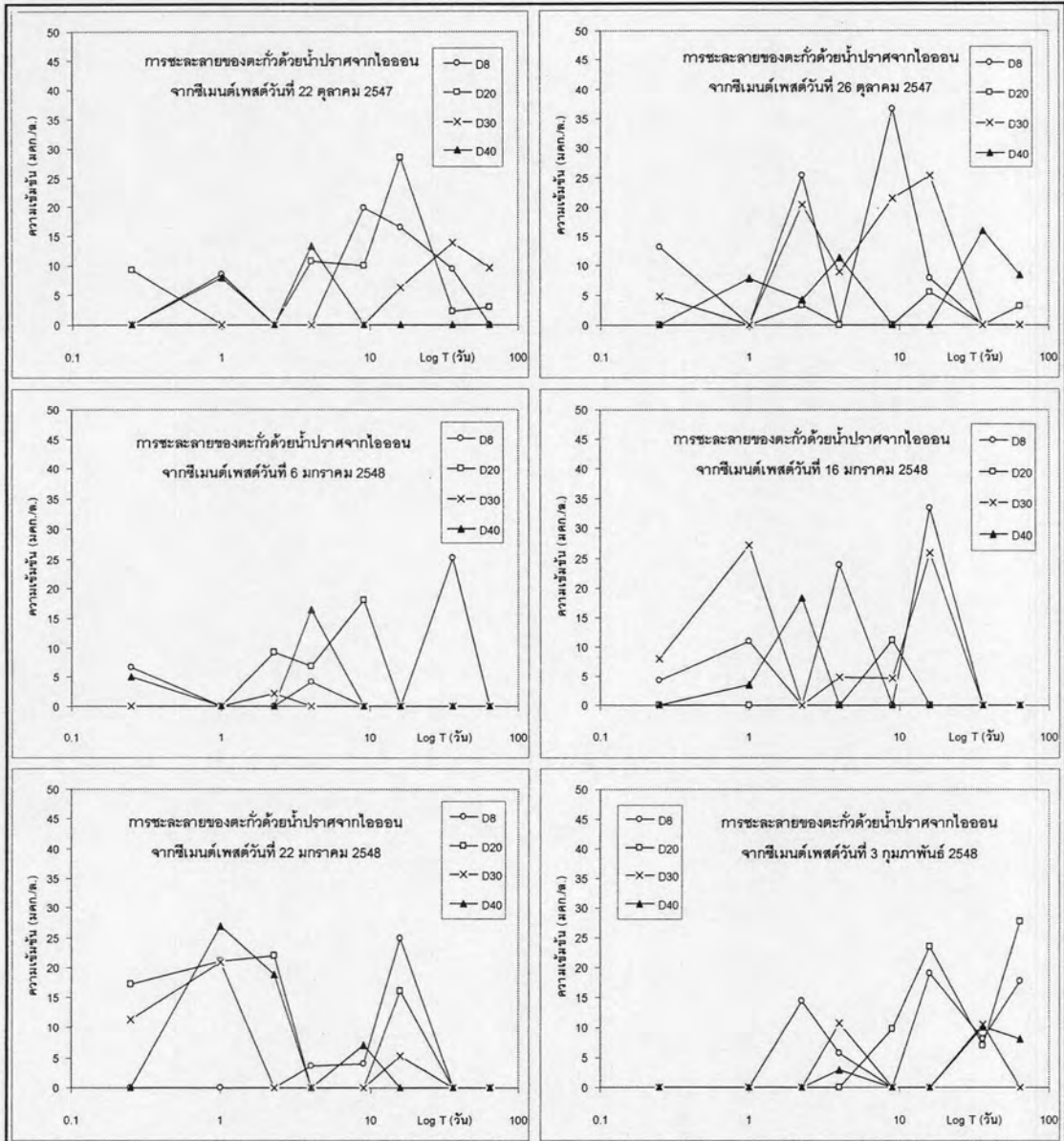


รูปที่ 4.12 ภาพรวมการชะละลายของ Mn จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน
คำอธิบายภาพ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ L/S = 8

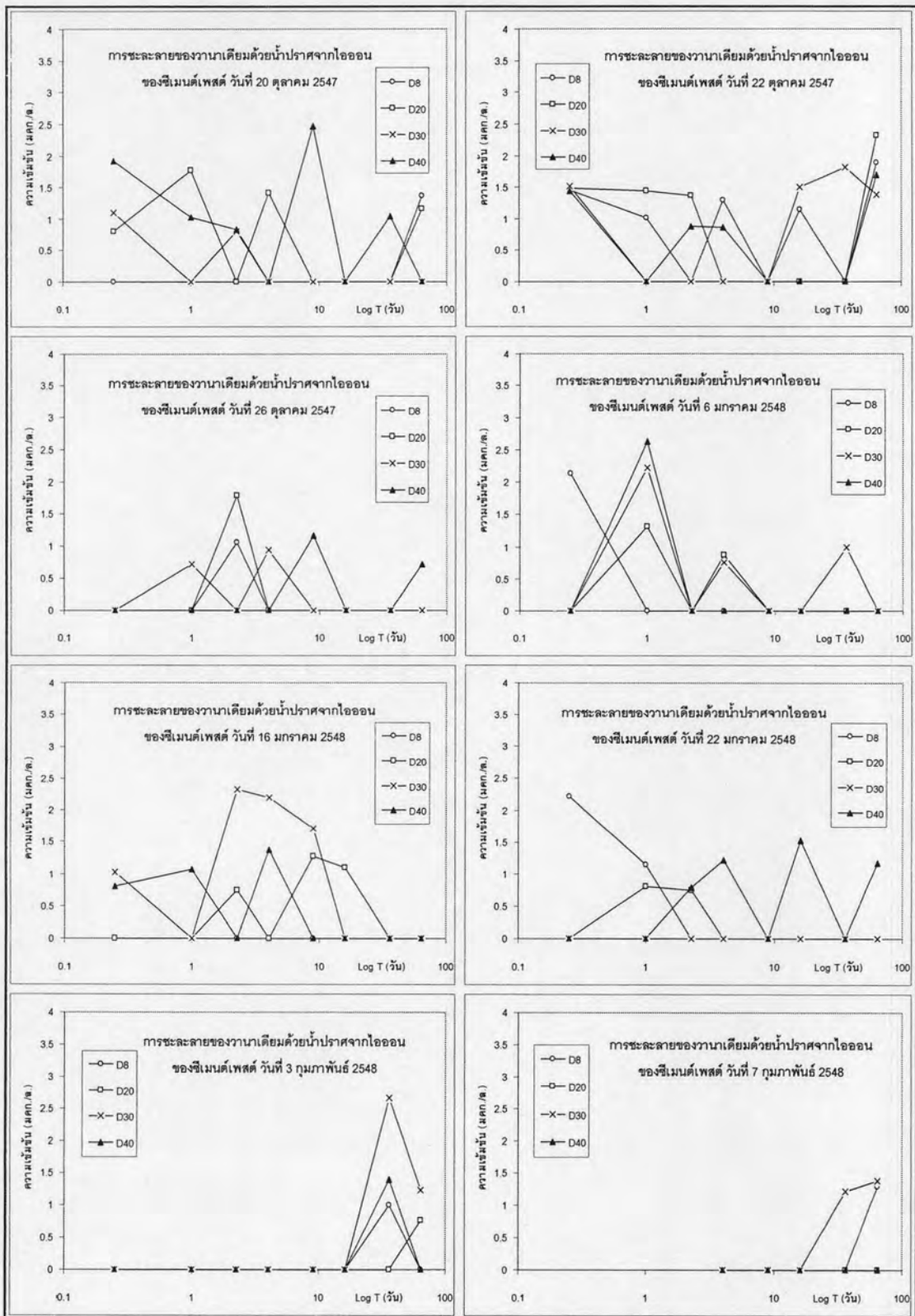


รูปที่ 4.13 ภาพรวมการชะละลายของ Ni จากตัวอย่างซีเมนต์พิเศษต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน

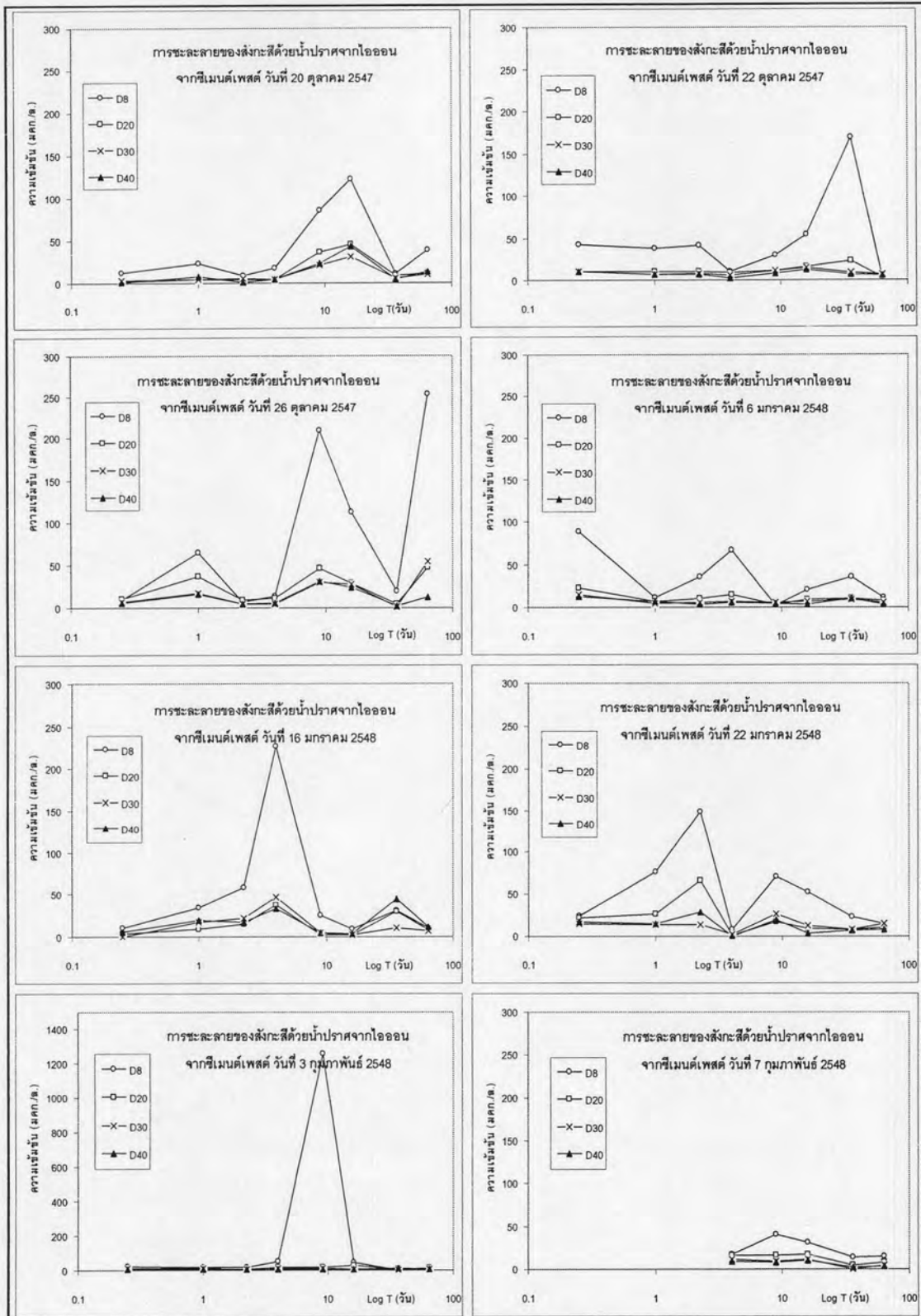
คำอธิบายกราฟ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ $L/S = 8$



รูปที่ 4.14 ภาพรวมการชะละลายของ Pb จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน
คำอธิบายภาพ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ $L/S = 8$



รูปที่ 4.15 ภาพรวมการชะละลายของ V จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน
 คำอธิบายภาพ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ L/S = 8



รูปที่ 4.16 ภาพรวมการชะละลายของ Zn จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน
 คำอธิบายภาพ: D8 หมายถึง ทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ L/S = 8

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นในปูนเม็ดกับผลการชะละลาย

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในปูนเม็ด (ผลจากการย่อยสลายด้วยกรดโดยอาศัยเครื่องไมโครเวฟ แสดงโดยเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ในตารางที่ 4.4) กับ การชะละลาย ซึ่งทำโดยนำผลการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ L/S ทุกค่า มาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์โดยมีสมมุติฐานดังนี้

1. หากความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในปูนเม็ดส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักนั้นๆ แล้ว ตัวอย่างปูนเม็ดที่มีปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นน้อยจะให้ผลการทดสอบการชะละลายที่น้อย และในทางเดียวกัน ตัวอย่างปูนเม็ดที่มีปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นมาก ก็จะทำให้ผลการทดสอบการชะละลายที่มากด้วย

2. สำหรับตัวอย่างปูนเม็ดในแต่ละวันที่มีปริมาณโลหะหนักใกล้เคียงกันควรให้ผลการทดสอบการชะละลายที่คล้ายกัน

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโลหะต่างๆแสดงอยู่ในรูปที่ 4.17 – 4.26 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นในปูนเม็ดของ Ba แทบไม่มีผลต่อความสามารถในการชะละลายของ Ba เลย โดยความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดของ Ba ได้แก่ตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 ประมาณ 150 มก./กก. ซึ่งแทบไม่แสดงผลการชะละลายสูงสุดให้เห็น โดยตัวอย่างที่แสดงผลการชะละลายสูงสุดได้แก่ ตัวอย่างวันที่ 26 ตุลาคม 2547 จากนั้นนำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน (ตัวอย่างวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 กับ วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2547 กับ 20 ตุลาคม 2547 และตัวอย่างวันที่ 16 มกราคม 2548 กับ วันที่ 26 ตุลาคม 2547) มาเปรียบเทียบปริมาณ Ba ที่ชะละลายออกมาพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมาก แต่ยังสามารถเห็นแนวโน้มของการชะละลายได้จากรูปที่ 4.17 ที่เวลา 4 วันซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลาย โดยที่เวลาอื่นๆ ผลการชะละลายแสดงความแปรปรวนจึงมีความเป็นไปได้ว่ามีปัจจัยอื่นนอกจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการชะละลายของ Ba

Cr มีความแตกต่างของความเข้มข้นเริ่มต้นไม่มากนัก โดยความเข้มข้นต่ำสุดมาจากตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2547 ที่ 29 มก./กก. และสูงสุดมาจากตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 ที่ 88 มก./กก. เมื่อเปรียบเทียบกับผลการชะละลายพบว่า ตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดกลับแทบไม่แสดงผลการชะละลายที่สูงที่สุด ต่างจากตัวอย่างวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 35 มก./กก. และ ตัวอย่างวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 45 มก./กก. แต่แสดงผลการชะละลายสูงสุดหลายครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ดไม่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของ Cr เนื่องจากมีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยการเปรียบเทียบการชะละลายของ Cr จากตัวอย่างวันต่างๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.18

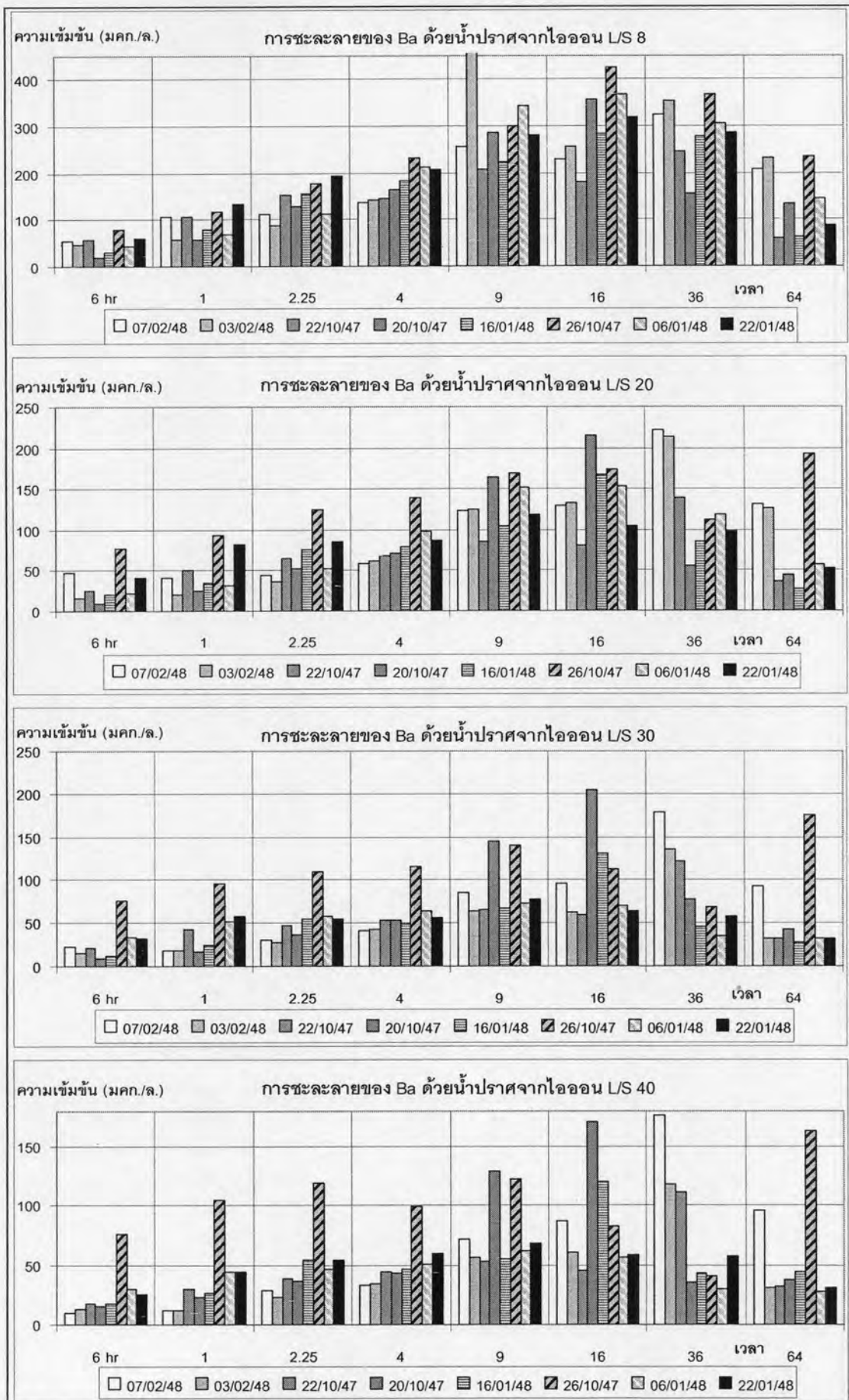
Cu แทบไม่ปรากฏการชะละลายให้เห็น โดยตัวอย่างที่มีการชะละลายออกมาสูงที่สุดได้แก่ตัวอย่างวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งเกิดการชะละลายออกมาในการทดสอบ 3 ช่วงแรก (6 ชั่วโมง 1 วัน และ 2.25 วัน) โดยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณ Cu เริ่มต้นสูงที่สุดเช่นกันที่ 274 มก./กก.

นอกจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น Fe Mn Ni และ Pb ไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นที่มีต่อผลการทดสอบการชะละลายโดยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.20 - 4.23 ในทำนองเดียวกับ V และ Zn ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.25 - 4.26

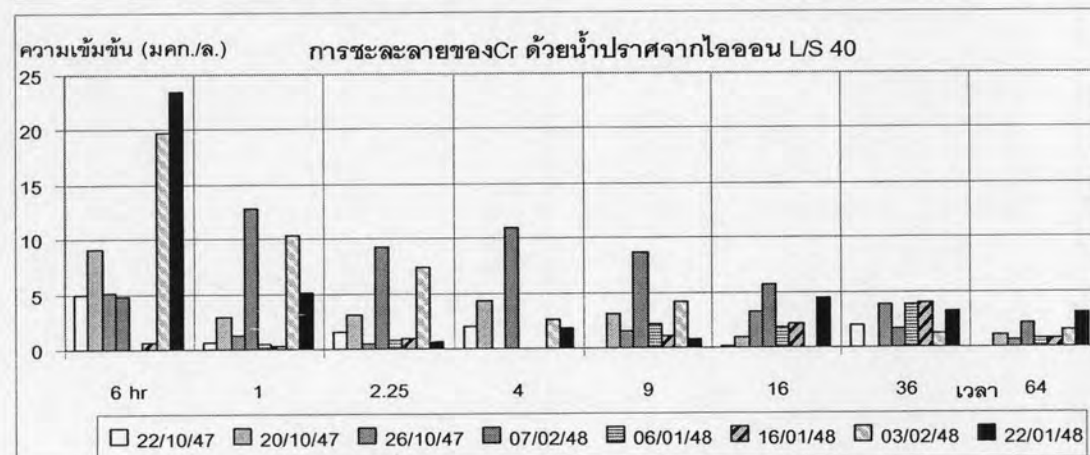
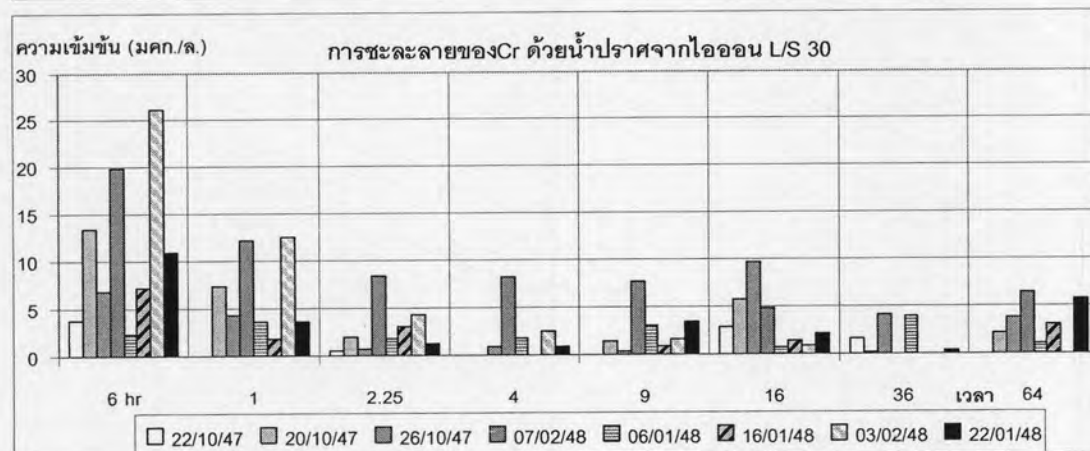
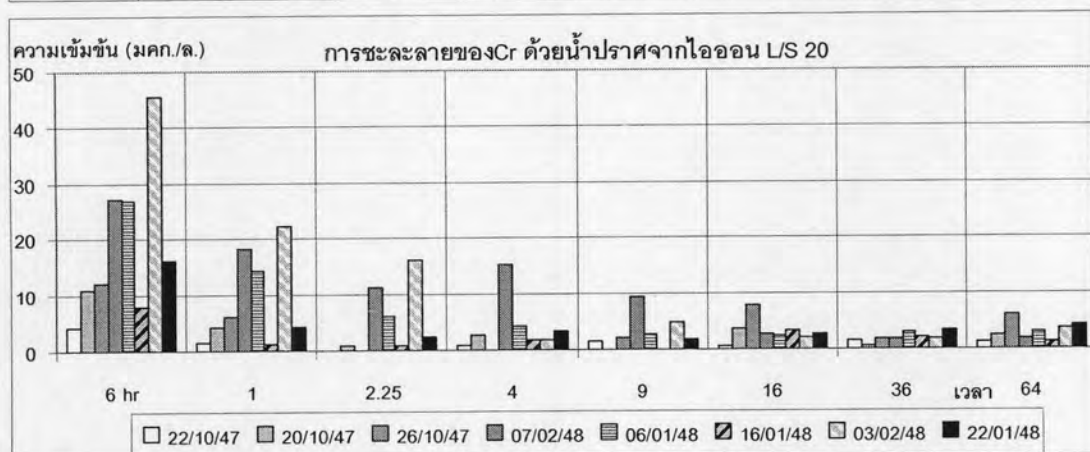
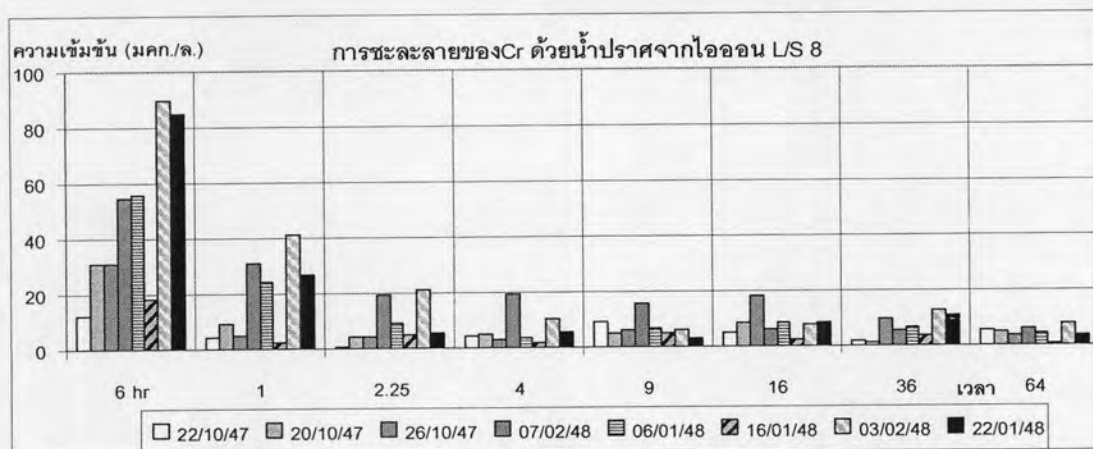
สำหรับ Sr นั้นมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับ Ba คือจากรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและผลการชะละลายอยู่บ้างในช่วงการทดสอบแรก ๆ (ช่วงที่ 1 - 4) จากตัวอย่างที่มีปริมาณ Sr ไม่สูงนัก ถึงแม้ว่าตัวอย่างวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 จะแสดงความสามารถในการชะละลายที่สูงที่สุดในการทดสอบช่วงหลังๆ แต่หากดูจากผลของปริมาณเริ่มต้นของ Sr แล้วพบว่า ตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 16 มกราคม 2548 และ วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ 253 258 และ 259 มก./กก. ตามลำดับ จึงควรจะมีผลการทดสอบการชะละลายที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่ายังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการชะละลายมากกว่าปริมาณ Sr เริ่มต้นในปูนเม็ด หรือปริมาณเริ่มต้นในตัวอย่างต่างๆนั้นยังมีความแตกต่างกันไม่มากเพียงพอที่จะส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของ Sr ได้

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นเรียงจากน้อยไปมากของธาตุต่างๆ

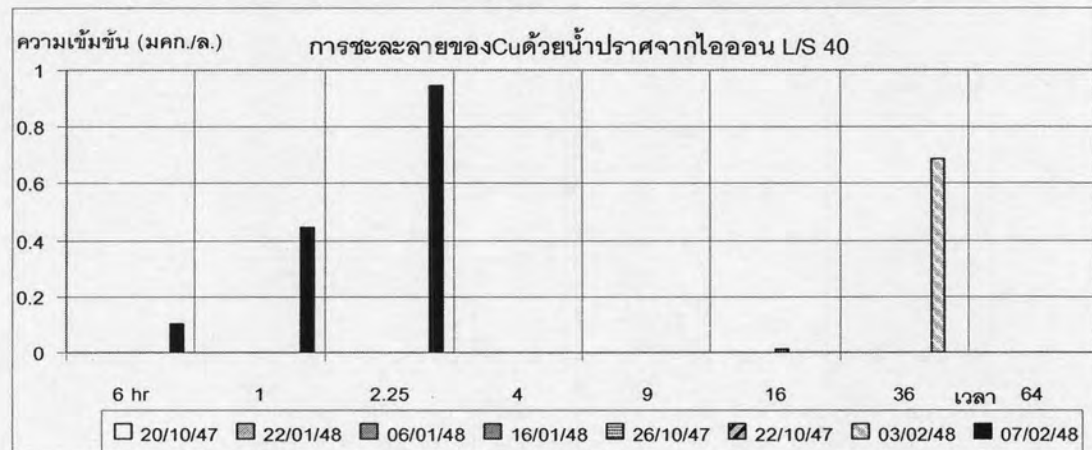
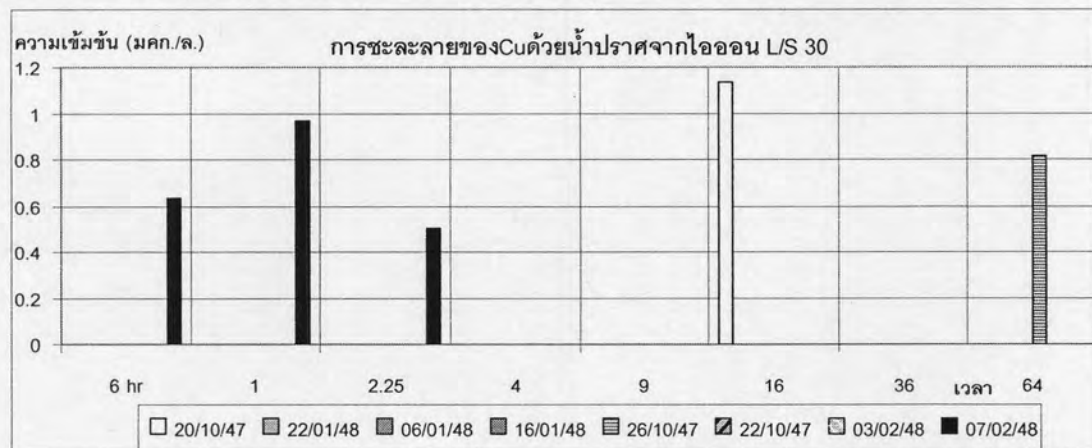
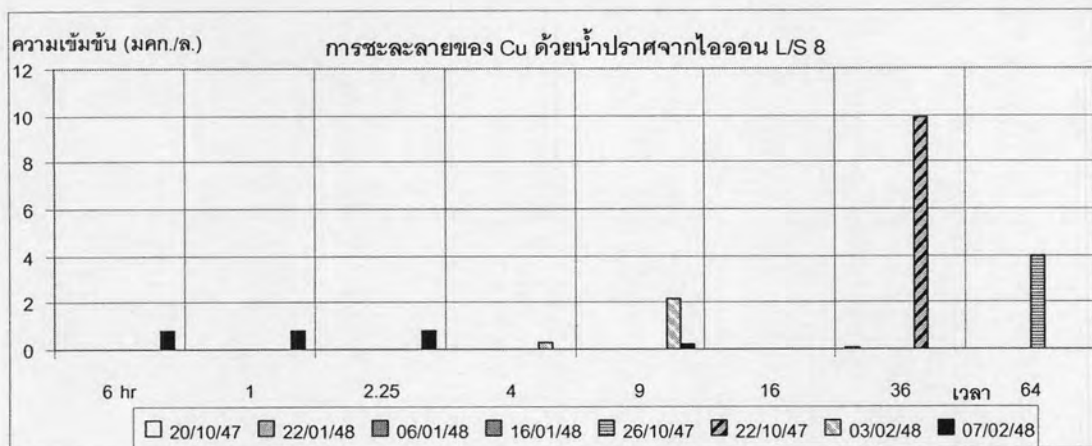
ธาตุ		ความเข้มข้นเรียงจากน้อยไปมาก							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ba	วันที่	07/02/48	03/02/48	22/10/47	20/10/47	16/01/48	26/10/47	06/01/48	22/01/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	117	118	123	124	132	136	144	150
Cr	วันที่	22/10/47	20/10/47	26/10/47	07/02/48	06/01/48	16/01/48	03/02/48	22/01/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	29	32	32	35	38	41	45	88
Cu	วันที่	20/10/47	22/01/48	06/01/48	16/01/48	26/10/47	22/10/47	03/02/48	07/02/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	11	11	15	15	66	99	202	274
Fe	วันที่	26/10/47	20/10/47	22/10/47	16/01/48	22/01/48	06/01/48	07/02/48	03/02/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	9,598	10,762	12,013	17,351	17,459	18,097	23,831	24,045
Mn	วันที่	22/10/47	20/10/47	07/02/48	26/10/47	22/01/48	06/01/48	03/02/48	16/01/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	315	334	389	411	453	462	481	502
Ni	วันที่	07/02/48	03/02/48	16/01/48	22/01/48	06/01/48	26/10/47	20/10/47	22/10/47
	ปริมาณ (มก./กก.)	22	23	27	30	31	33	35	36
Pb	วันที่	20/10/47	06/01/48	16/01/48	22/01/48	26/10/47	22/10/47	03/02/48	07/02/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	<0.110	<0.110	<0.110	<0.110	6	17	32	44
Sr	วันที่	03/02/48	26/10/47	22/10/47	20/10/47	06/01/48	22/01/48	16/01/48	07/02/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	160	181	184	190	239	253	258	259
V	วันที่	07/02/48	26/10/47	22/10/47	20/10/47	03/02/48	16/01/48	22/01/48	06/01/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	40	45	52	58	61	80	81	85
Zn	วันที่	20/10/47	22/01/48	06/01/48	16/01/48	26/10/47	22/10/47	03/02/48	07/02/48
	ปริมาณ (มก./กก.)	33	42	47	52	107	122	297	342



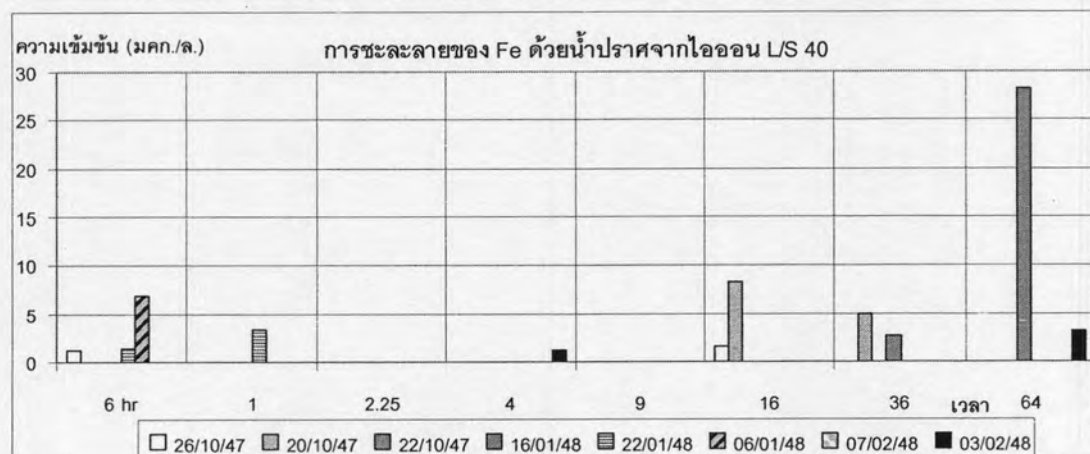
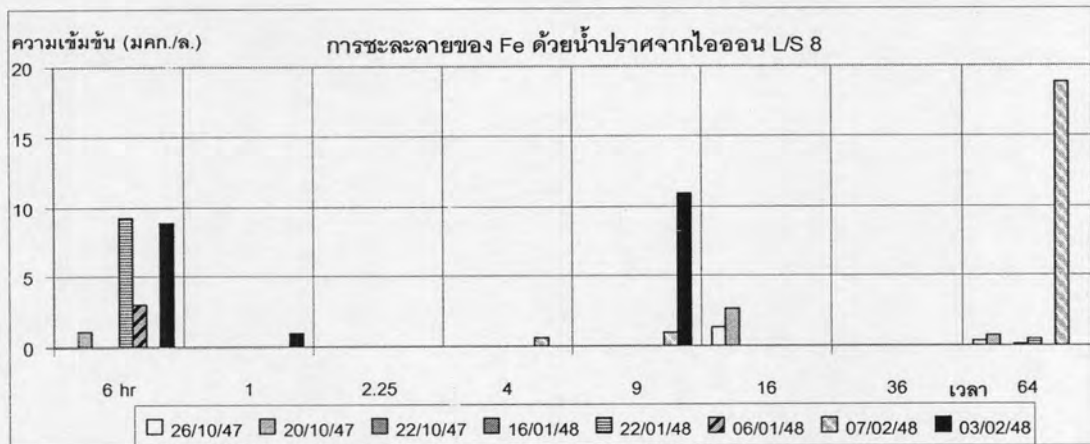
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Ba ที่ L/S ต่างๆ



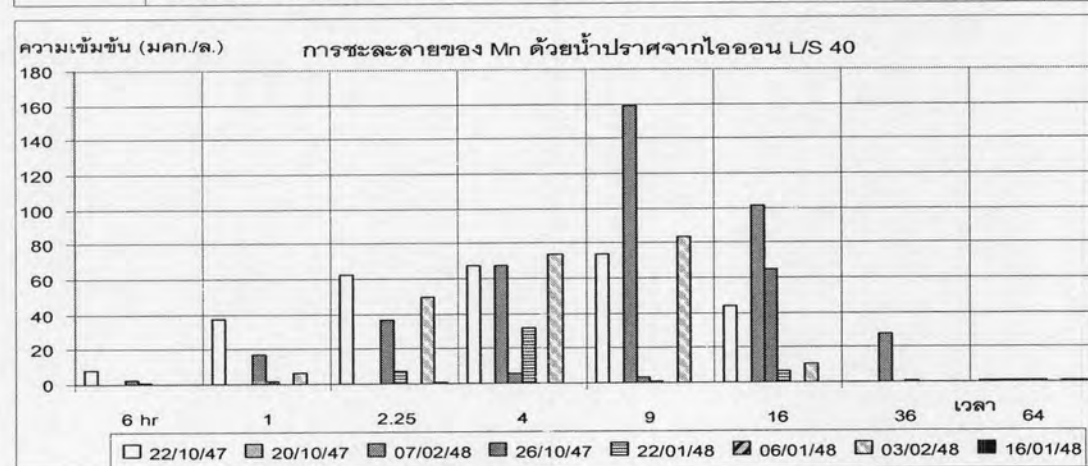
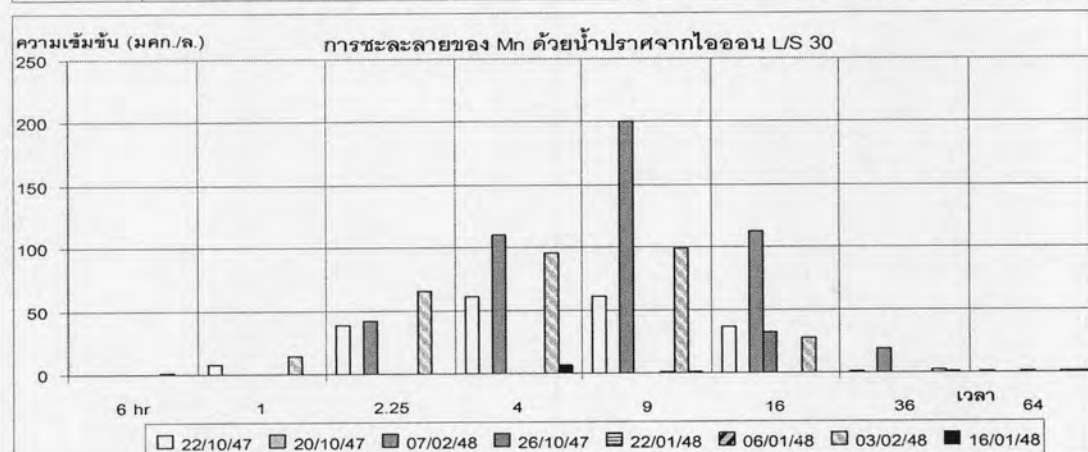
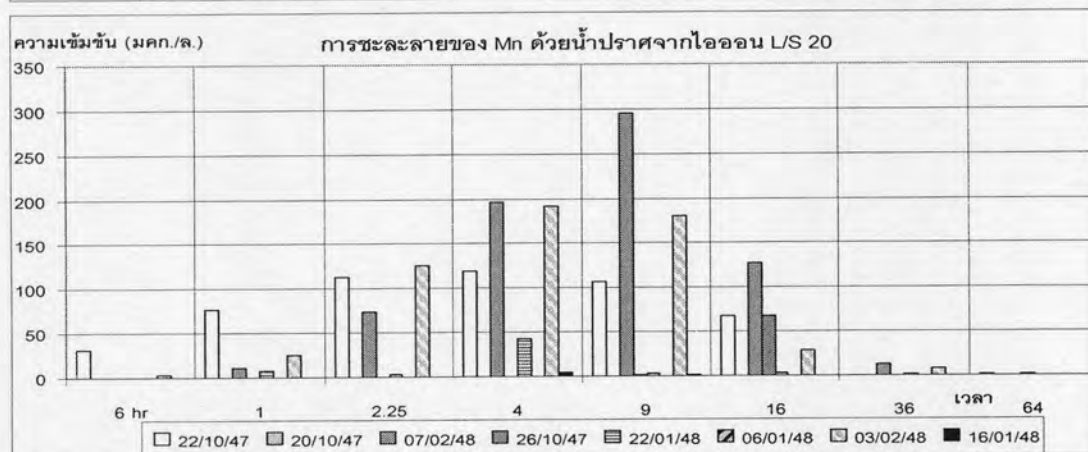
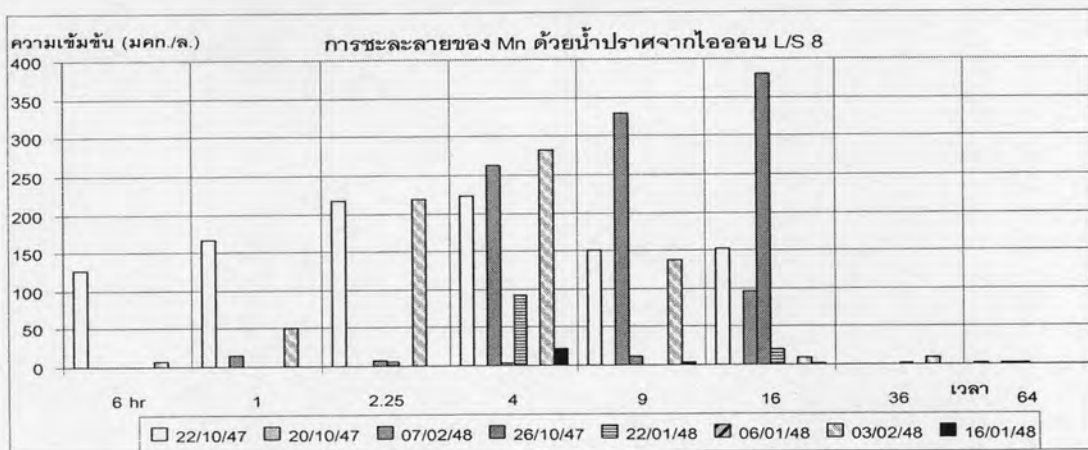
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Cr ที่ L/S ต่างๆ



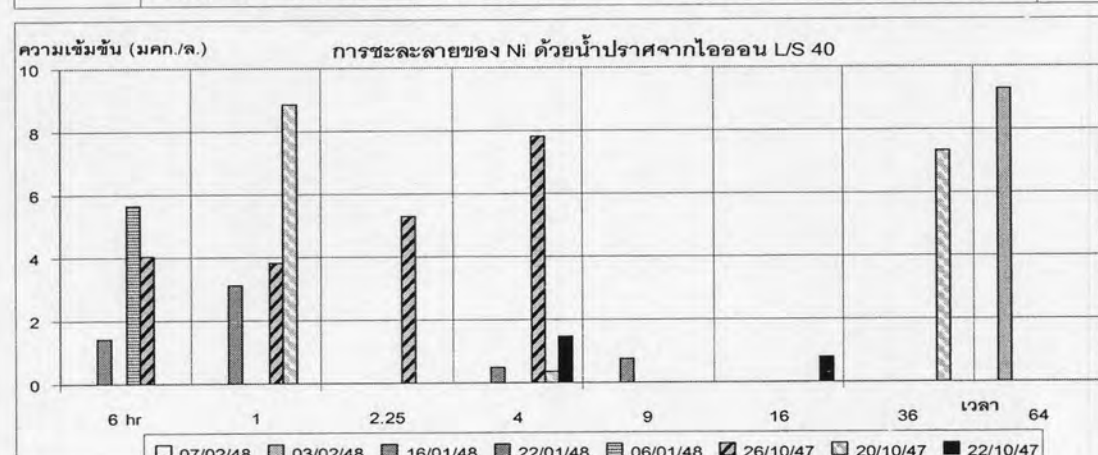
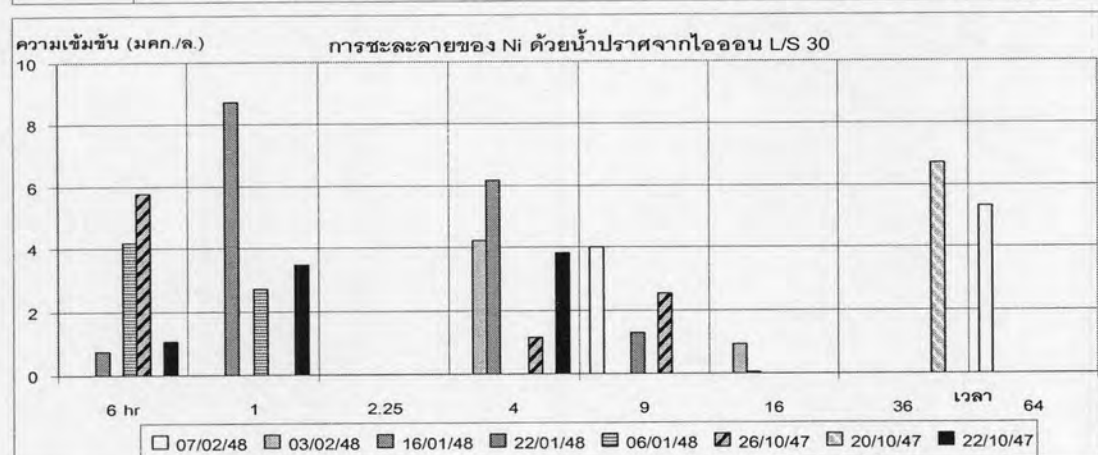
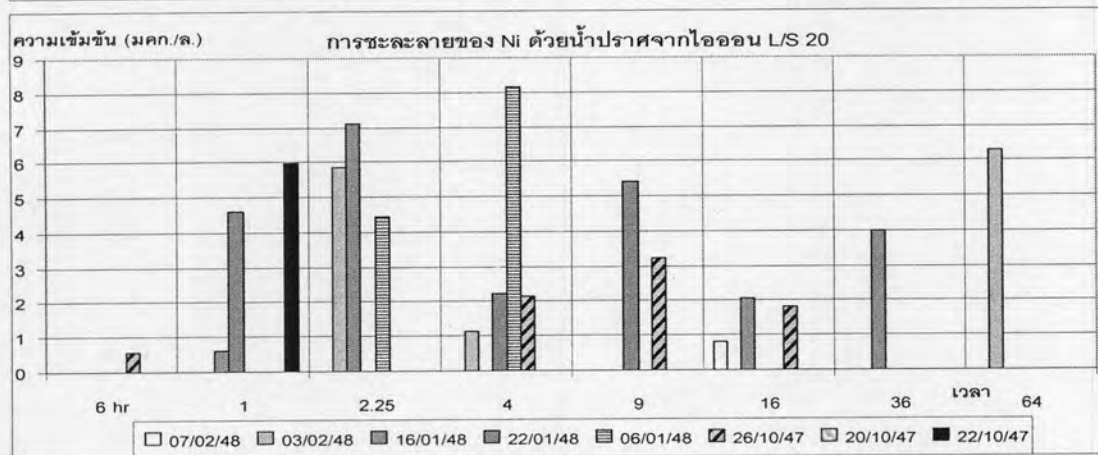
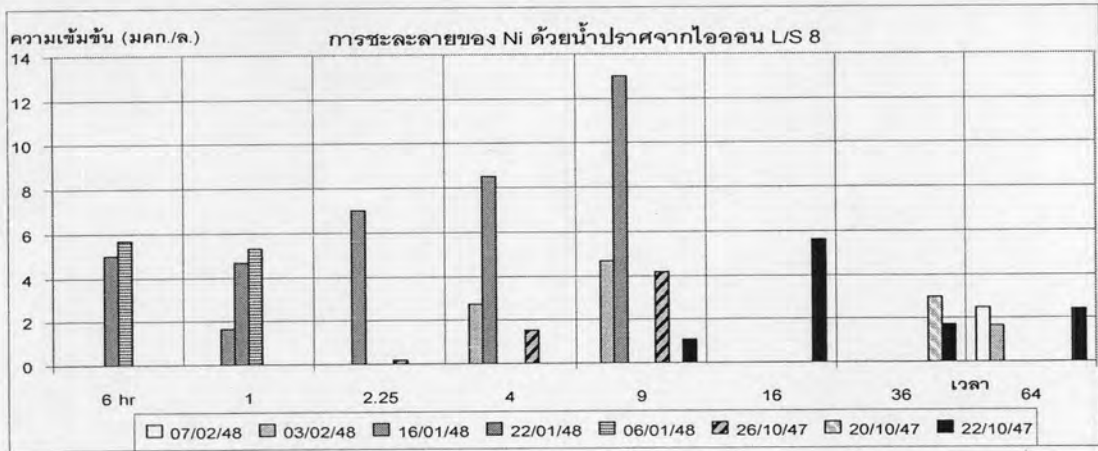
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Cu ที่ L/S ต่างๆ



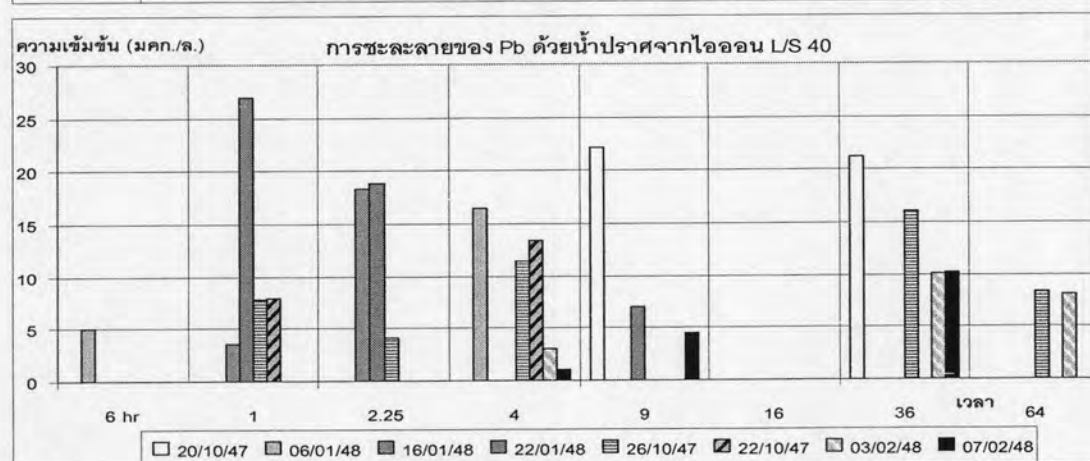
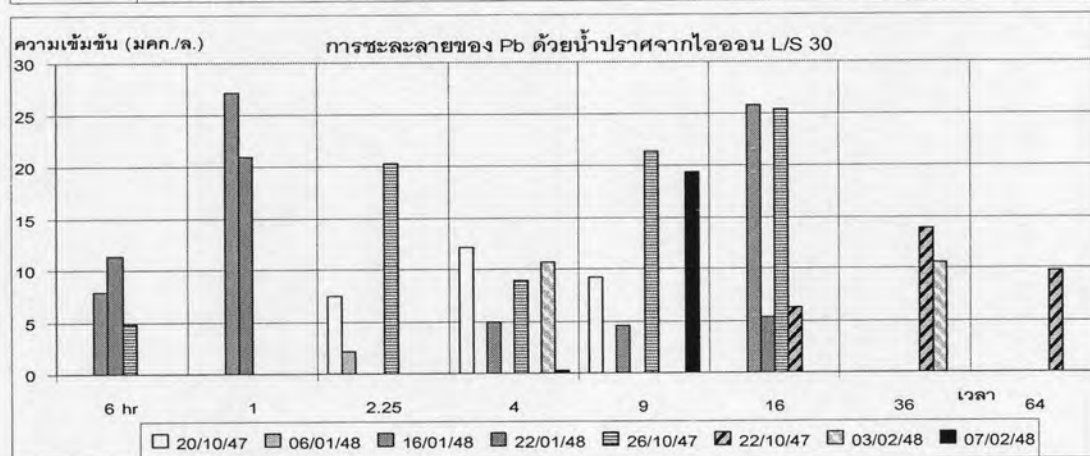
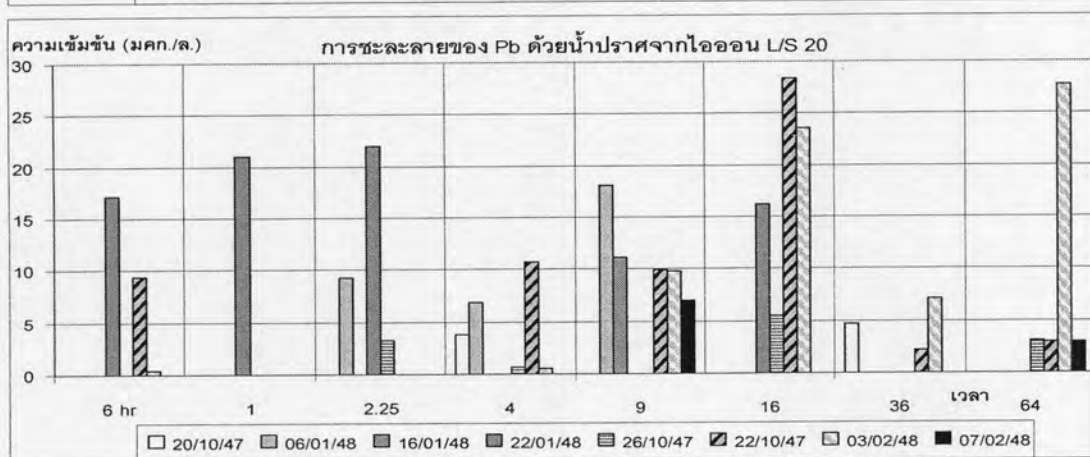
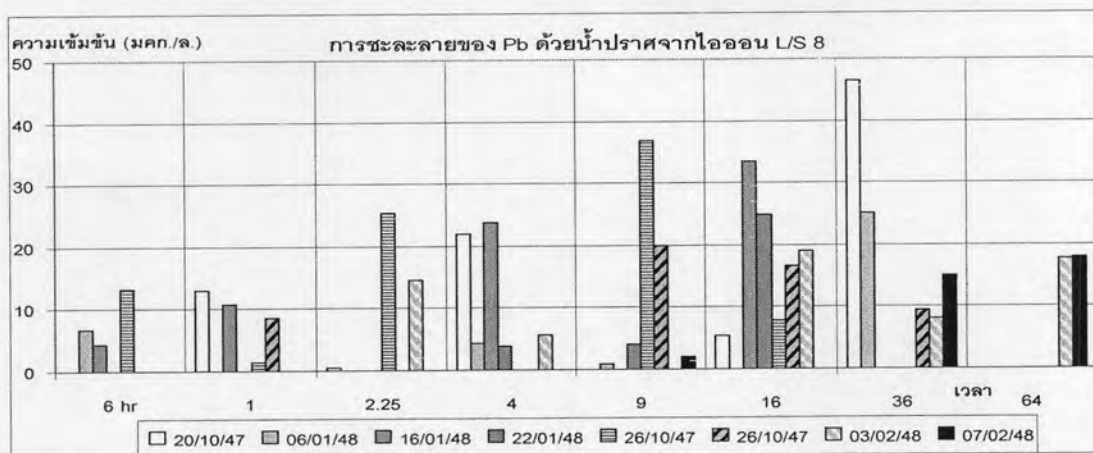
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Fe ที่ L/S ต่างๆ



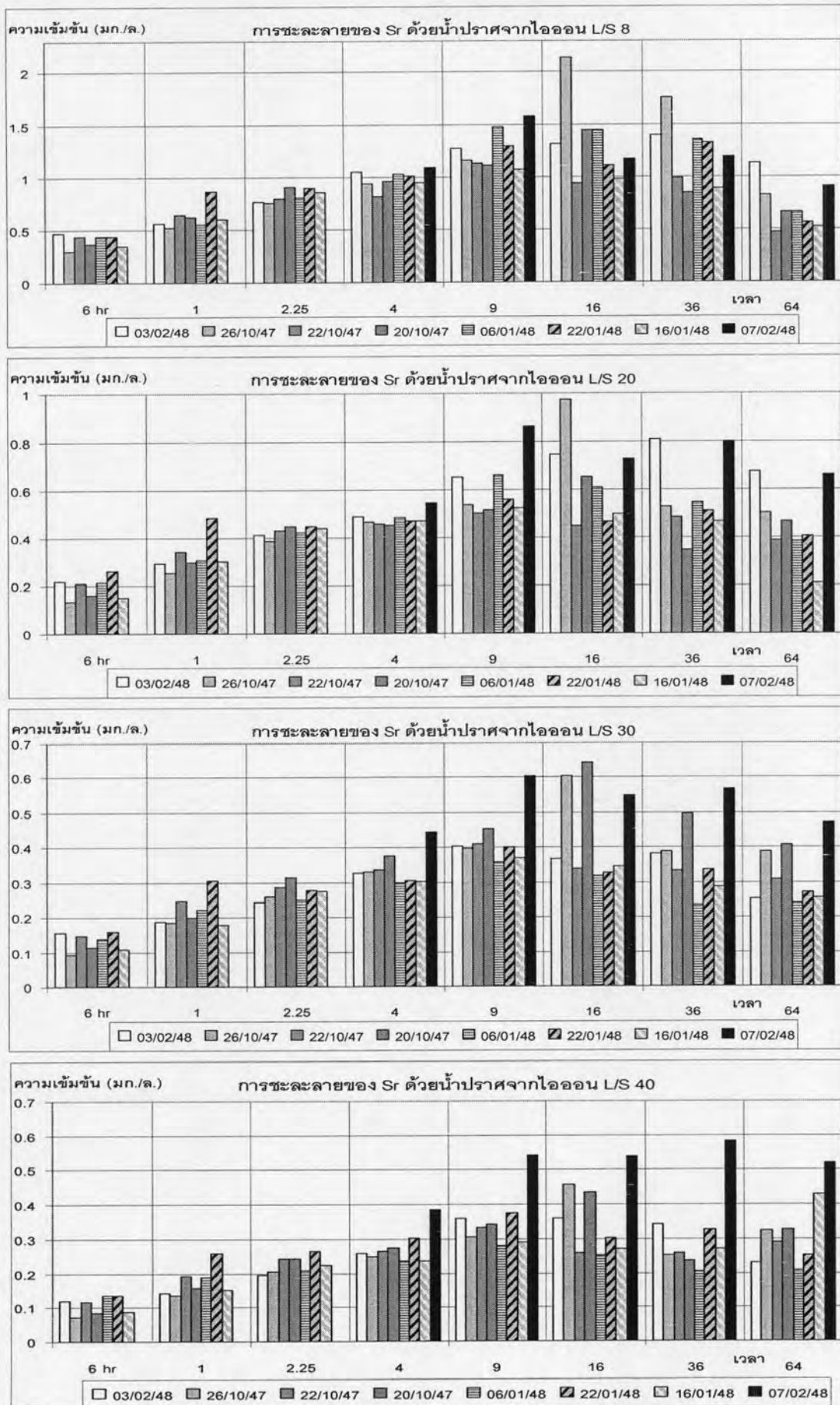
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Mn ที่ L/S ต่างๆ



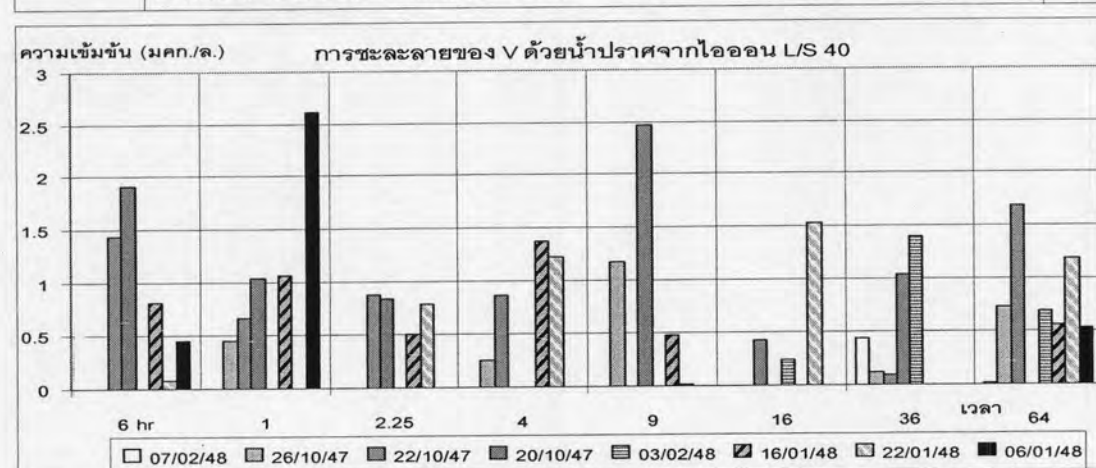
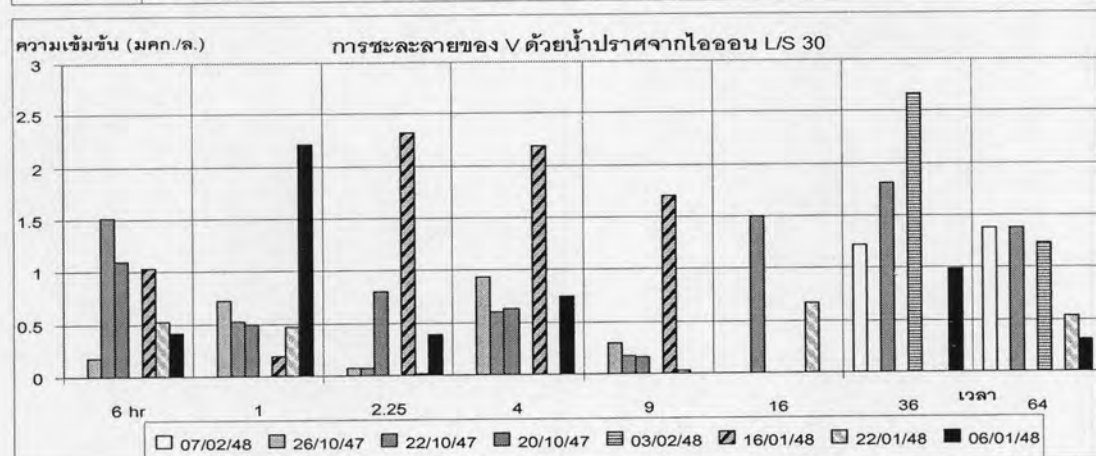
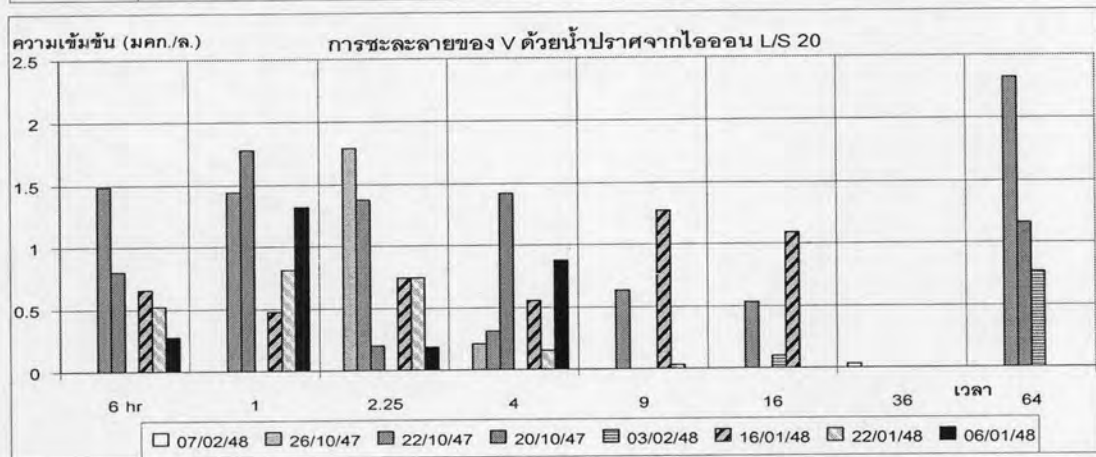
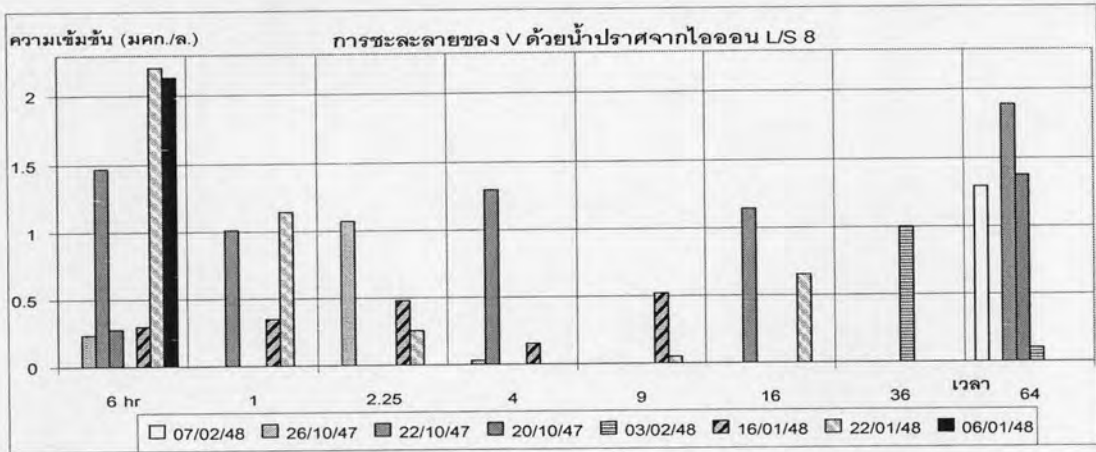
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Ni ที่ L/S ต่างๆ



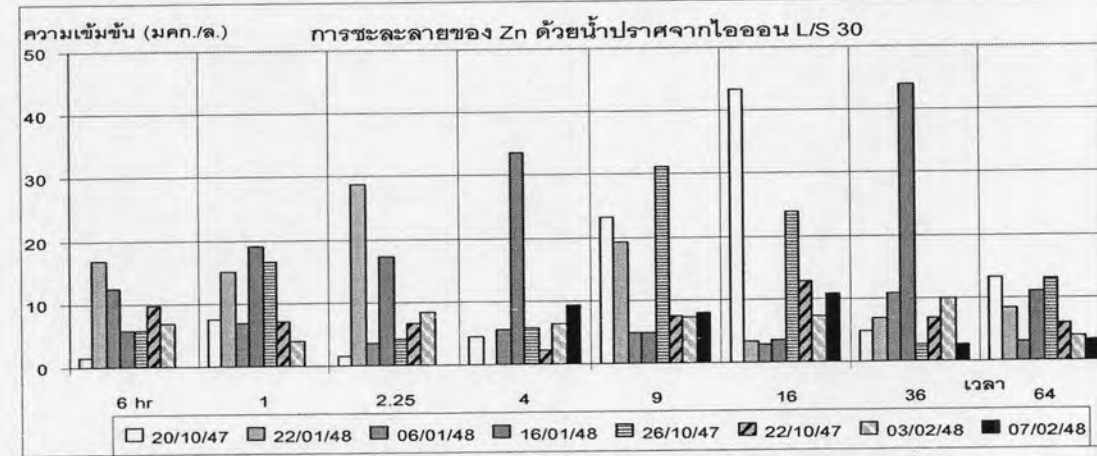
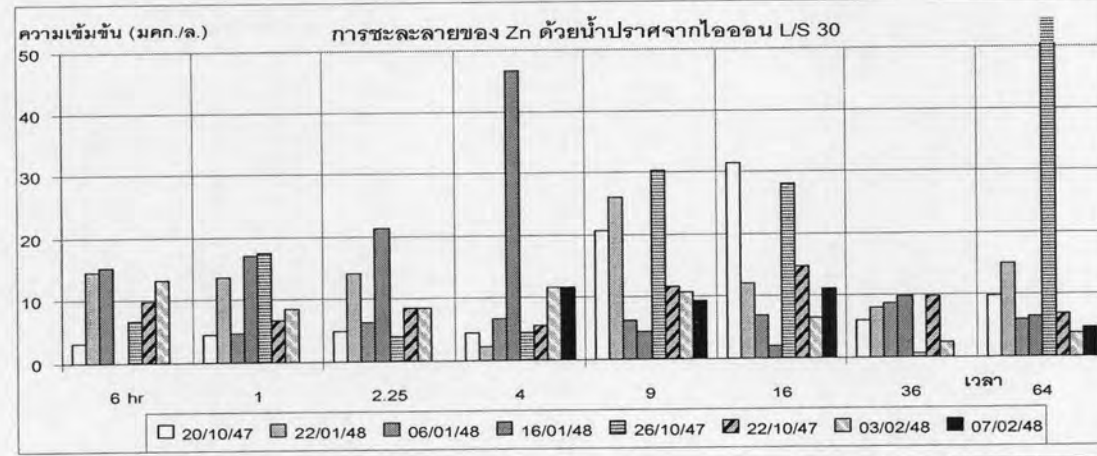
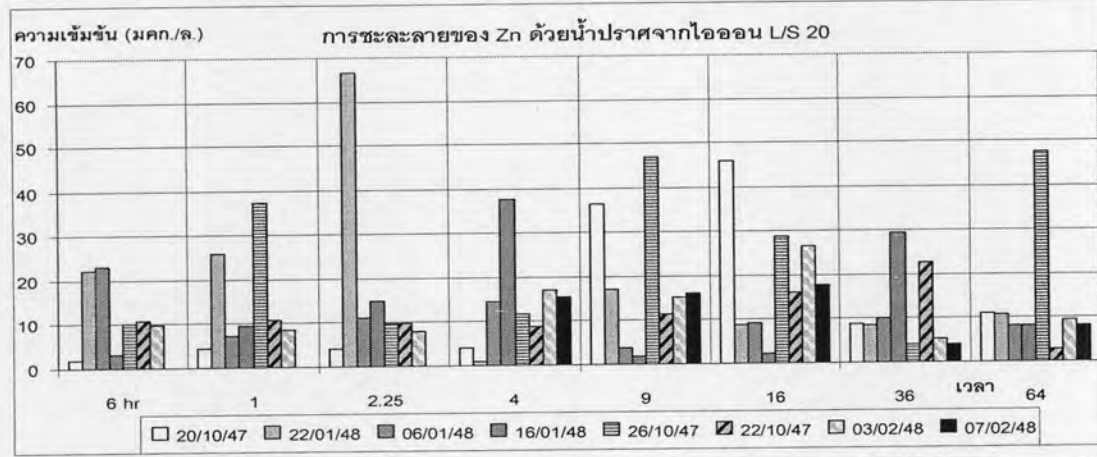
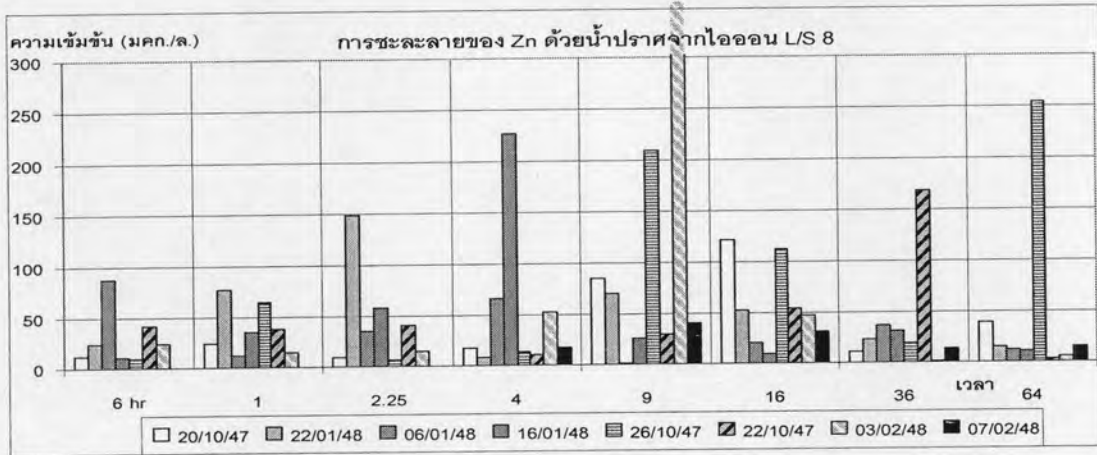
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Pb ที่ L/S ต่างๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Sr ที่ L/S ต่างๆ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ V ที่ L/S ต่างๆ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับการชะละลายของ Zn ที่ L/S ต่างๆ

4.2.3 การชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่ม

ปัจจุบันมีการกำหนดมาตรฐานน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภคจากหลายหน่วยงาน อาทิ ของ U.S.EPA (U.S. Environmental Protection Agency) WHO (World Health Organization) และ EU (Europe Union) เป็นต้น ซึ่งเป็นประเทศต่างๆได้รับเอามาตรฐานเหล่านี้ไปบังคับใช้เพื่อกำหนดคุณภาพน้ำดื่มในประเทศ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกเอามาตรฐานน้ำประปาของไทยดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2.8 ซึ่งได้รับเอามาตรฐานของ WHO มาปรับใช้ เพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการชะละลายที่ได้

โลหะหนักซึ่งปรากฏอยู่ในมาตรฐานของการประปานครหลวงนั้นประกอบด้วย Al As Cd Cr Cu Fe Hg Mn Pb Se และ Zn สำหรับโลหะหนักที่ไม่มีระบุไว้จะยึดมาตรฐานของ WHO เป็นสำคัญ ได้แก่ B Ba และ Ni

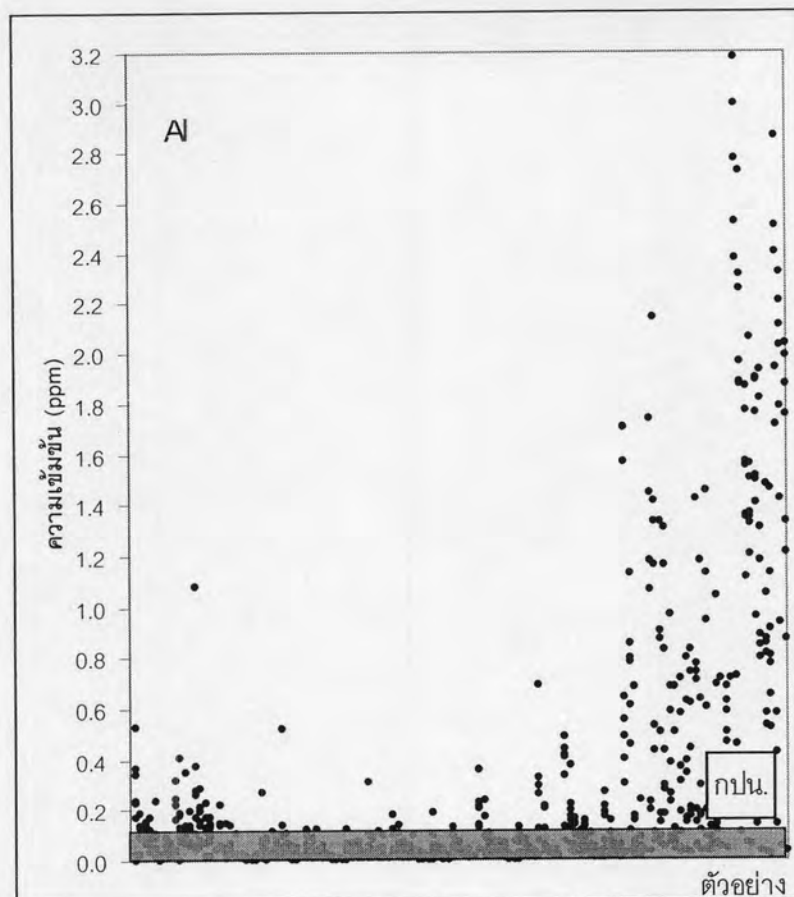
ผลสรุปการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมากับมาตรฐานน้ำดื่มต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยนำข้อมูลความเข้มข้นของโลหะทั้งหมดมาสร้างกราฟโดยให้มี แกนตั้ง (y) เป็นความเข้มข้น และแกนนอน (x) เป็นตัวอย่าง จุดประสงค์ของการแสดงกราฟในลักษณะนี้เพียงเพื่อต้องการกระจายข้อมูลตัวอย่างที่อยู่ในการทดลองซึ่งมีความเข้มข้นแตกต่างกันไปตามช่วงเวลาต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานโดยไม่คำนึงถึง ชนิดของตัวอย่าง (วันที่ต่าง ๆ) เวลาในการทดสอบ สารชะละลาย และ ค่า L/S Ratio ผลการเปรียบเทียบปรากฏว่ามีโลหะอยู่ 6 ชนิดที่มีความเข้มข้นไม่เกินมาตรฐาน ได้แก่ Be Cu Fe Mn Ni และ Zn ที่เกินมาตรฐานมีทั้งสิ้น 7 ธาตุ ได้แก่ Al B Ba Ca Cd Cr และ Pb ดังรูปที่ 4.27-4.34 นอกจากนี้มี 2 ธาตุที่ไม่มีมาตรฐานระบุไว้ ได้แก่ Sr และ V

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปผลการเปรียบเทียบการทดสอบการชะละลายกับมาตรฐานน้ำต่างๆ

ธาตุ	มาตรฐานที่ใช้	จำนวนที่เกิน (ตัวอย่าง)	คิดเป็นร้อยละ (ร้อยละ)	วันที่เกินมาตรฐาน จำนวนสูงสุด	จำนวน (ตัวอย่าง)	ความเข้มข้น				วันที่มีค่า มากที่สุด
						เฉลี่ย ⁽¹⁾	สูงสุด	SD.	หน่วย	
Al	กปน. ⁽²⁾	363	35.450	22 มค. 48	70	0.253	3.175	0.490	มก./ล.	22 มค. 48
B	WHO	12	1.172	16 มค. 48	4	37.059	737.630	65.497	มคก./ล.	3 กพ. 48
Ba	WHO	31	3.027	6 มค. 48	9	93.289	2,701.400	122.453	มคก./ล.	3 กพ. 48
Be	EPA	-	-	-	-	0.578	1.220	0.246	มคก./ล.	26 ตค. 47
Ca	ไทย 1 ⁽³⁾	8	0.781	26 ตค. 47	8	33.625	90.294	12.212	มก./ล.	26 ตค. 47
Cd	กปน.	394	38.477	22 ตค. 47	83	3.571	12.672	2.470	มคก./ล.	3 กพ. 48
Cr	กปน.	16	1.563	22 มค. 48	6	8.055	120.560	12.296	มคก./ล.	22 มค. 48
Cu	กปน.	-	-	-	-	1.759	24.724	2.685	มคก./ล.	26 ตค. 47
Fe	กปน.	-	-	-	-	5.108	86.798	9.893	มคก./ล.	26 ตค. 47
Mn	กปน.	-	-	-	-	16.902	399.820	49.484	มคก./ล.	26 ตค. 47
Ni	WHO	-	-	-	-	3.599	16.177	2.987	มคก./ล.	16 มค. 48
Pb	กปน.	199	19.434	26 ตค. 47	32	11.589	49.429	9.246	มคก./ล.	26 ตค. 47
Sr	N/A ⁽⁴⁾	-	-	-	-	0.445	2.292	0.329	มก./ล.	26 ตค. 47
V	N/A	-	-	-	-	2.630	100.320	7.202	มคก./ล.	26 ตค. 47
Zn	กปน.	-	-	-	-	19.180	1,261.700	47.020	มคก./ล.	3 กพ. 48

หมายเหตุ:

- (1) ความเข้มข้นเฉลี่ย เป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ โดยไม่นับรวมตัวอย่างที่มีค่าต่ำกว่า LOD
- (2) การประปานครหลวง
- (3) เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (ไทย)
- (4) ไม่ปรากฏมาตรฐาน

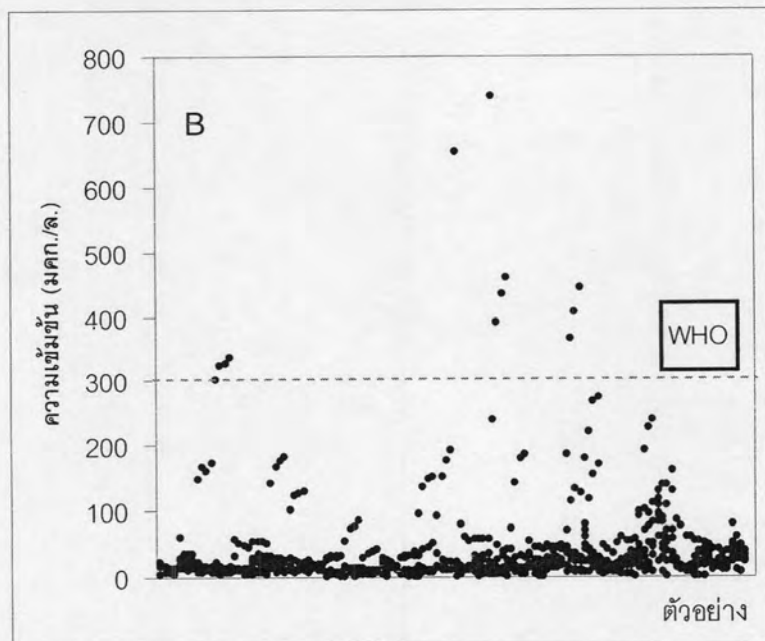


รูปที่ 4.27 ภาพรวมการชะละลายของ Al เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

ค่าที่เกินมาตรฐานของ Al ซึ่งประกาศไว้โดยการประปานครหลวงที่ 0.1 มก./ล. เกิดขึ้นหลักๆ อยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงเริ่มต้นการทดสอบซึ่งเกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้าของ Al จากก่อนทดสอบ และช่วงท้ายซึ่งเกิดการละลายของ Al ออกจากก้อนตัวอย่าง

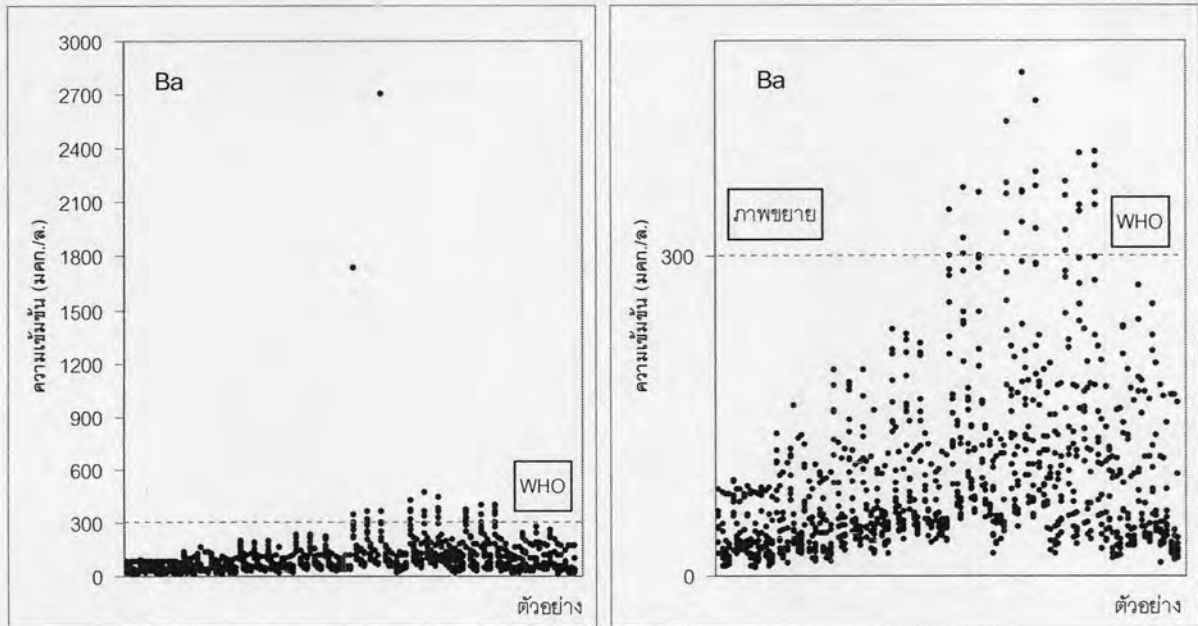
ที่จุดเริ่มต้นของการทดสอบ (6 ชั่วโมงแรก) เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานจากสารชะละลายทั้ง 3 ได้แก่ น้ำปราศจากไอออนอยู่ระหว่าง 0.100 – 0.529 มก./ล. น้ำฝนกรดชนิดปิดฝาระหว่าง 0.116 – 0.409 มก./ล. และ น้ำฝนกรดชนิดเปิดฝาระหว่าง 0.108 – 1.080 มก./ล. โดยไม่เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานจากการทดสอบด้วยน้ำประปา

ในช่วงกลางของการทดสอบ Al เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานบ้างเพียงเล็กน้อย จากตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 และ เมื่อเวลาการทดสอบเข้าสู่ช่วงท้าย (16วันเป็นต้นไป) เกิดการชะละลายของ Al ออกมาอย่างมากจากสารชะละลายทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.104 – 3.175 มก./ล.



รูปที่ 4.28 ภาพรวมการชะละลายของ B เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

จากมาตรฐานของการประปานครหลวงซึ่งไม่ได้ระบุความเข้มข้นของ B ไว้จึงนำเอามาตรฐานของ WHO ซึ่งกำหนดไว้ที่ 300 มคก./ล. มาเป็นตัวเปรียบเทียบ โดยผลจากการทดสอบด้วยสารชะละลายหลายชนิดพบความเข้มข้นของ B ที่เกินมาตรฐานมีจำนวนน้อยมาก (12 ตัวอย่าง จาก 1,024 ตัวอย่าง) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยค่าที่เกินมาตรฐานมาจากช่วงแรกของการทดสอบการชะละลาย (6 ชั่วโมงแรก) ของฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาจากซีเมนต์เพสต์วันที่ 16 มกราคม 2548 โดยมีช่วงความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 301.450 - 336.580 มคก./ล. และจากช่วงกลางของการทดสอบด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝา ที่เวลา 9 วัน จากซีเมนต์เพสต์วันที่ 22 มกราคม 2548 โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 389.750 - 457.460 มคก./ล. และที่เวลา 16 วัน จากซีเมนต์เพสต์วันที่ 6 มกราคม 2548 ที่ความเข้มข้น 364.910 - 443.400 มคก./ล. ตามลำดับ



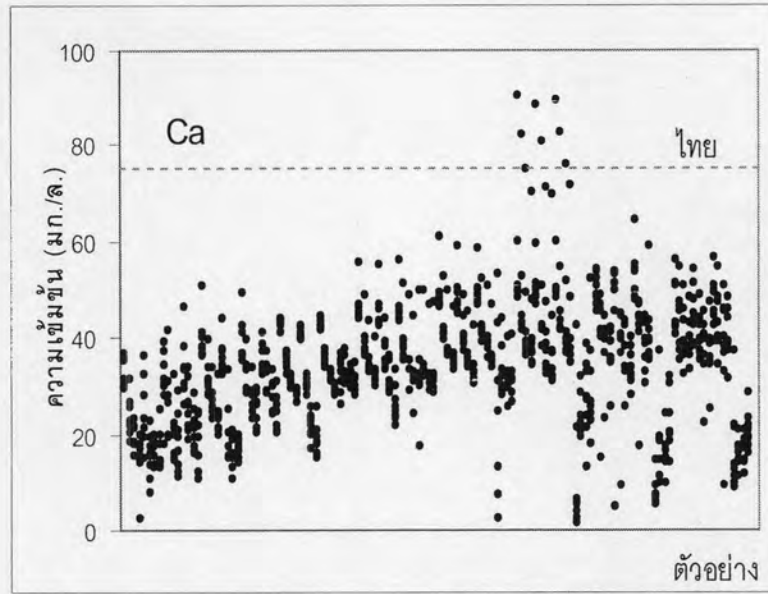
รูปที่ 4.29 ภาพรวมการชะละลายของ Ba เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

เช่นเดียวกับ B การเปรียบเทียบการชะละลายของ Ba จะนำเอามาตรฐานของ WHO มาศึกษา ซึ่งจากการทดสอบพบค่าความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานที่ให้ไว้โดย WHO ที่ 300 มก./ล. ในการทดลองครั้งที่ 5 (9 วัน) ที่ค่า L/S Ratio เท่ากับ 8 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งตรวจพบความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานจากสารชะละลายทั้ง น้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝาช่วงความเข้มข้นระหว่าง 300.350 - 2,701.400 มก./ล. แต่ในฝนกรดชนิดเปิดฝาไม่พบค่าที่เกินมาตรฐานแต่อย่างใด

เมื่อเวลาผ่านไปในการทดลองครั้งที่ 6 (16 วัน) พบว่าจำนวนตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐานมีจำนวนเพิ่มขึ้นจาก 7 ตัวอย่าง เป็น 12 ตัวอย่าง ที่ช่วงความเข้มข้นระหว่าง 319.850 - 469.450 มก./ล. ซึ่งฝนกรดชนิดเปิดฝายังคงมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน จำนวนตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐานในการทดลองครั้งที่ 7 (36 วัน) ลดลงเหลือเพียง 10 ตัวอย่าง โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 304.120 - 396.880 มก./ล. และลดลงต่ำกว่ามาตรฐานทั้งหมดที่การทดลองครั้งสุดท้ายคือครั้งที่ 8 (64 วัน)

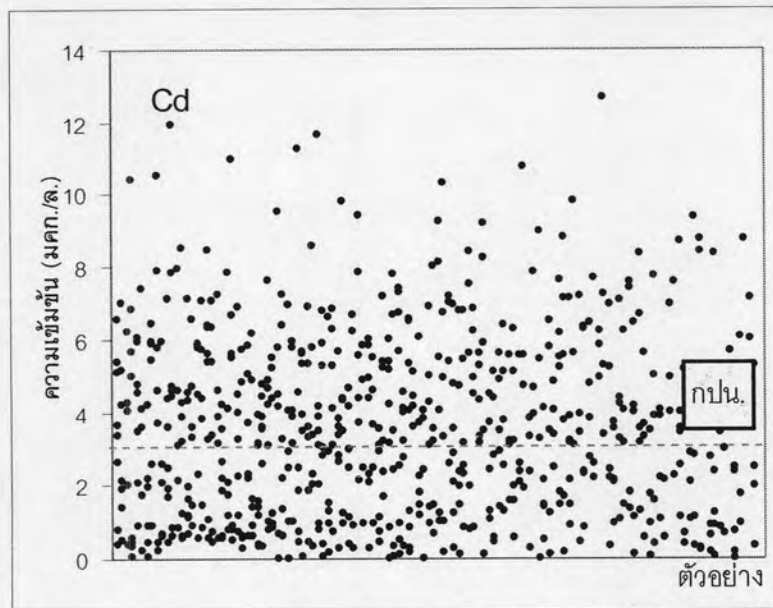
การชะละลายของ Be เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งความเข้มข้นมากที่สุดอยู่ที่ 1.220 มก./ล. จากตัวอย่างวันที่ 26 ตุลาคม 2547 ที่เวลาการชะละลาย 2.25 วัน ในน้ำปราศจากไอออน ค่า L/S Ratio เท่ากับ 8 ซึ่งน้อยกว่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ให้ไว้โดย U.S.EPA ที่ 4 มก./ล. อยู่ค่อนข้างมาก





รูปที่ 4.30 ภาพรวมการชะละลายของ Ca เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

Ca เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในซีเมนต์เพสต์ ในการทดสอบการชะละลาย Ca มีการชะละลายออกมาในระดับ มก./ล. ช่วงความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1.641 – 90.294 มก./ล. โดยมาตรฐานน้ำดื่มจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมระบุไว้สำหรับ Ca คือเกณฑ์ที่กำหนดสูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคที่ 75 มก./ล. และเกณฑ์ที่อนุโลมให้สูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคอยู่ที่ 200 มก./ล. ซึ่งการชะละลายของ Ca มีค่าเกินมาตรฐานน้อยมาก (8 ตัวอย่างจาก 1024 ตัวอย่าง) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 75.010 - 90.294 มก./ล. โดยทั้งหมดมาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 26 ตุลาคม 2547 มีสารชะละลายเป็น น้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และผงกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝา ที่การทดสอบครั้งที่ 5 (9 วัน) ทั้งสิ้น จากความเข้มข้นของ Ca ที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ายังไม่มีค่าใดเกินค่าที่อนุโลมให้สูงสุดของของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค



รูปที่ 4.31 ภาพรวมการชะละลายของ Cd เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

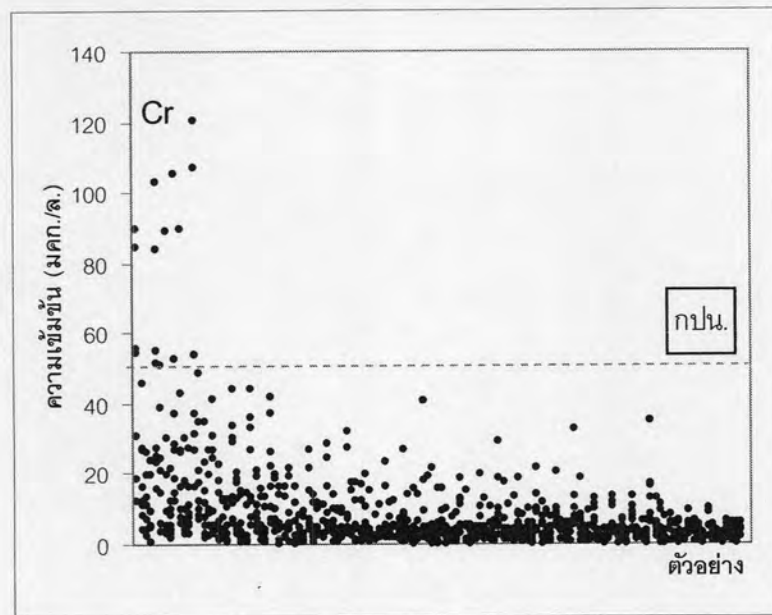
การชะละลายของ Cd ดังแสดงในรูปที่ 4.31 มีการกระจายตัวและความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานอยู่เป็นจำนวนมาก (394 ตัวอย่าง) เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่ให้ไว้โดยการประปานครหลวง ที่ 3 มก./ล. ซึ่งช่วงความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานอยู่ระหว่าง 3.033 - 12.672 มก./ล.

การชะละลายของ Cd จะออกเป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานตลอดช่วงการทดสอบได้แก่ตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2547 (83 ตัวอย่าง จาก 128 ตัวอย่าง) ช่วงความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานอยู่ระหว่าง 3.058 - 11.251 มก./ล.

2. เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานในช่วงแรก-กลาง (6 ชั่วโมงแรก - 16 วัน) และการชะละลายลดลงต่ำกว่ามาตรฐานในช่วงท้าย (36 - 64 วัน) ได้แก่ตัวอย่าง วันที่ 20 ตุลาคม 2547 26 ตุลาคม 2547 6 มกราคม 2548 16 มกราคม 2548 และ 22 มกราคม 2548

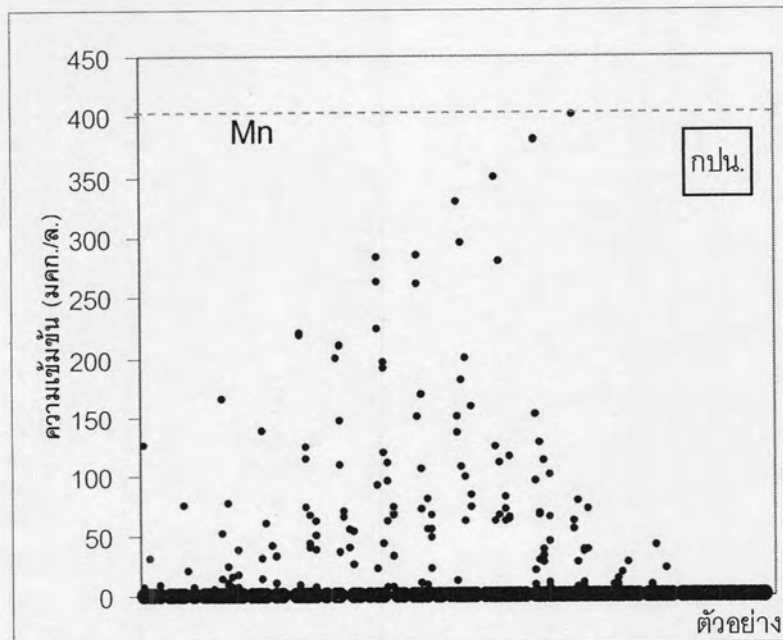
3. เกิดการชะละลายที่เกินมาตรฐานเฉพาะในช่วงท้ายของการทดสอบ (36 - 64 วัน) ได้แก่ตัวอย่างวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 และตัวอย่างวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548



รูปที่ 4.32 ภาพรวมการชะละลายของ Cr เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

มาตรฐานน้ำดื่มของ Cr กำหนดไว้ที่ 50 มก./ล. ซึ่งความเข้มข้นของ Cr จากการทดสอบการชะละลายพบว่ามีเพียง 16 ตัวอย่างเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐาน โดยช่วงความเข้มข้นที่เกินอยู่ที่ 50.700 - 120.560 มก./ล. โดยความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานของ Cr ทั้งหมดมาจากการทดสอบการชะละลายในช่วงแรก (6 ชั่วโมง) ที่ L/S Ratio ต่างๆ (8) สำหรับสารชะละลายทุกชนิด โดยมากมาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ วันที่ 22 มกราคม 2548 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 และวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไปไม่พบความเข้มข้นของ Cr ที่เกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มแต่อย่างใด ภาพการเปรียบเทียบผลการชะละลายของ Cr กับมาตรฐานของการประปานครหลวงแสดงอยู่ในรูปที่ 4.32

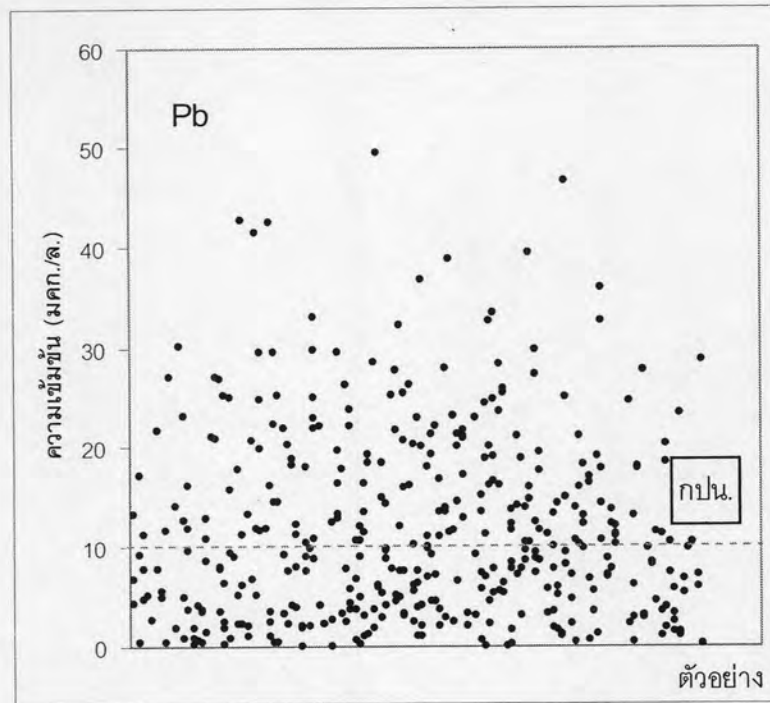
Cu มีมาตรฐานน้ำดื่มให้ไว้โดยการประปานครหลวงอยู่ที่ 2,000 มก./ล. จากการทดสอบพบว่า Cu แทบไม่ปรากฏการชะละลาย โดยความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 24.724 มก./ล. มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม เช่นเดียวกับ Cu การชะละลายของ Fe เกิดขึ้นค่อนข้างน้อย โดยมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 86.798 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ของการประปานครหลวง ที่ 300 มก./ล.



รูปที่ 4.33 ภาพรวมการชะละลายของ Mn เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

มาตรฐานของการประปานครหลวงสำหรับ Mn นั้นอยู่ที่ 400 มก./ล. แต่จากการทดสอบการชะละลายพบว่าความเข้มข้นสูงสุดของ Mn ที่ชะละลายออกมาอยู่ที่ 399.820 มก./ล. ซึ่งยังไม่เกินมาตรฐาน โดยความเข้มข้นของ Mn ส่วนมากมาจาก สารชะละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออน และฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝาทดสอบ และมีความเข้มข้นลดลงเมื่อมีค่า L/S Ratio เพิ่มขึ้น และการชะละลายที่มีความเข้มข้นสูงส่วนใหญ่ออกมาในช่วงต้นถึงช่วงกลางของการทดสอบ (2.25-16 วัน)

WHO กำหนดมาตรฐานสำหรับ Ni ไว้ที่ 20 มก./ล. ซึ่งจากผลการทดสอบการชะละลายไม่ปรากฏความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานโดยความเข้มข้นสูงสุดของ Ni อยู่ที่ 16.177 มก./ล. มาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 16 มกราคม 2548



รูปที่ 4.34 ภาพรวมการชะละลายของ Pb เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม

การชะละลายของ Pb มีกระจายตัวสูงโดยความเข้มข้นที่มีค่าเกินมาตรฐานปรากฏให้เห็นตลอดช่วงของการทดสอบ (199 ตัวอย่าง) ซึ่งการประปานครหลวง กำหนดไว้ที่ 10 มก./ล. โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบเท่ากับ 49.429 มก./ล.

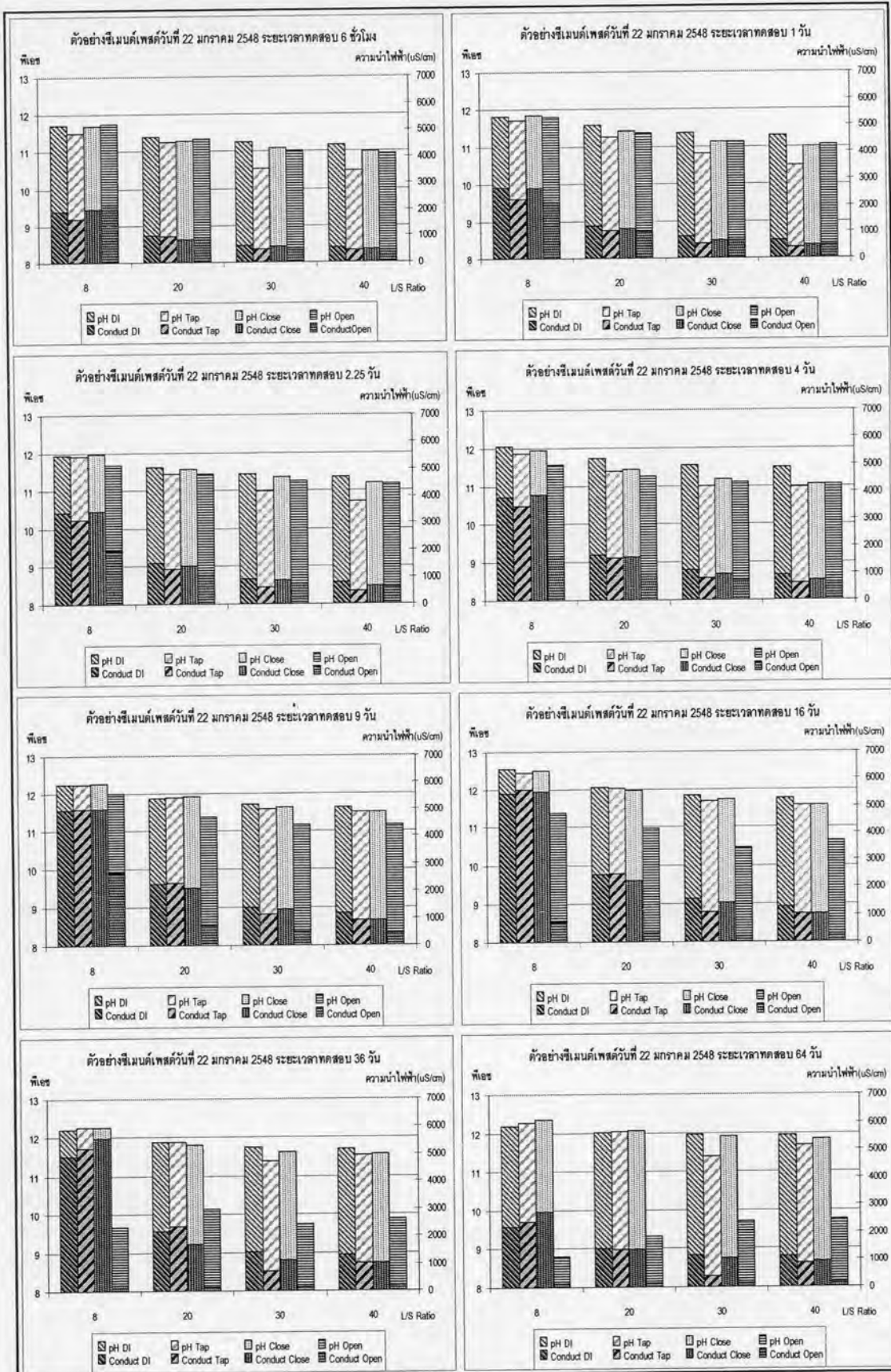
สำหรับ V และ Sr นั้น ไม่ปรากฏมาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม โดยความเข้มข้นเฉลี่ยของ Sr อยู่ที่ 0.456 มก./ล. และความเข้มข้นสูงสุดที่ 2.292 มก./ล. จากการทดสอบด้วยน้ำประปาที่ค่า L/S Ratio ต่ำ(8) ช่วงเวลาการทดสอบที่ 6 (16วัน) ส่วน V มีความเข้มข้นเฉลี่ยอยู่ที่ 2.688 มก./ล. และมีความเข้มข้นสูงสุด 100.320 มก./ล. จากทดสอบการชะละลายด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาทดสอบที่เวลาการทดสอบช่วงที่ 7 (36วัน) ค่า L/S Ratio ต่ำ (8) โดยความเข้มข้นสูงสุดของทั้ง Sr และ V มาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 26 ตุลาคม 2547 ทั้งสิ้น

มาตรฐานน้ำดื่มสำหรับ Zn นั้นการประปานครหลวงได้กำหนดไว้ที่ 3,000 มก./ล. ซึ่งจากการทดสอบพบว่าไม่ปรากฏความเข้มข้นของ Zn ที่เกินมาตรฐาน โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบคือ 1,261.700 มก./ล. จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 9 วันในสารชะละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออน ค่า L/S Ratio เท่ากับ 8

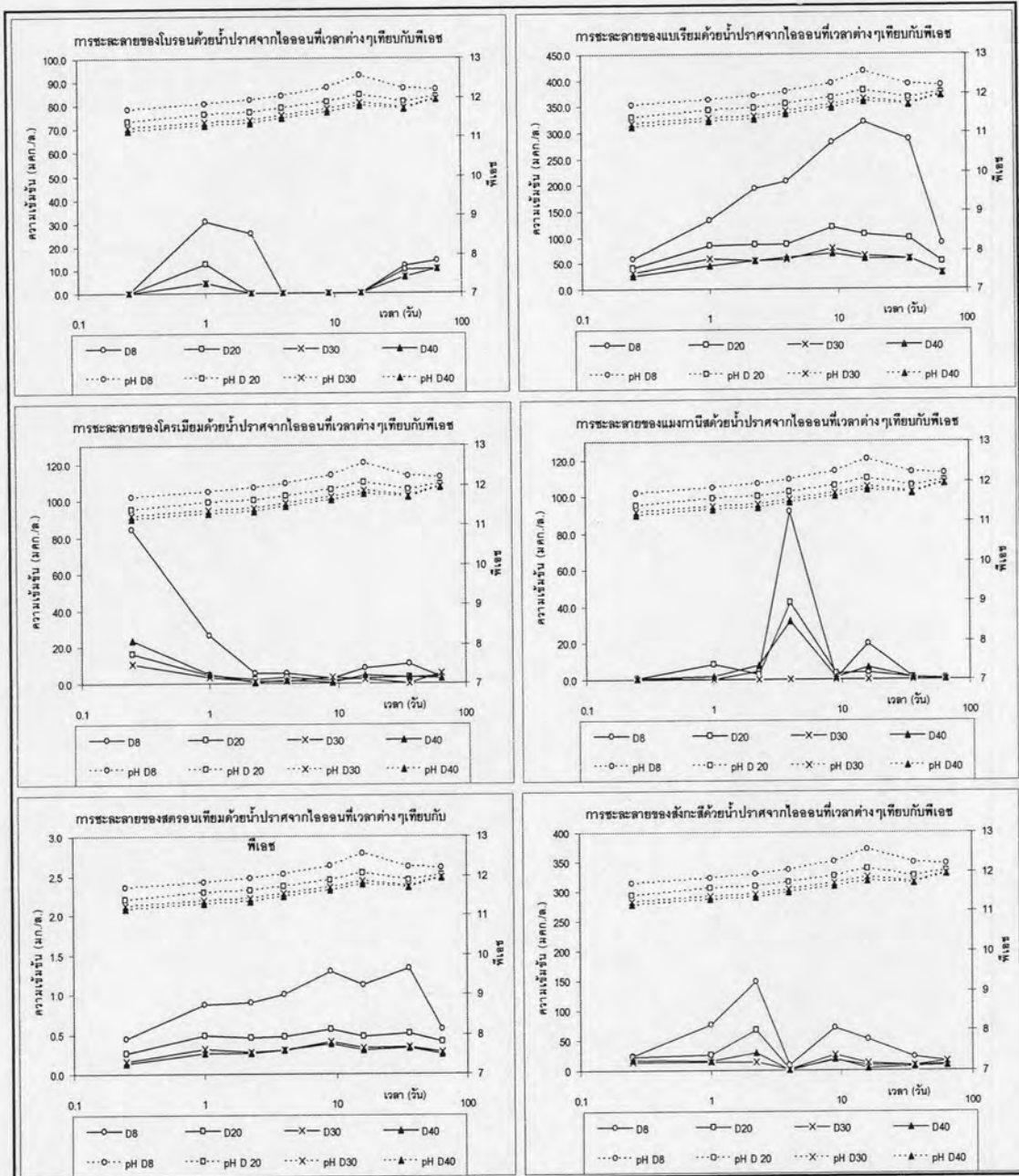
4.2.4 การชะละลายกับอัตราส่วนสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัส

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสและปริมาตรของสารชะละลาย (L/S Ratio) มีผลต่อการชะละลายในแง่ของความสามารถในการเจือจาง จากรูปที่ 4.35 แสดงความแตกต่างของพีเอชและความนำไฟฟ้าของการทดสอบของซีเมนต์โพสต์วันที่ 22 มกราคม 2548 จะเห็นได้ว่าพีเอช (สีอ่อน) ของสารชะละลายที่ L/S 8 มีค่าสูงกว่า L/S ค่าอื่นๆ ที่สารชะละลายและเวลาเดียวกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วพีเอชของ L/S 8 มีค่ามากกว่า L/S 20 อยู่มาก และ L/S 20 มีค่ามากกว่า L/S 30 อยู่พอสมควร แต่ที่ L/S 30 มีพีเอชใกล้เคียงกับที่ L/S 40 โดยจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อดูจากความนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่ L/S 8 มีค่าความนำไฟฟ้า (สีเข้ม) สูงกว่า L/S อื่นๆ ทั่วๆ ไปอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีปริมาตรของสารชะละลายน้อยจึงมีความเข้มข้นของไอออนละลายในสารชะละลายสูงกว่าที่ L/S อื่นๆ โดยความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบสูงสุดในช่วงการทดสอบที่ 16 -36 วัน และลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการทดสอบ รูปที่ 4.36 แสดงความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดของความเข้มข้นของ B Ba Cr Mn Sr และ Zn ที่ชะละลายในช่วงการทดสอบที่ L/S ต่างๆ โดยที่ L/S 8 เกิดการชะละลายออกมาอย่างมากเมื่อเทียบกับที่ L/S อื่นๆ ซึ่งจากผลของความเข้มข้นที่ L/S ต่างกันแสดงถึงการละลายที่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว นอกจากนี้เนื่องจากการทดสอบการชะละลายไม่มีการกวนเขย่าจึงมีการสะสมความเข้มข้นโลหะหนักบริเวณที่เกิดการชะละลายซึ่ง จากรูปที่ 4.37 (ซ้าย) แสดงภาพการสะสมความเข้มข้นของ Mn ที่บริเวณการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนของซีเมนต์โพสต์วันที่ 22 ตุลาคม 2547 ช่วงการทดสอบที่ 5 (9 วัน ระยะเวลาทดสอบรวม 16.5 วัน) (ขวา) แสดงภาพการสะสมความเข้มข้นของ Mn ที่บริเวณการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนของซีเมนต์โพสต์วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ช่วงการทดสอบที่ 6 (16วัน ระยะเวลาทดสอบรวม 32.5 วัน) ซึ่งเป็นผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ L/S 8 มีค่าสูงกว่า L/S อื่นๆ มาก รูปที่ 4.38 แสดงความนำไฟฟ้าของตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2547 และ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งยืนยันความแตกต่างของความนำไฟฟ้าที่ L/S ต่างๆ

สำหรับการใช้งานจริง โดยทั่วไปแล้วภาชนะบรรจุน้ำที่ทำจากซีเมนต์จะมีค่า L/S Ratio เมื่อบรรจุน้ำเต็มอยู่ที่ประมาณ 30 – 40 เซนติเมตร ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมานั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณโลหะหนักในน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในภาชนะลดลงจนมีค่า L/S Ratio ต่ำ ๆ



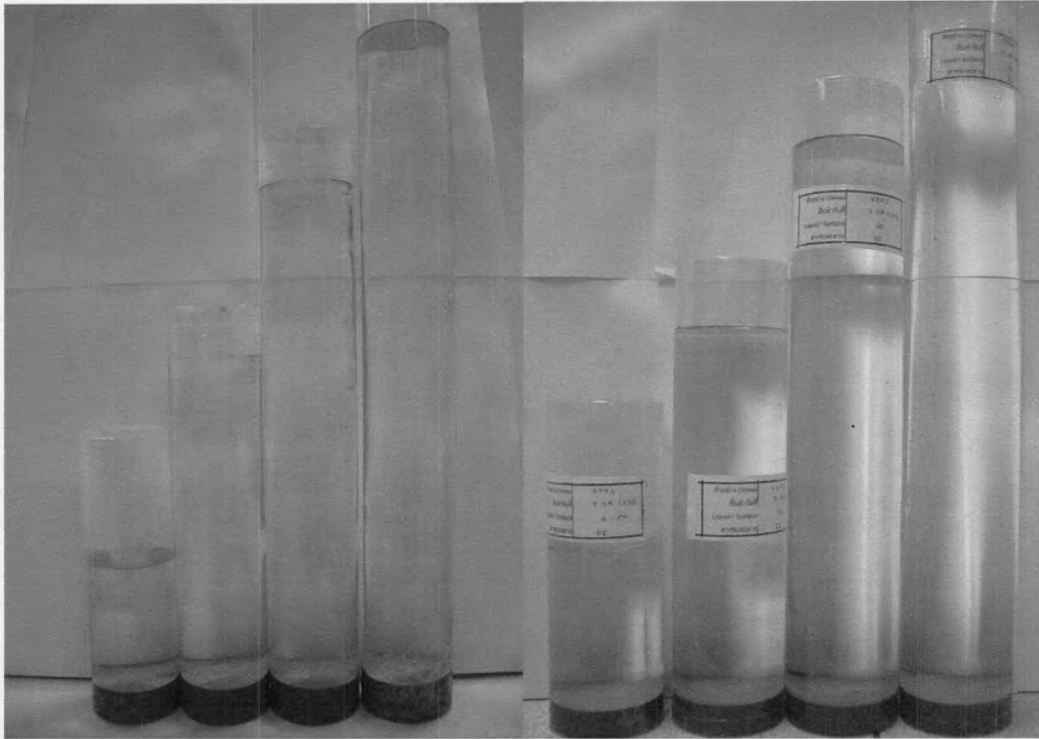
รูปที่ 4.35 พีเอชและความนำไฟฟ้าที่ L/S Ratioต่างกัน ของซีเมนต์เฟสค์วันที่ 22 มกราคม 2548
 หมายเหตุ: พีเอชเป็นแกนสีอ่อนดูแกนซ้าย และความนำไฟฟ้าเป็นแกนสีเข้มดูแกนขวา



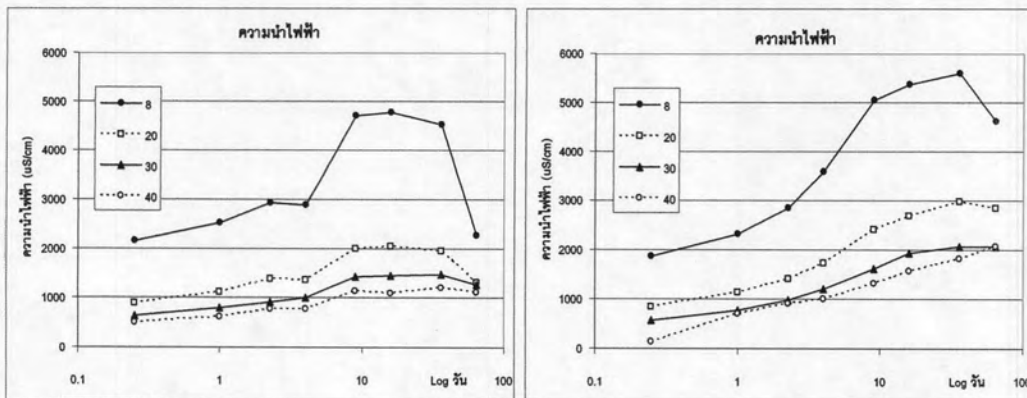
รูปที่ 4.36 L/S Ratio กับการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆจากซีเมนต์เฟลด์วันที่ 22 มกราคม 2548

หมายเหตุ : กราฟเส้นเต็มเป็นกราฟแสดงความเข้มข้นดูแกนซ้าย

กราฟเส้นประเป็นกราฟพีเอชดูแกนขวา



รูปที่ 4.37 การสะสมความเข้มข้นของ Mn ที่บริเวณการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างวันที่ (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 และ (ขวา) 7 กุมภาพันธ์ 2548

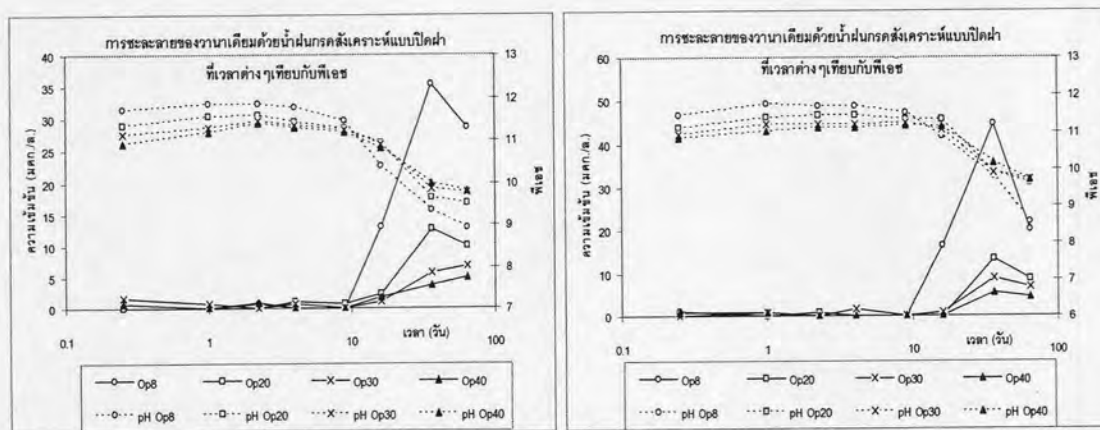


รูปที่ 4.38 ความนำไฟฟ้าที่ L/S ต่างๆของ (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 และ (ขวา) 7 กุมภาพันธ์ 2548

4.2.5 ผลของพีเอชกับการชะละลาย

การละลายของ $\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)}$ จากซีเมนต์เพสต์เป็นตัวควบคุมพีเอชของสารชะละลาย ภายหลังจากทดสอบซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 9.81 – 12.83 (โดยไม่นับรวมผลของการชะละลายแบบเปิดฝาชึ่งมีผลทำให้พีเอชของระบบลดลง) รูปที่ 4.40 แสดงภาพรวมของพีเอชตลอดการทดสอบ การชะละลายของธาตุต่างๆ ประกอบไปด้วย (ก.) Ba (ข.) Ca (ค.) Cd (ง.) Cr (จ.) Sr และ (ฉ.) V จากรูปจะเห็นได้ว่าการชะละลายที่เพิ่มขึ้นของ Ca ซึ่งส่งผลให้พีเอชของระบบเพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถในการชะละลายของ Ba และ Sr (เพิ่มขึ้น) ตรงกันข้ามกับการชะละลายของ V ในระบบเปิดซึ่งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพีเอชของระบบลดลงโดยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.39 ส่วน Cd นั้นผลการทดสอบที่ได้ยังไม่ปรากฏรูปแบบการชะละลายที่ชัดเจน รวมไปถึงการชะละลายของ Cr ซึ่งมีความเข้มข้นสูงขึ้นที่พีเอชประมาณ 11 – 12

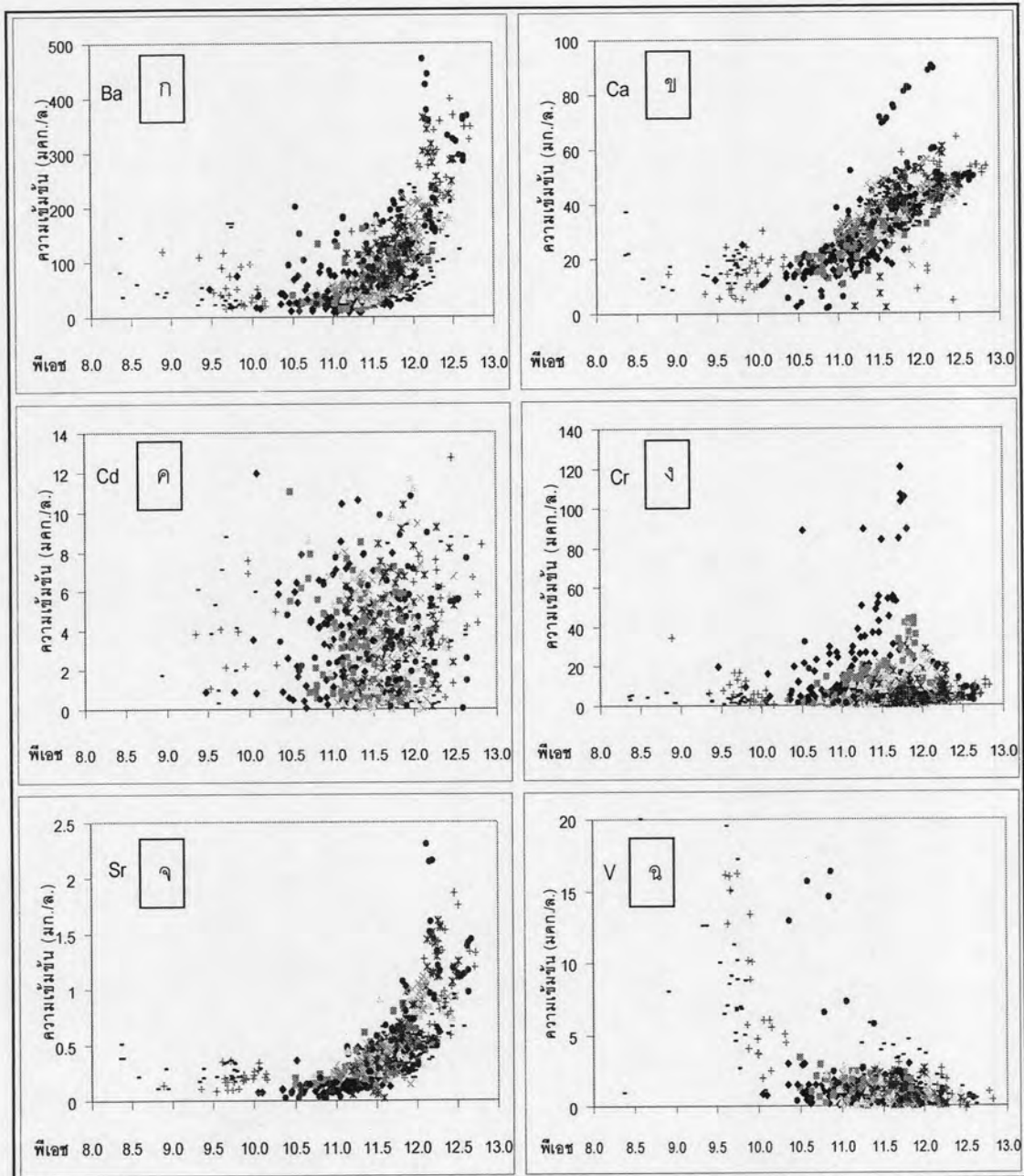
สำหรับธาตุที่ไม่ชะละลายออกมา Qiao และคณะ (2006) ได้อธิบายการสะสมตัวของ Cu Pb และ Zn ใกล้ผิวหน้าของการชะละลายว่าเนื่องจากความแตกต่างของพีเอชในรูพรุน (พีเอชมากกว่า 12) เป็นผลให้โลหะเหล่านี้เกิดการเคลื่อนย้ายจากแก่นของก้อนทดสอบสู่บริเวณที่อยู่ใกล้กับผิวหน้าที่สัมผัสกับสารชะละลายซึ่งพีเอชในบริเวณนี้ลดลงเนื่องจากการชะละลายของ $\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)}$ โลหะเกิดการตกตะกอนซึ่งเป็นผลให้เกิดการชะละลายที่ลดลงในอนาคต



รูปที่ 4.39 การชะละลายของ V ในระบบเปิดซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 (ขวา) 6 มกราคม 2548

หมายเหตุ : กราฟเส้นเต็มเป็นกราฟแสดงความเข้มข้นดูแกนซ้าย

กราฟเส้นประเป็นกราฟพีเอชดูแกนขวา

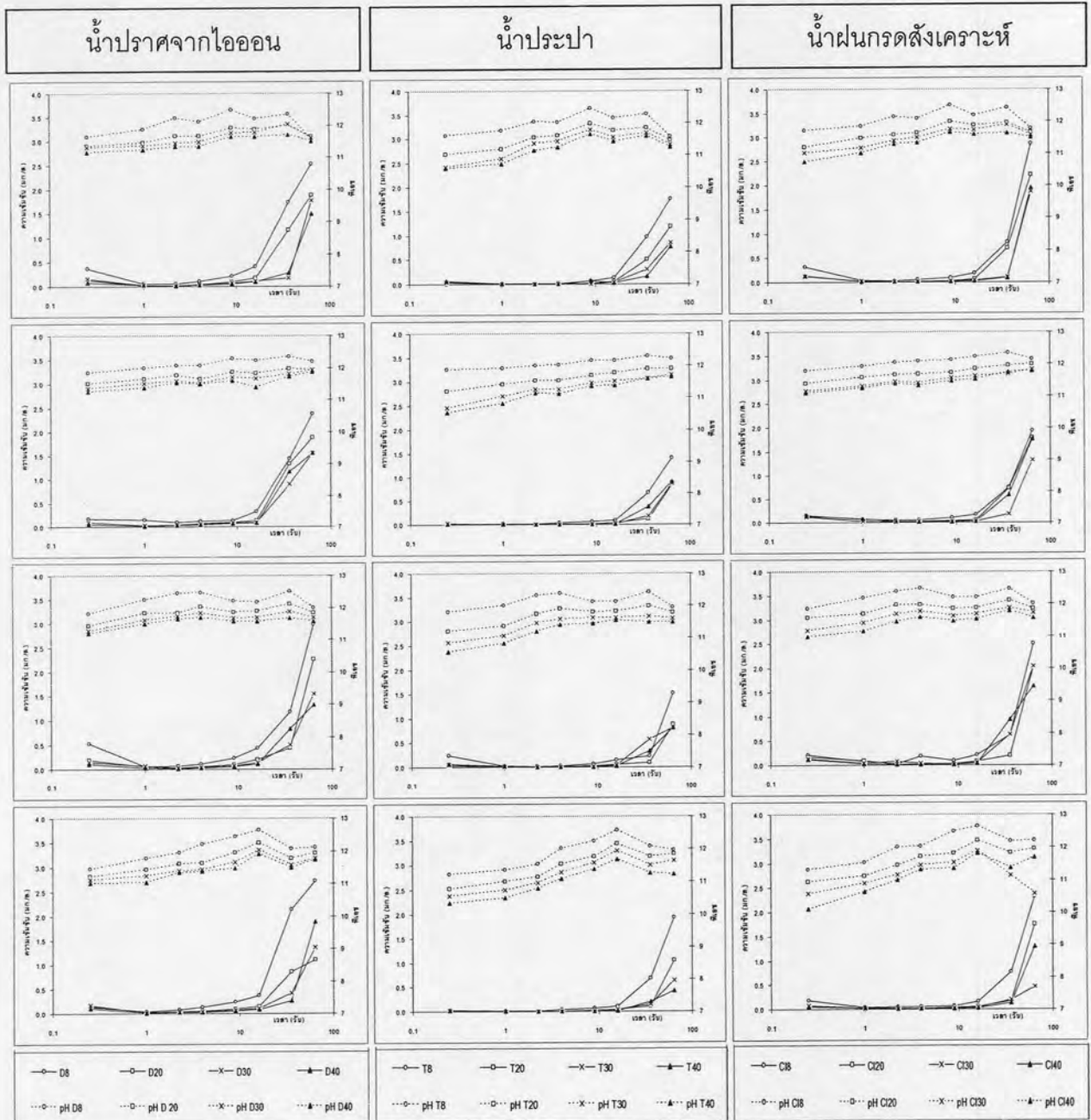


รูปที่ 4.40 ภาพรวมพีเอชจากการทดสอบการชะละลายของธาตุต่างๆ

4.2.6 สารชะละลายกับการชะละลาย

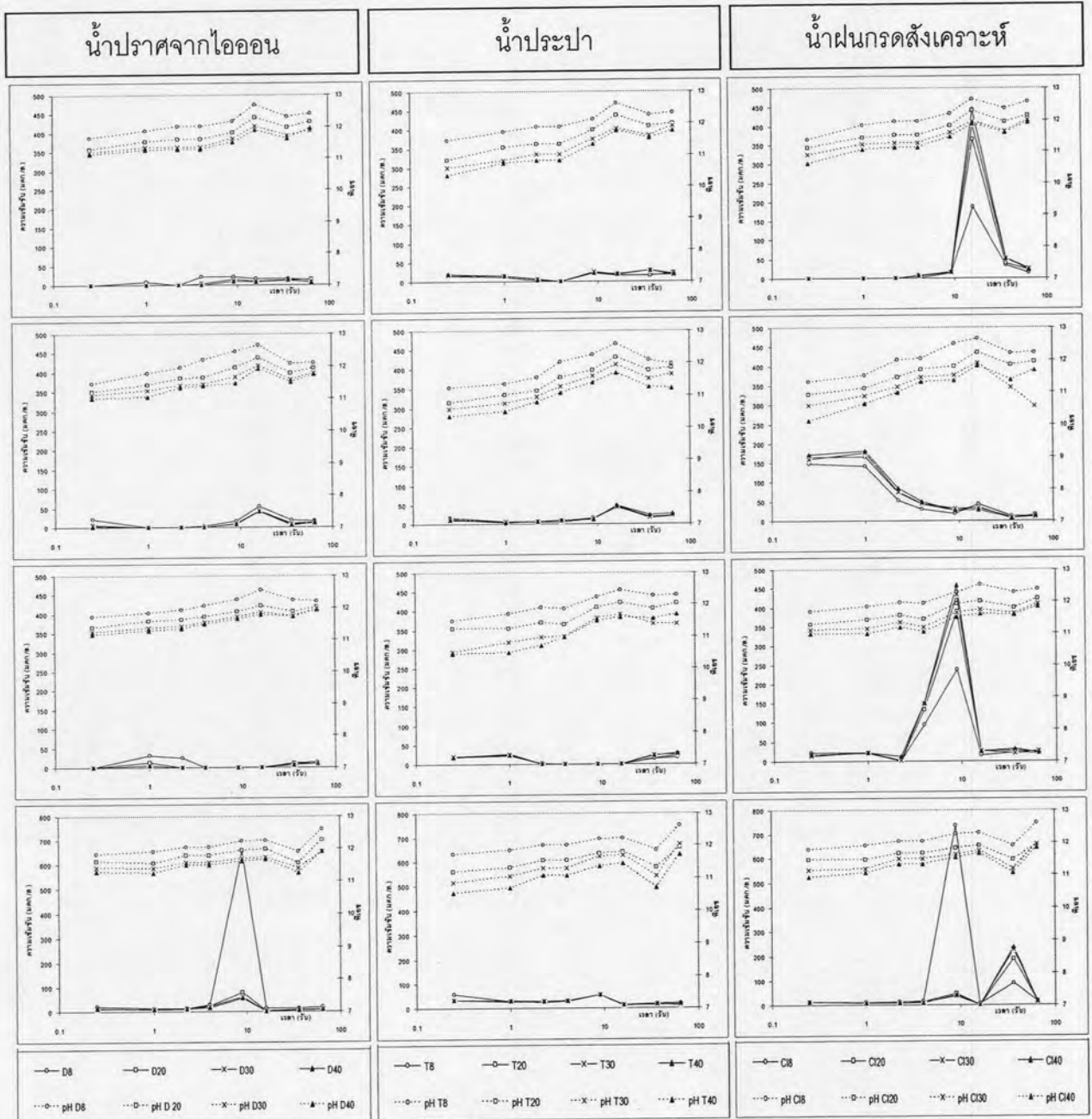
การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะละลายต่างชนิดกัน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการชะละลายของโลหะในสารชะละลายชนิดต่างๆ รูปที่ 4.41 แสดงลักษณะการชะละลายของ Al ในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด โดยคอลัมน์แรก (แนวตั้ง) เป็นน้ำปราศจากไอออน คอลัมน์ที่ 2 เป็น

น้ำประปา และคอลัมน์ที่ 3 เป็นน้ำฝนกรดสังเคราะห์ จากตัวอย่างซีเมนต์โพสต์หลายวัน โดยมี
 แถวที่ 1 (แนวนอน) เป็นตัวอย่างวันที่ 20 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 22 ตุลาคม 2547
 แถวที่ 3 วันที่ 26 ตุลาคม 2547 และ แถวที่ 4 วันที่ 16 มกราคม 2548 จากรูปจะเห็นว่า การ
 ชะละลายของ AI ในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยการชะละลายใน
 น้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์แสดงผลที่ใกล้เคียงกัน ส่วนน้ำประปาให้ผลการ
 ชะละลายที่ต่ำกว่าสารละลายทั้ง 2 แต่ก็ไม่มากนัก



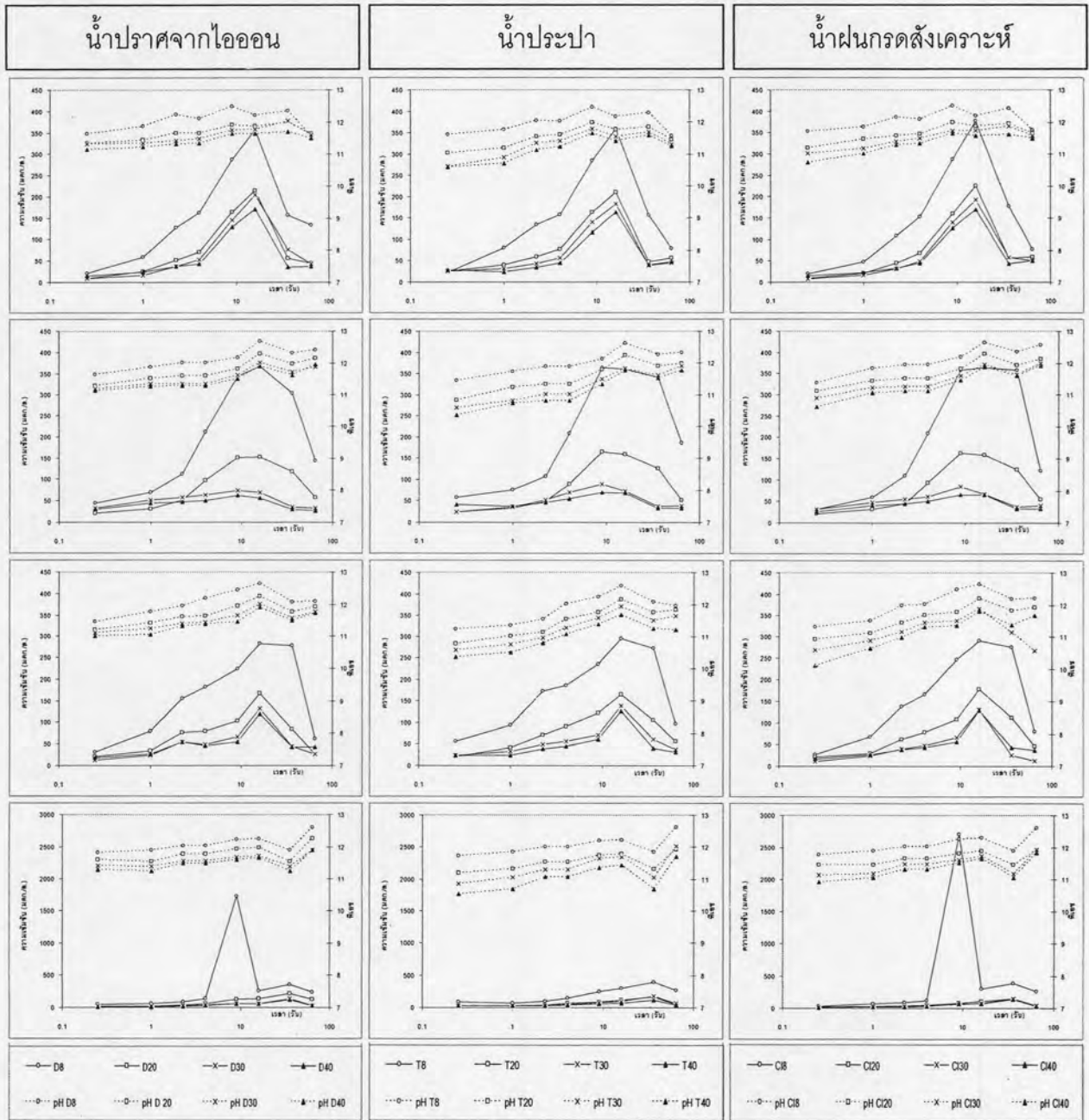
รูปที่ 4.41 การชะละลายของ AI ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

รูปที่ 4.42 แสดงการชะละลายของ B ในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด โดยแถวที่ 1 เป็นตัวอย่างวันที่ 6 มกราคม 2548 แถวที่ 2 วันที่ 16 มกราคม 2548 แถวที่ 3 วันที่ 22 มกราคม 2548 และแถวที่ 4 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ผลการเปรียบเทียบพบว่าการชะละลายของ B มีความแตกต่างจากการชะละลายของ AI โดยการชะละลายในฝนกรดสังเคราะห์แสดงผลการชะละลายที่มากกว่าสารชะละลายชนิดอื่น



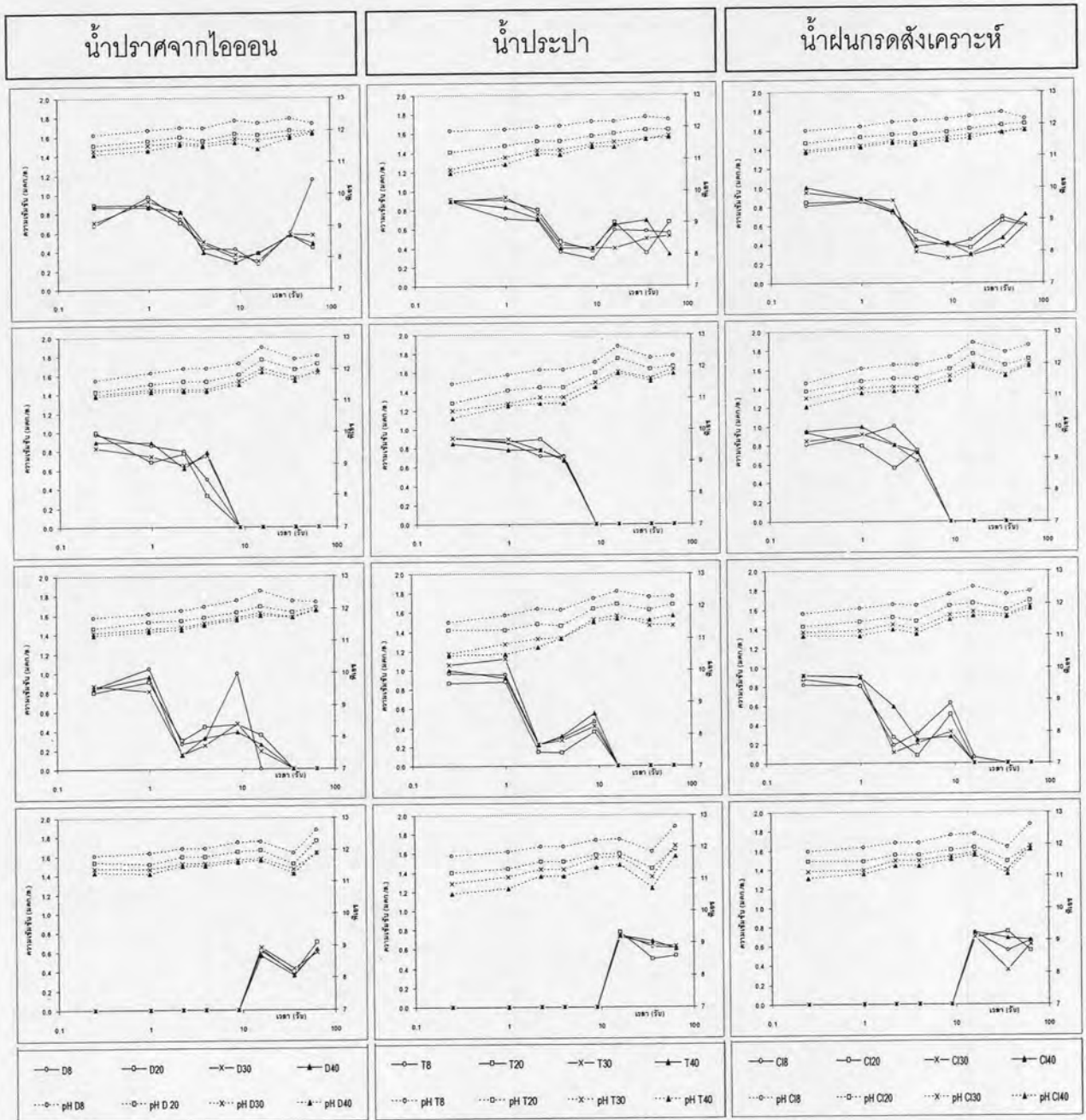
รูปที่ 4.42 การชะละลายของ B ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของ Ba ในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด แสดงอยู่ในรูปที่ 4.43 โดยตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่นำมาแสดงได้แก่ แถวที่ 1 วันที่ 20 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 6 มกราคม 2548 แถวที่ 3 วันที่ 16 มกราคม 2548 และ แถวที่ 4 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นลักษณะการชะละลายที่คล้ายกันในสารชะละลายชนิดต่างๆ



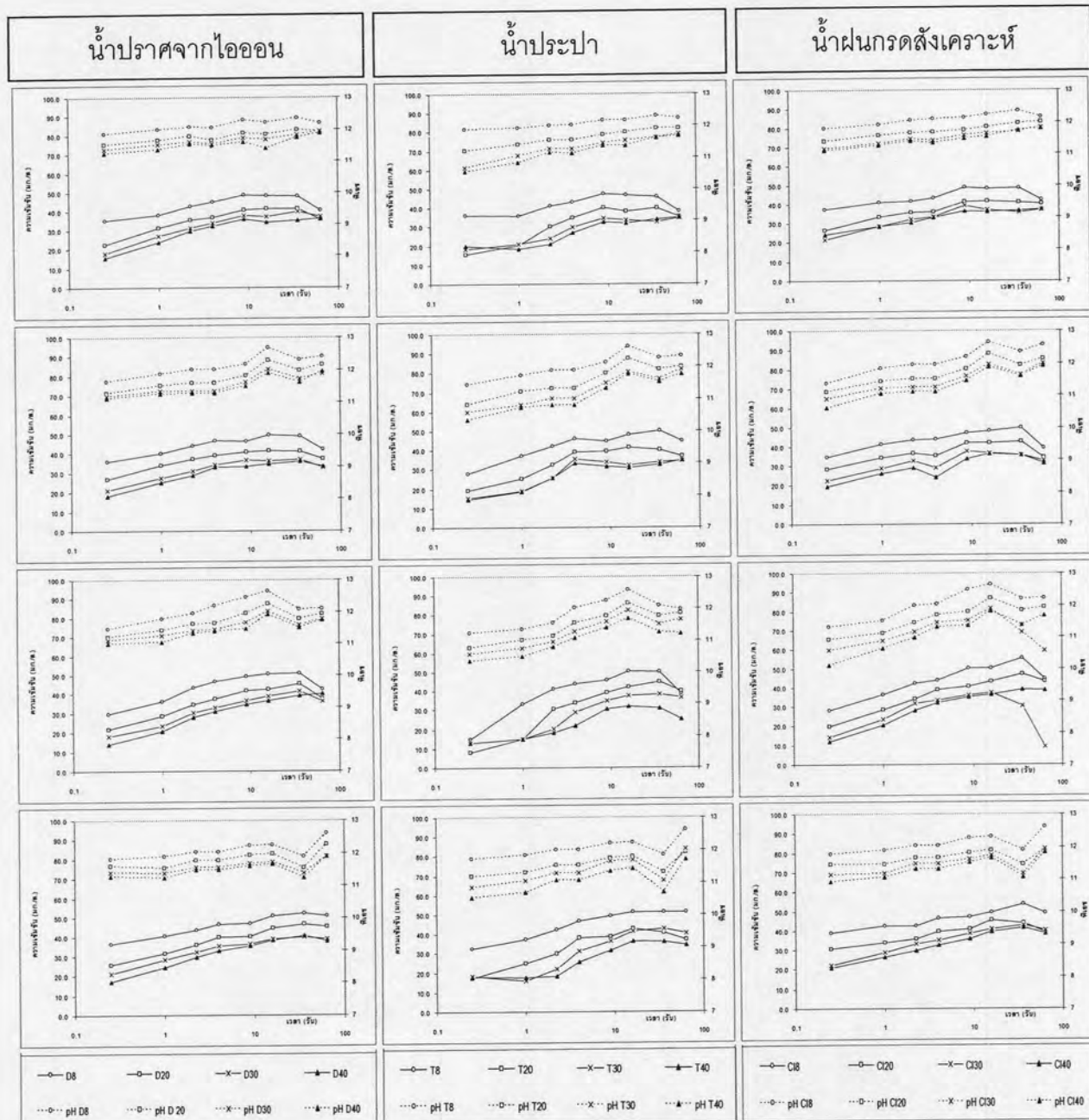
รูปที่ 4.43 การชะละลายของ Ba ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของ Be ในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด แสดงอยู่ในรูปที่ 4.44 โดย ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่นำมาแสดงได้แก่ แกวที่ 1 วันที่ 22 ตุลาคม 2547 แกวที่ 2 วันที่ 6 มกราคม 2548 แกวที่ 3 วันที่ 22 มกราคม 2548 และ แกวที่ 4 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งผลการเปรียบเทียบ แสดงให้เห็นถึงลักษณะการชะละลายที่คล้ายกันในสารชะละลายชนิดต่างๆ ถึงแม้ไม่ทราบแน่ชัด เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลให้ Be เกิดการชะละลายออกมาในหลายรูปแบบ แต่จากการทดสอบด้วยสาร ชะละลายต่างชนิดกัน Be ยังคงแสดงลักษณะการชะละลายนั้นไว้ได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าชนิดของ สารชะละลายไม่มีผลต่อความสามารถในการชะละลายของ Be



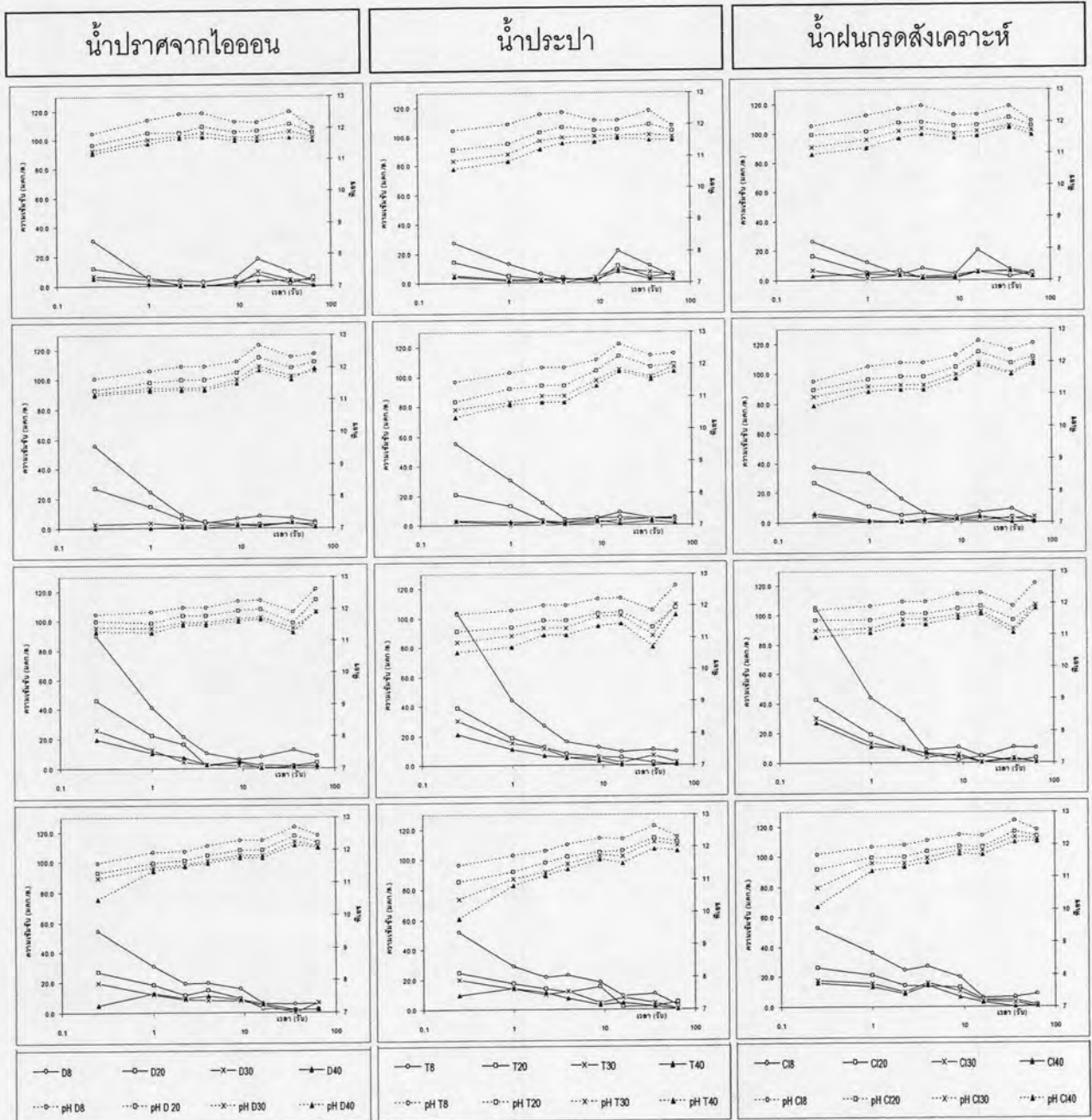
รูปที่ 4.44 การชะละลายของ Be ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

Ca แสดงการชะละลายที่เหมือนกันในสารชะละลายทั้ง 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.45 แกว
 ที่ 1 เป็นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 22 ตุลาคม 2547 แกวที่ 2 วันที่ 6 มกราคม 2548 แกวที่ 3 วันที่
 16 มกราคม 2548 และแกวที่ 4 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



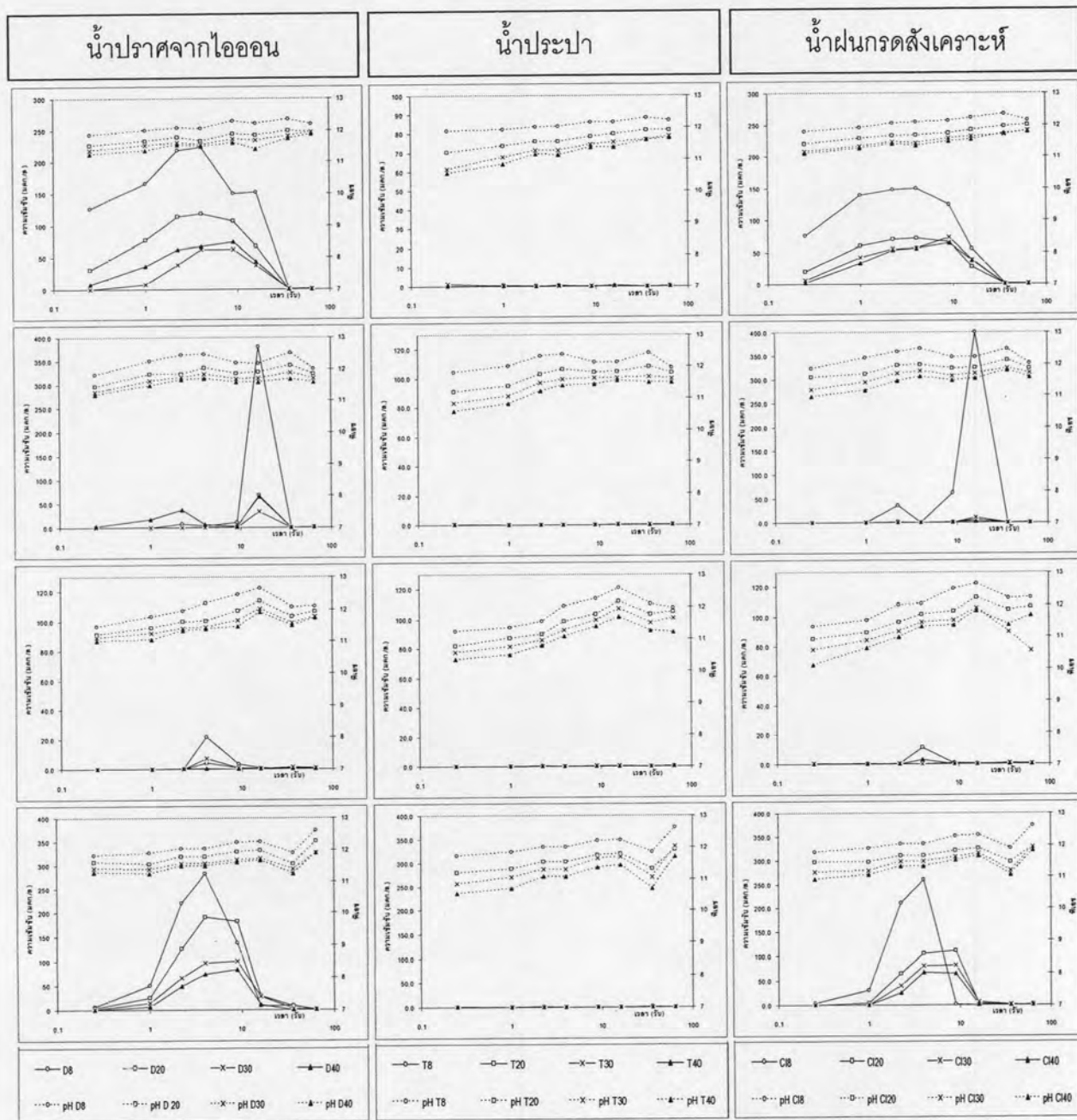
รูปที่ 4.45 การชะละลายของ Ca ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

เช่นเดียวกับ Ca และธาตุอื่นที่กล่าวมาข้างต้น (Al Ba และ Be) Cr แสดงการชะละลายที่มีลักษณะคล้ายกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ซึ่งการชะละลายจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดสอบ ดังแสดงใน รูปที่ 4.46 โดยมีแถวที่ 1 เป็นตัวอย่างซีเมนต์โพสท์วันที่ 26 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 6 มกราคม 2548 แถวที่ 3 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 และ แถวที่ 4 เป็น ตัวอย่างซีเมนต์โพสท์วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548 ตามลำดับ



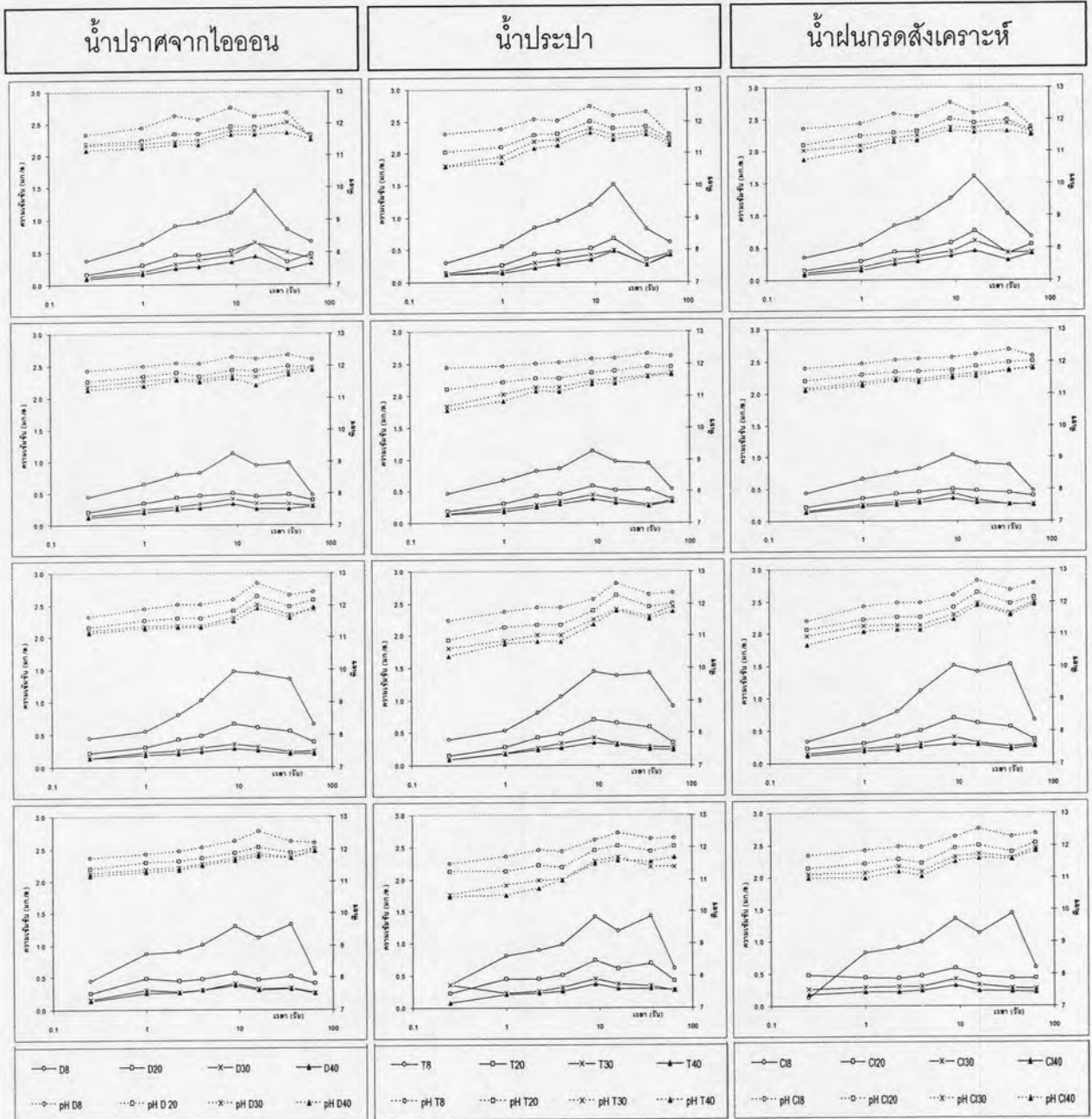
รูปที่ 4.46 การชะละลายของ Cr ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของ Mn ให้ผลการเปรียบเทียบที่ต่างออกไป เนื่องจากไม่ปรากฏการชะละลายของ Mn ในน้ำประปา ส่วนในสารชะละลายอีก 2 ชนิดนั้นให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.47 โดยแถวที่ 1 คือตัวอย่างซีเมนต์โพสท์วันที่ 22 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 26 ตุลาคม 2547 แถวที่ 3 วันที่ 16 มกราคม 2548 และแถวที่ 4 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



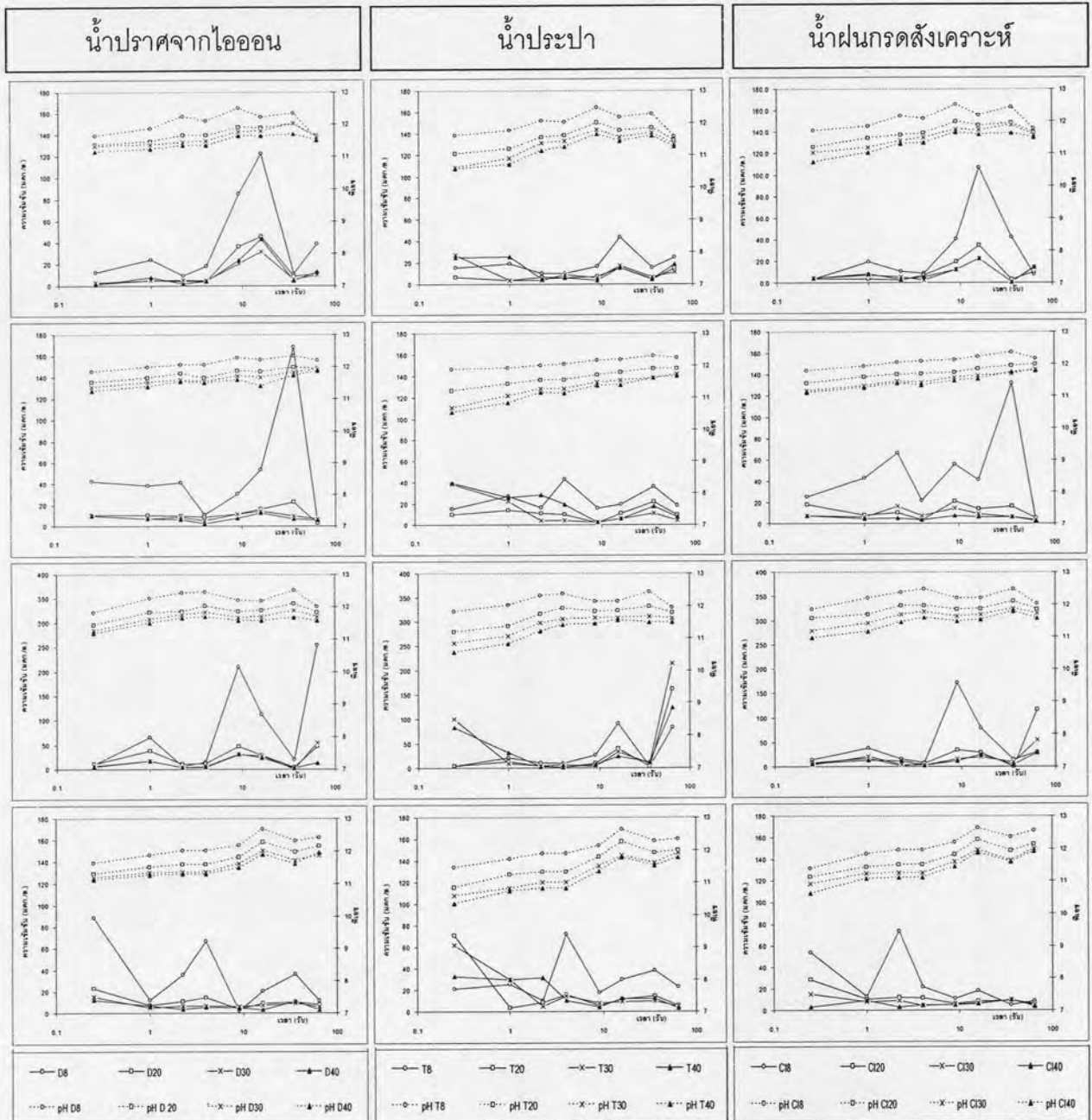
รูปที่ 4.47 การชะละลายของ Mn ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

Sr แสดงผลการเปรียบเทียบที่ไม่แตกต่างกันของสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด โดยการชะละลายเกิดขึ้นในช่วงกลางของการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 โดยมีแถวที่ 1 เป็นตัวอย่าง วันที่ 20 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 22 ตุลาคม 2547 แถวที่ 3 วันที่ 6 มกราคม 2548 และ แถวที่ 4 วันที่ 22 มกราคม 2548



รูปที่ 4.48 การชะละลายของ Sr ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของ Zn แสดงผลการเปรียบเทียบการทดสอบด้วยสารละลายทั้ง 3 ชนิด ในรูปที่ 4.49 โดยแถวที่ 1 คือตัวอย่างซีเมนต์เฟสที่วันที่ 20 ตุลาคม 2547 แถวที่ 2 วันที่ 22 ตุลาคม 2547 แถวที่ 3 วันที่ 26 ตุลาคม 2547 และ แถวที่ 4 วันที่ 6 มกราคม 2548 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นความคล้ายคลึงของการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนกับฝนกรดสังเคราะห์ โดยการชะละลาย Zn ด้วยน้ำประปาแสดงการชะละลายเพียงเล็กน้อยและดูเหมือนจะแทบไม่มีความแตกต่างกันของความเข้มข้นของ Zn ที่ L/S ต่างกัน



รูปที่ 4.49 การชะละลายของ Zn ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์

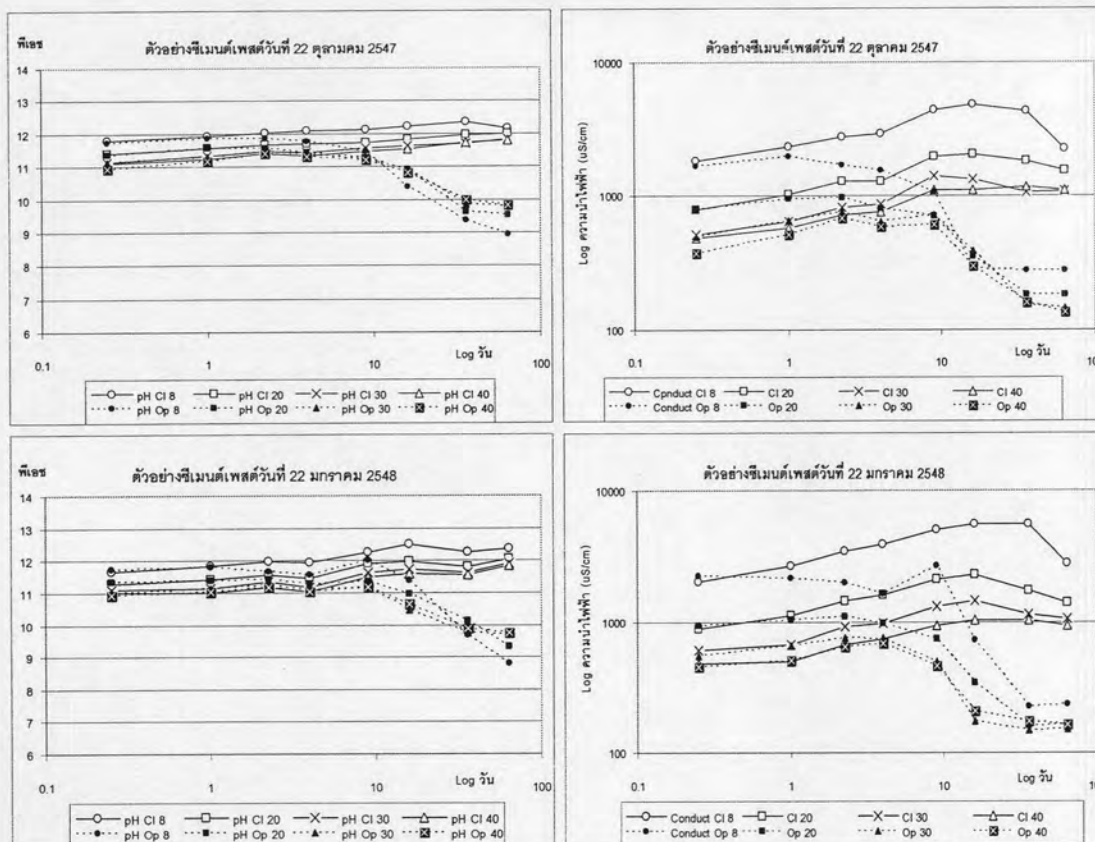
สำหรับ Cd Cu Fe Ni Pb และ V นั้นไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างสารละลายทั้ง 3 ชนิดได้ เนื่องจากผลการทดสอบที่ได้ไม่แสดงแนวโน้มในการละลายที่ชัดเจนหรือการละลายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังกล่าวในหัวข้อ 4.2.1 (ภาพรวมผลการทดสอบการละลาย)

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากสารละลายชนิดต่างๆ พบว่าโลหะส่วนใหญ่แสดงความสามารถในการละลายที่คล้ายกันในสารละลายทั้ง 3 ประเภท ทั้งนี้มีโลหะอยู่ 2 ชนิดที่แสดงลักษณะการละลายที่แตกต่างออกไป คือ Mn เมื่อทดสอบด้วยน้ำประปา (น้อยลง) และ B เมื่อทดสอบด้วยฝนกรดสังเคราะห์ (สูงขึ้นเป็น peak)

4.2.7 การเกิดคาร์บอนเนชันกับการละลาย

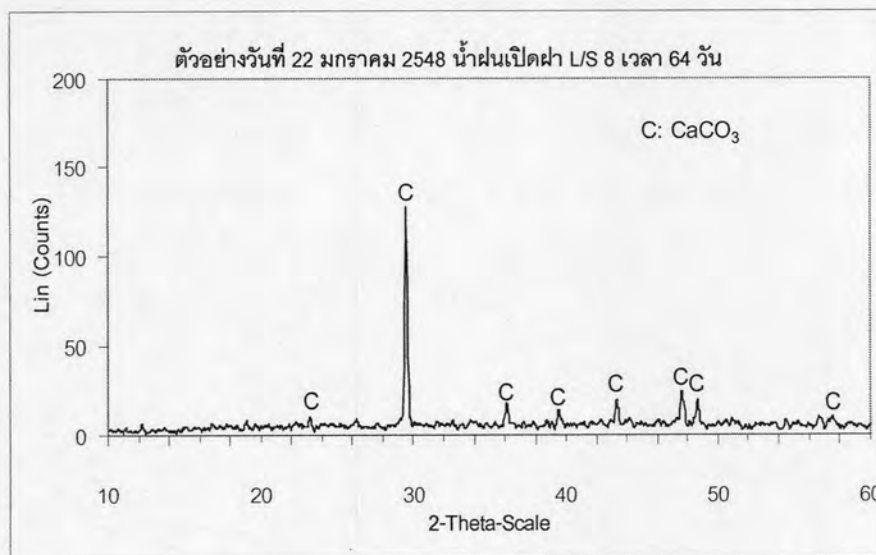
การเปรียบเทียบการละลายด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝาและชนิดเปิดฝาทดสอบเพื่อศึกษาผลของการเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมี $\text{CO}_{2(g)}$ ละลายลงสู่ระบบเป็น $\text{H}_2\text{CO}_{3(aq)}$ แล้วรวมตัวกับ $\text{Ca}^{2+}_{(aq)}$ ในสารละลายที่พีเอชสูงกลายเป็น $\text{CaCO}_{3(s)}$ มีผลทำให้พีเอชของระบบมีค่าลดลงเนื่องจากมี $\text{H}_3\text{O}^{+}_{(aq)}$ เกิดขึ้น รูปที่ 4.50 แสดงความแตกต่างของพีเอช และความนำไฟฟ้าระหว่างการทดสอบแบบเปิดฝาและปิดฝาของสารละลายที่เป็นฝนกรดสังเคราะห์ ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 22 ตุลาคม 2547 และตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าการทดสอบชนิดปิดฝาทดสอบจะให้พีเอชสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 12 ส่วนการทดสอบแบบเปิดฝามีพีเอชสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 9-10 (โดยมีบัฟเฟอร์ของ $\text{HCO}_3^{-}_{(aq)}$ ช่วยรักษาระดับพีเอชไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ที่ 6.3-10.3 (Benjamin, 2002)) ซึ่งในความแตกต่างของพีเอชนี้อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความสามารถในการละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ทั้งมีความสามารถเพิ่มขึ้นและลดต่ำลงตามธรรมชาติของสารประเภทนั้น ดังได้แสดงผลของพีเอชกับการละลายของ V มาแล้วในข้างต้น

นอกจากการเปลี่ยนแปลงของ พีเอชที่เกิดขึ้นแล้ว การเกิดคาร์บอนเนชันยังส่งผลให้ไอออนละลายน้ำมีปริมาณลดลงอย่างมากโดยดูได้จากความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาทดสอบ รูปที่ 4.51 แสดงผลการวิเคราะห์ซีเมนต์เพสต์วันที่ 22 มกราคม 2548 ซึ่งผ่านการทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ L/S เท่ากับ 8 ช่วงเวลาการทดสอบ 64 วัน ด้วยเครื่อง XRD พบว่าเกิดตะกอนหินปูนในปริมาณมากซึ่งตะกอนนี้อยู่บนผิวหน้าของก้อนทดสอบ (สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน) สำหรับ peak ของหินปูนนั้นจะขึ้นที่ 23.1° 29.5° 36° 39.5° 43.3° 47.9° 48.5° และที่ 57.5°



รูปที่ 4.50 ความแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบเปิดฝาและปิดฝาของตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2547 (บน) และตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 (ล่าง)

หมายเหตุ : คอลัมน์ซ้าย ทีเอส - คอลัมน์ขวา ความนำไฟฟ้า
: เส้นที่ระบบปิด - เส้นปรระบบเปิด



รูปที่ 4.51 ผลการวิเคราะห์ซีเมนต์เฟสที่ผ่านการชะละลายด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝา

4.2.8 กลไกการชะละลาย

4.2.8.1 ความแตกต่างระหว่างการทดสอบตามมาตรฐานการชะละลายของ EA NEN 7375 และการทดสอบในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากโครงสร้างบรรจุ น้ำดื่มซึ่งทำจากซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาพร้อม ประเด็นหลักของการวิจัยอยู่ที่การศึกษา สภาพการใช้งานจริงโดยอาศัยการประยุกต์การทดสอบของ EA NEN 7375 เข้าช่วย ดังนั้นจึงมีความแตกต่างกันระหว่างการทดสอบตามมาตรฐานและการทดสอบในงานวิจัยนี้ อาทิ ปริมาตรของสารชะละลายในงานวิจัย มีค่าตั้งแต่ 0.23 0.57 0.85 และ 1.13 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งตามข้อกำหนดให้ใช้สารชะละลายมีปริมาตรอยู่ระหว่าง 50 ถึง 200 เท่าของพื้นที่ผิวสัมผัส หรือ 0.14 – 0.57 ลิตร (พื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 0.0028 ตรม. สำหรับการทดสอบการชะละลายบางส่วน) ดังนั้นในการวิเคราะห์กลไกการชะละลายจึงใช้ค่า L/S ที่ 8 และ 20 ดังแสดงปริมาตรสารชะละลายในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาตรของสารชะละลายที่ L/S ต่างๆ เทียบกับข้อกำหนดของ EA NEN 7375

L/S Ratio	พื้นที่ผิวสัมผัส	50 เท่าของพื้นที่ผิว	ปริมาตรสารชะละลาย	200 เท่าของพื้นที่ผิว
ชม.	ตร.ม.	ลิตร	ลิตร	ลิตร
8	0.0028	0.1414	0.2263	0.5657
20			0.5657	
30			0.8486	
40			1.1314	

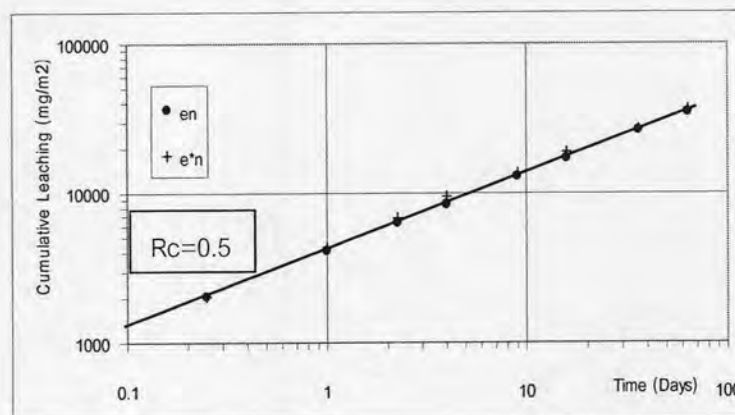
นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างของสารชะละลาย โดยในมาตรฐานระบุให้ใช้ กรดไนตริก เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ซึ่งต่างจากในงานวิจัยที่ใช้น้ำปราศจากไอออน น้ำประปา น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ซึ่งสารชะละลายที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุดคือน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากฝนกรดสังเคราะห์ที่ทำขึ้นตามมาตรฐานของ EPA มีส่วนผสมของ กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก (40:60 โดยน้ำหนัก) ซึ่ง SO_4^{2-} อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการชะละลายของธาตุบางชนิดได้

4.2.8.2 การวิเคราะห์กลไกการชะละลาย

ในการวิเคราะห์กลไกการชะละลายจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ขั้นตอนการตรวจสอบก่อนตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ว่าการละลายของก้อนทดสอบหรือไม่ และขั้นตอนของการวิเคราะห์กลไกการชะละลาย ซึ่งในภาคผนวก ค. แสดงการคำนวณโดย

ละเอียดของตัวอย่าง ซีเมนต์เพสต์วันที่ 20 ตุลาคม 2547 วิเคราะห์การชะละลายของ Al ด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่ L/S 8 การวิเคราะห์กลไกการชะละลายแสดงให้เห็นว่าการชะละลายของ Al นั้นประกอบไปด้วยกลไกที่เกี่ยวข้อง 2 กลไก คือ การชะล้างที่ผิวหน้าช่วงแรกจากนั้นจึงการละลายของ Al ดังตาราง ค.7

การวิเคราะห์กลไกการชะละลายสำหรับธาตุต่างๆ นั้น ข้อมูลที่จำเป็นในการพิจารณากลไกมีอยู่ 3 ข้อมูลได้แก่ CF (Concentration Factor) r_c (The slope of linear regression line of cumulative leaching) และ sd_{r_c} (The standard deviation of the slope) ซึ่งค่า CF จะต้องมามีค่ามากกว่า 1.5 กล่าวคือปริมาณของธาตุที่วัดได้จะต้องค่ามากกว่าค่า LOD อย่างน้อย 1.5 เท่า ซึ่งหมายความว่า สำหรับธาตุที่มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่า LOD นั้นไม่สามารถคำนวณกลไกการชะละลายได้ และ sd_{r_c} จะต้องมามีค่าน้อยกว่า 0.5 สำหรับ r_c จะพิจารณาเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรายการคำนวณในภาคผนวก ค. สำหรับการพิจารณากลไกการชะละลายจากกราฟสามารถทำร่วมกับการคำนวณได้โดยการสร้างเส้น r_c ที่มีค่าความชันเท่ากับ 0.5 เพื่อมาเปรียบเทียบในกราฟที่พล็อตระหว่าง (แกนตั้ง: y) ค่า Log ของการชะละลายสะสมที่วัดได้ (ϵ_n^* : กากบาท) ร่วมกับ ค่า Log ของการชะละลายสะสมที่ได้จากสูตร (ϵ_n : วงกลม) โดยมีค่า Log ของเวลาเป็นแกนนอน (แกน x) ซึ่งกลไกการชะละลายแบบแพร่จะให้กราฟที่มีความชันระหว่าง 0.35 -0.65 รูปที่ 4.52 แสดงตัวอย่างภาพที่มีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมอย่างสมบูรณ์ตลอดการชะละลาย ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดของ ϵ_n ในแต่ละช่วงอยู่บนเส้นความชันเท่ากับ 0.5 พอดี ซึ่งกราฟแสดงกลไกการชะละลายของธาตุต่างๆ ในแต่ละวันแสดงอยู่ในรูปที่ 4.53-4.59 ธาตุที่แสดงกลไกการชะละลายอย่างชัดเจนได้แก่ธาตุที่มีความสามารถในการชะละลายออกมาได้สูง อาทิ Al Ba Ca และ Sr เป็นต้น สำหรับธาตุที่ชะละลายออกมาในระดับต่ำจะแสดงความแปรปรวน อาทิ Cr Mn และ Zn นอกจากนี้ธาตุอื่นๆ ไม่สามารถคำนวณกลไกการชะละลายได้เนื่องจากวัดความเข้มข้นได้ต่ำกว่า LOD

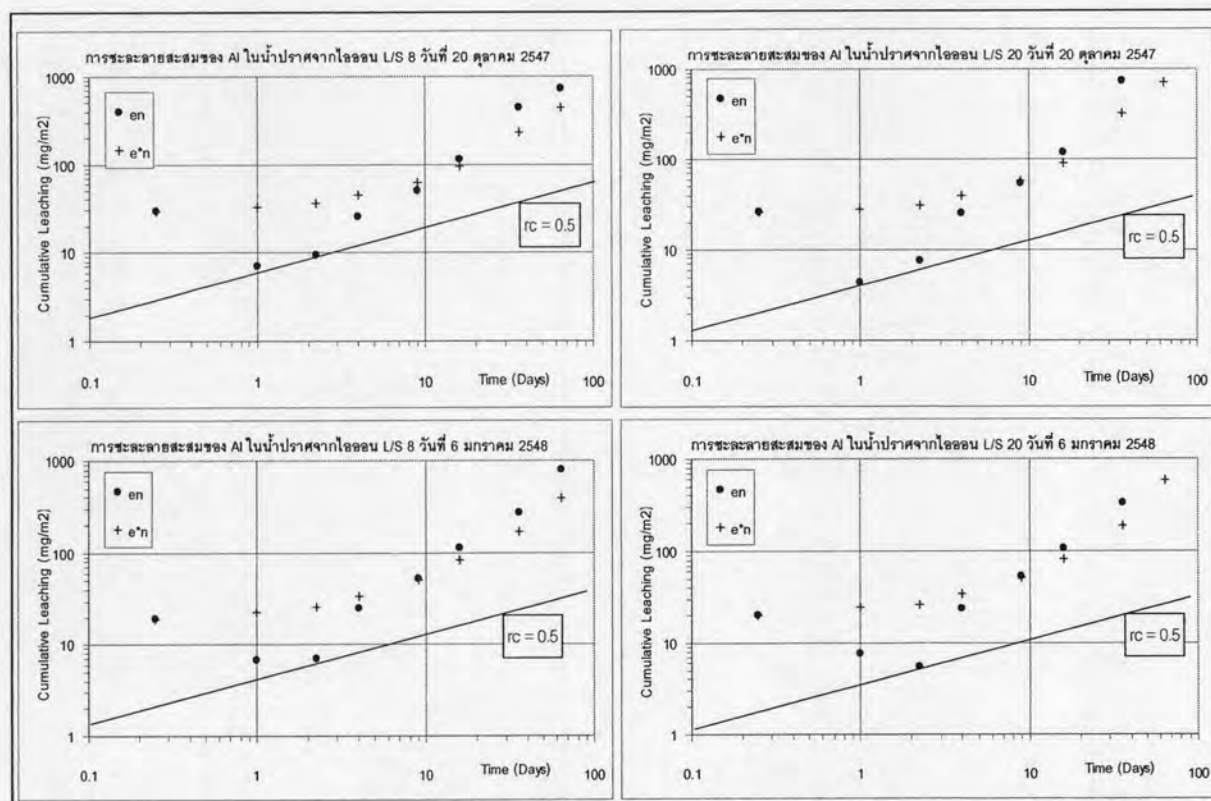


รูปที่ 4.52 ตัวอย่างภาพที่มีการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลายอย่างสมบูรณ์ตลอดการทดสอบ

ในการพิจารณาการชะละลายของ AI ซึ่งแสดงผลกลไกที่ได้จากการคำนวณของตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีวันที่ 20 ตุลาคม 2547 และวันที่ 6 มกราคม 2548 อยู่ในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการชะละลายโดยรวมของ AI (Order 1: Increment 2-7) เป็นการชะละลายโดยเกิดการละลายของ AI โดยในช่วงแรก (Order 6: Increment 1-4) เกิดการชะล้างที่ผิวหน้าของ AI ออกจากก้อนตัวอย่าง และในรูปที่ 4.53 แสดงปริมาณการชะละลายสะสมที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบเนื่องจากเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าและการชะละลายที่ออกมาอย่างมากจากการละลายของ AI เมื่อเวลาผ่านไปซึ่งมีความชันมากกว่า 0.5

ตารางที่ 4.7 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ AI

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	1.166	Dissolution	1.411	Dissolution	1.110	Dissolution	1.153	Dissolution
2	5 - 8	1.405	Dissolution	1.727	Dissolution	1.336	Dissolution	1.626	Dissolution
3	4 - 7	1.300	Dissolution	1.527	Dissolution	1.101	Dissolution	1.203	Dissolution
4	3 - 6	1.197	Dissolution	1.257	Dissolution	1.344	Dissolution	1.438	Dissolution
5	2 - 5	0.948	Dissolution	1.210	Dissolution	1.010	Dissolution	0.991	Dissolution
6	1 - 4	-0.124	Surface wash-off	-0.092	Surface wash-off	-0.011	Surface wash-off	-0.091	Surface wash-off

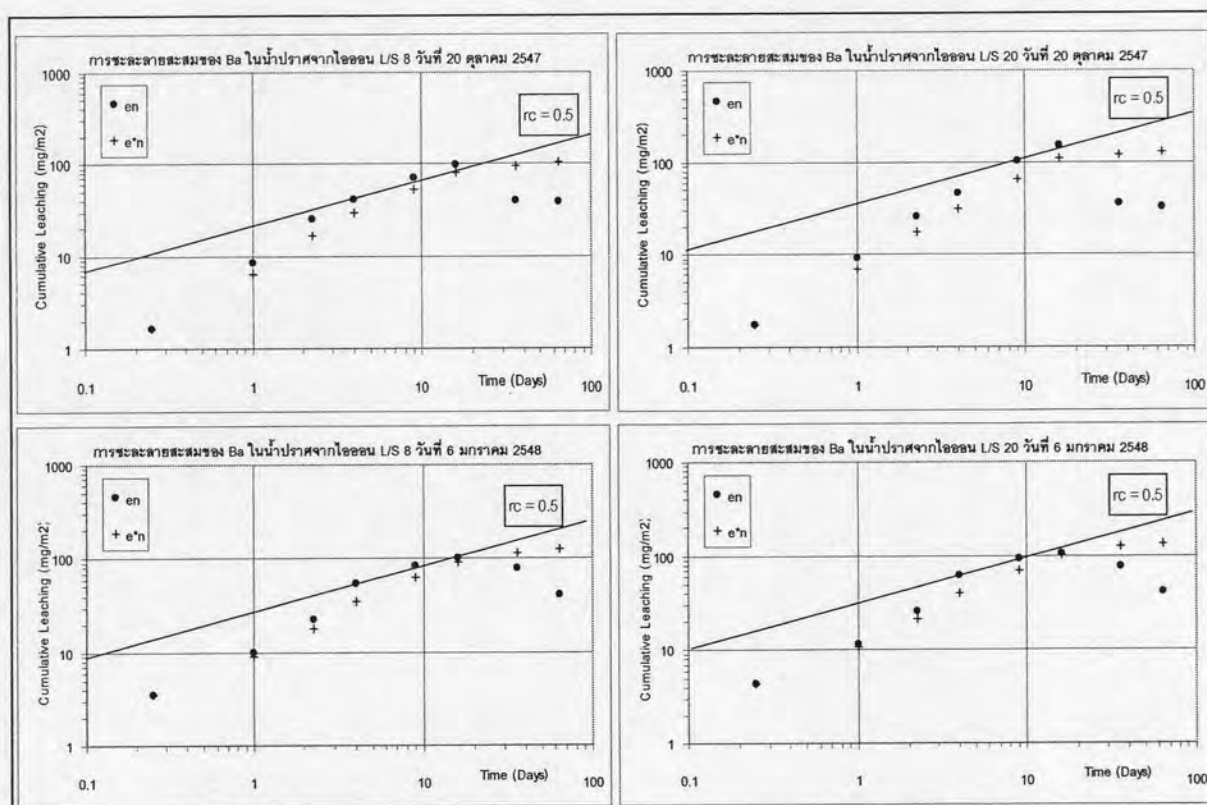


รูปที่ 4.53 การชะละลายสะสมของ AI ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

เช่นเดียวกับการพิจารณากลไกการชะละลายของ Al สำหรับการคำนวณกลไกการชะละลายของ Ba แสดงอยู่ในตารางที่ 4.8 และในรูปที่ 4.54 ซึ่งอธิบายได้ว่าการชะละลายของ Ba มีกลไกที่เกี่ยวข้องอยู่หลายกลไกคือ ช่วงแรกของการทดสอบเกิดการละลายหรืออาจเกิดการแพร่ที่ล่าช้า (Delayed diffusion or dissolution) ของ Ba เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการละลายของ Ba จากก้อนทดสอบ (Dissolution) และมีแนวโน้มการชะละลายลดลง (Depletion) (ไอออน Ba ในสารชะละลายลดลง) ในช่วงท้ายของการทดสอบ การชะละลายโดยรวม (Order 1: Increment 2-7) แสดงกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมน่าจะเกิดจากการเฉลี่ยของความชันมากกว่าที่จะเป็นกลไกการแพร่จริงๆ ซึ่งดูได้จากในรูปที่ 4.54

ตารางที่ 4.8 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Ba

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	0.501	Diffusion	0.516	Diffusion	0.617	Diffusion	0.571	Diffusion
2	5 - 8	-0.433	Depletion	-0.757	Depletion	-0.362	Depletion	-0.417	Depletion
3	4 - 7	0.029	Depletion	-0.053	Depletion	0.182	Depletion	0.108	Depletion
4	3 - 6	0.691	Dissolution	0.836	Dissolution	0.742	Dissolution	0.690	Dissolution
5	2 - 5	0.955	Dissolution	1.081	Dissolution	1.003	Dissolution	0.987	Dissolution
6	1 - 4	1.190	Delayed diffusion or dissolution	1.186	Delayed diffusion or dissolution	0.955	Delayed diffusion or dissolution	0.933	Delayed diffusion or dissolution

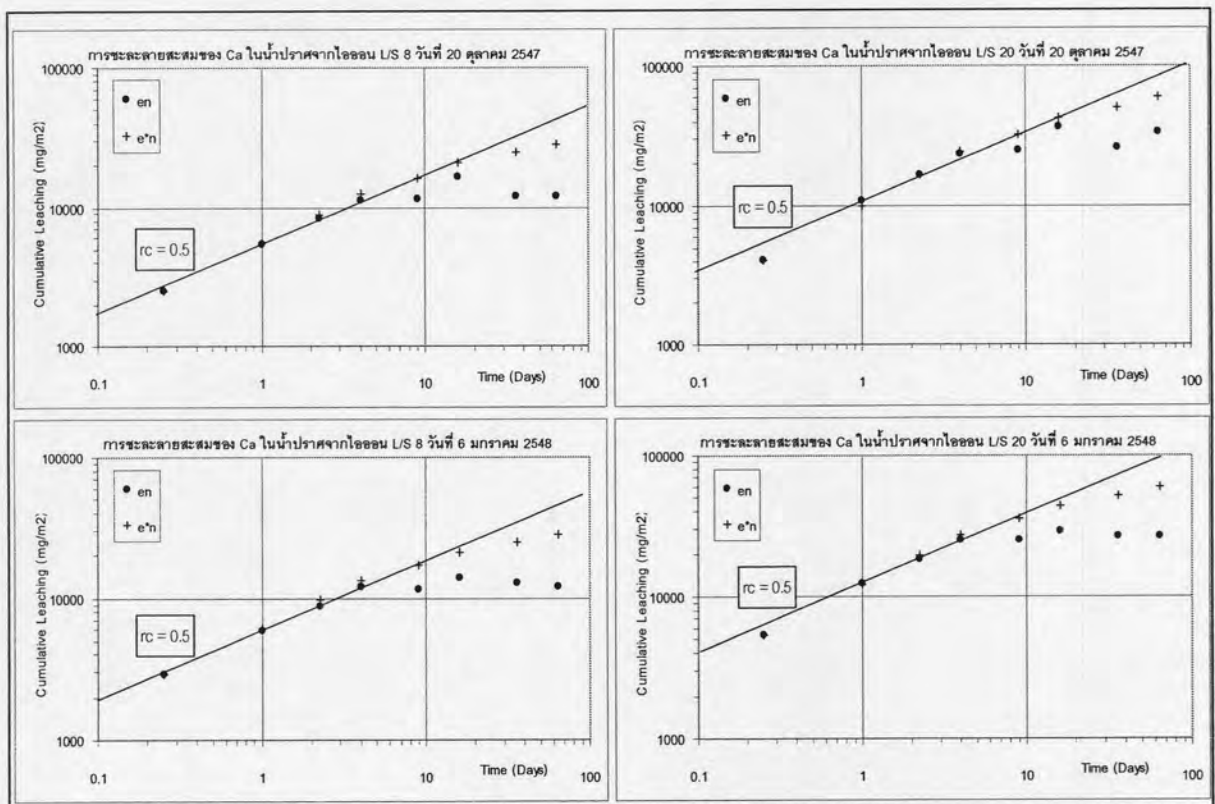


รูปที่ 4.54 การชะละลายสะสมของ Ba ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

กลไกการชะละลายของ Ca แสดงอยู่ในตารางที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Ca มีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลายใน 4 ช่วงแรกของการทดสอบและมีปริมาณไฮดรอกไซด์ของ Ca ในสารชะละลายลดลงในช่วงทำการทดสอบ เช่นเดียวกับ Ba คือการชะละลายโดยรวมของ Ca นั้นเกิดจากการเฉลี่ยค่าความเข้มข้นมากกว่าการเกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้า ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.55

ตารางที่ 4.9 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Ca

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	0.243	Surface wash-off	0.272	Surface wash-off	0.210	Surface wash-off	0.211	Surface wash-off
2	5 - 8	-0.040	Depletion	0.064	Depletion	0.004	Depletion	0.011	Depletion
3	4 - 7	0.072	Depletion	0.084	Depletion	0.049	Depletion	0.046	Depletion
4	3 - 6	0.302	Depletion	0.339	Depletion	0.194	Depletion	0.196	Depletion
5	2 - 5	0.350	Diffusion	0.399	Diffusion	0.319	Depletion	0.337	Depletion
6	1 - 4	0.541	Diffusion	0.628	Diffusion	0.510	Diffusion	0.554	Diffusion

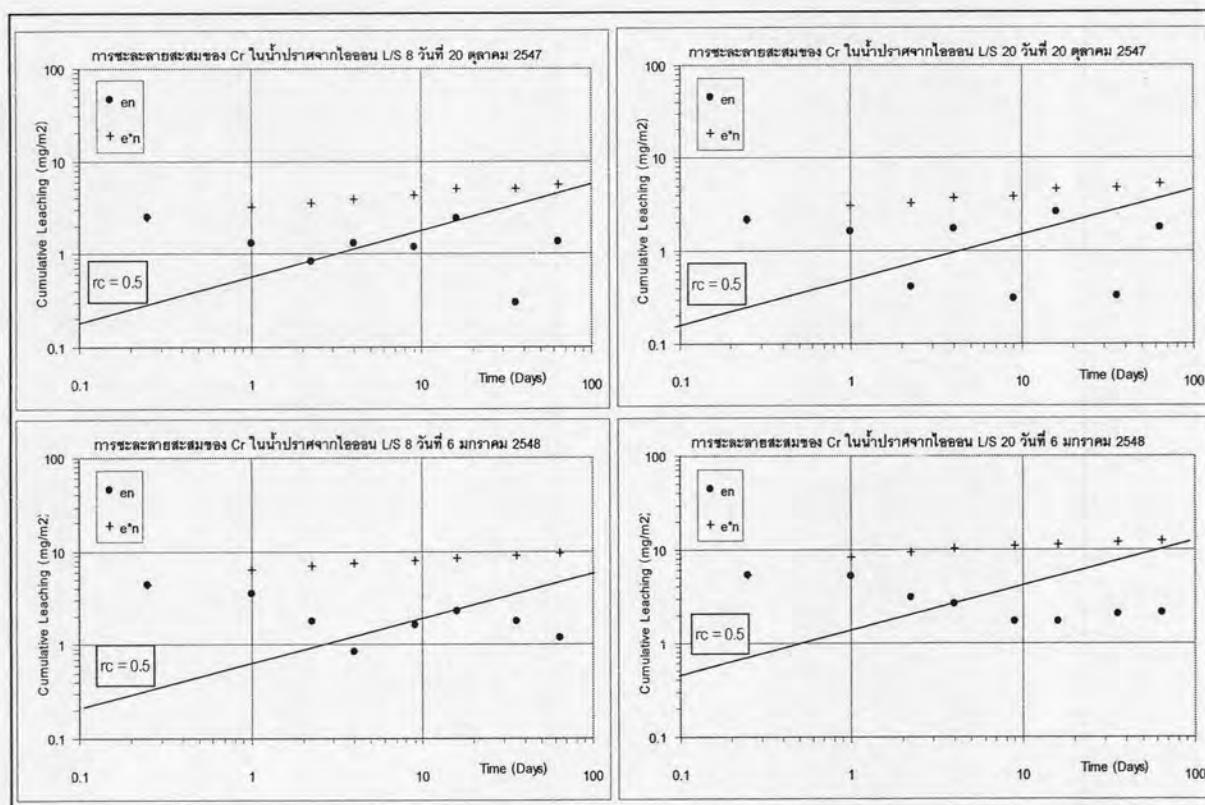


รูปที่ 4.55 การชะละลายสะสมของ Ca ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

การชะละลายของ Cr แสดงการชะล้างที่ผิวหน้าอย่างชัดเจนในช่วงแรกของการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.10 และในรูปที่ 4.56 โดยตัวอย่างวันที่ 6 มกราคม 2548 จะแสดงผลที่ชัดเจนกว่า คือเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในระยะแรกและเกิดการหมดไปของ Cr สารชะละลายในช่วงทำการทดสอบ สำหรับการชะละลายของ Mn ซึ่งกล่าวไว้ในข้างต้น (เรื่องการชะละลายโดยทั่วไปหัวข้อ 4.2.1) ว่าการชะละลายของ Mn ในแต่ละตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีความแตกต่างกัน สำหรับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 20 ตุลาคม 2547 ซึ่งมีการชะละลายของ Mn ออกมาในปริมาณน้อยที่ L/S 8 แสดงกลไกการชะละลายช่วงแรกเป็นการละลายที่ล่าช้า ตามมาด้วยการละลายและมี

ตารางที่ 4.10 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Cr

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	-0.188	Surface wash-off	-0.197	Surface wash-off	-0.083	Surface wash-off	-0.285	Surface wash-off
2	5 - 8	-0.321	Depletion	0.384	Diffusion	-0.181	Depletion	0.120	Depletion
3	4 - 7	-0.536	Depletion	-0.467	Depletion	0.353	Diffusion	-0.120	Depletion
4	3 - 6	0.445	Diffusion	0.498	Diffusion	0.229	Depletion	-0.341	Depletion
5	2 - 5	-0.001	Depletion	-0.543	Depletion	-0.415	Depletion	-0.491	Depletion
6	1 - 4	-0.297	Surface wash-off	-0.281	Surface wash-off	-0.570	Surface wash-off	-0.268	Surface wash-off

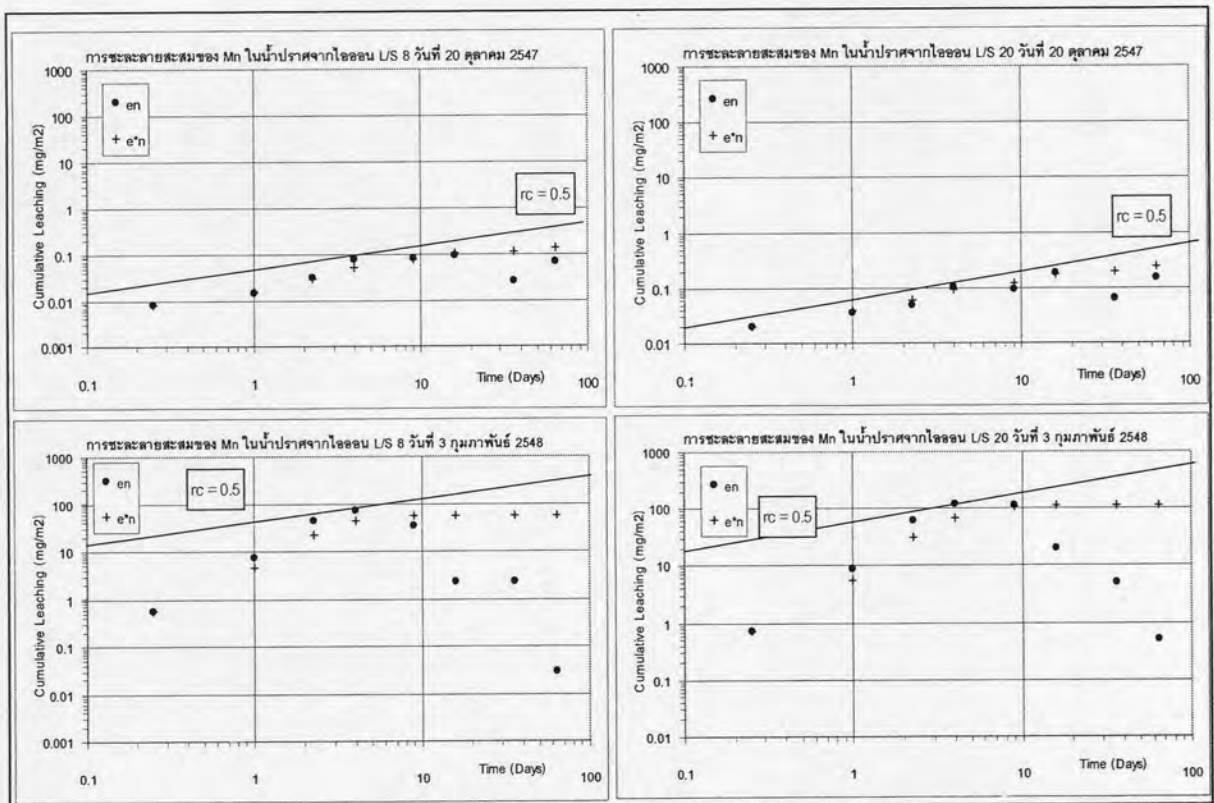


รูปที่ 4.56 การชะละลายสะสมของ Cr ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน rc = 0.5

กลไกการแพร่ร่วมด้วย ก่อนจะเกิดการหมดไปของ Mn ในสารชะละลาย สำหรับ L/S 20 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นถึงการแพร่ตั้งแต่การทดสอบช่วงแรกและเกิดการหมดไปของ Mn ในช่วงท้าย เช่นเดียวกับที่ L/S 8 และ ตัวอย่างวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งแสดงการชะละลายที่มากกว่า กลไกการชะละลายของ L/S ทั้ง 2 ค่าให้ผลที่เหมือนกันคือ เกิดการละลายที่ล่าช้าในช่วงแรก ตามมาด้วยการละลายในช่วงต่อมา จนเมื่อถึงช่วงท้ายของการทดสอบปริมาณ Mn ในสารชะละลายลดน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.57

ตารางที่ 4.11 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Mn

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				3 กุมภาพันธ์ 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	0.241	Surface wash-off	0.265	Surface wash-off	-0.608	Surface wash-off	-0.250	Surface wash-off
2	5 - 8	-0.307	Depletion	0.019	Depletion	-3.084	Depletion	-2.591	Depletion
3	4 - 7	-0.449	Depletion	-0.130	Depletion	-1.766	Depletion	-1.540	Depletion
4	3 - 6	0.473	Diffusion	0.565	Diffusion	-1.411	Depletion	-0.513	Depletion
5	2 - 5	0.826	Dissolution	0.492	Diffusion	0.705	Dissolution	1.148	Dissolution
6	1 - 4	0.787	Delayed diffusion or dissolution	0.552	Diffusion	1.808	Delayed diffusion or dissolution	1.895	Delayed diffusion or dissolution

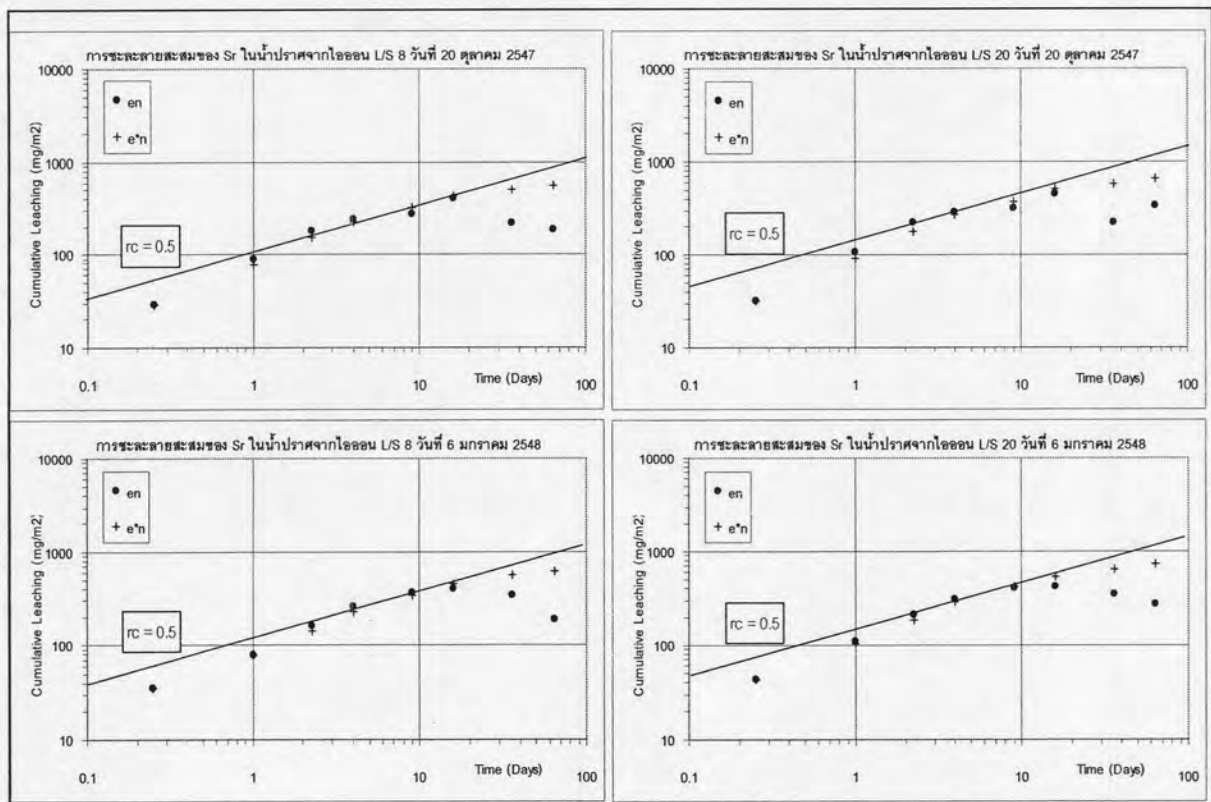


รูปที่ 4.57 การชะละลายสะสมของ Mn ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

ค่า rc ที่ระบุกลไกการชะละลายของ Sr แสดงอยู่ในตารางที่ 4.12 ซึ่งกลไกที่ควบคุมการชะละลายของ Sr ประกอบไปด้วยช่วงแรกเป็นการชะละลายชนิดเกิดการแพร่แบบล่าช้า ช่วงต่อมาแสดงกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลายและเกิดการหมดไปของ Sr ในสารชะละลายในช่วงท้ายของการทดสอบ โดยรูปที่ 4.58 แสดงกลไกที่ชัดเจนของ Sr เมื่อเทียบกับเส้น $rc = 0.5$

ตารางที่ 4.12 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Sr

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	0.278	Surface wash-off	0.236	Surface wash-off	0.424	Diffusion	0.330	Surface wash-off
2	5 - 8	-0.275	Depletion	-0.108	Depletion	-0.313	Depletion	-0.211	Depletion
3	4 - 7	-0.003	Depletion	-0.068	Depletion	0.133	Depletion	0.063	Depletion
4	3 - 6	0.371	Diffusion	0.313	Depletion	0.459	Diffusion	0.359	Diffusion
5	2 - 5	0.505	Diffusion	0.490	Diffusion	0.700	Dissolution	0.594	Diffusion
6	1 - 4	0.781	Delayed diffusion or dissolution	0.819	Delayed diffusion or dissolution	0.719	Delayed diffusion or dissolution	0.715	Delayed diffusion or dissolution

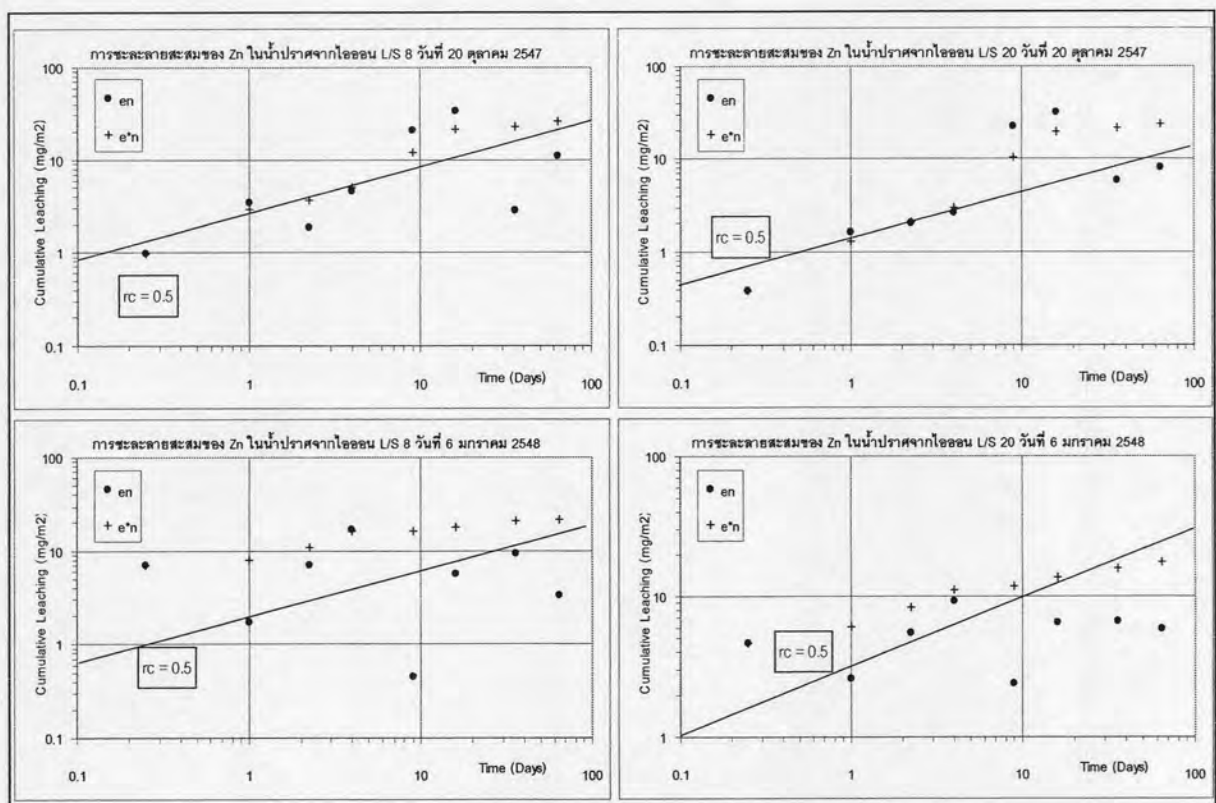


รูปที่ 4.58 การชะละลายสะสมของ Sr ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

กลไกการชะละลายของ Zn จากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทั้ง 2 วันมีความแตกต่างกัน โดยตัวอย่างวันที่ 20 ตุลาคม 2547 แสดงการแพร่ในช่วงเริ่มต้นก่อนเกิดการละลายและปริมาณของ Zn ในสารชะละลายลดลงในตอนท้ายของการทดสอบ ซึ่งต่างจากตัวอย่างวันที่ 6 มกราคม 2548 ที่ในช่วงแรกการทดสอบเกิดการชะล้างที่ผิวหน้า ก่อนปริมาณของ Zn ละสมในสารชะละลายจะลดลงไปแล้วจึงเกิดการชะละลายออกมาอีกในตอนท้ายของการทดสอบ ซึ่งแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.13 และ รูปที่ 4.59

ตารางที่ 4.13 ค่า rc และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Zn

Order	Increment	20 ตุลาคม 2547				6 มกราคม 2548			
		rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก	rc L/S 8	กลไก	rc L/S 20	กลไก
1	2 - 7	0.363	Diffusion	0.671	Dissolution	0.153	Surface wash-off	0.150	Surface wash-off
2	5 - 8	-0.724	Depletion	-0.765	Depletion	0.962	Dissolution	0.386	Diffusion
3	4 - 7	-0.142	Depletion	0.369	Diffusion	0.027	Depletion	-0.033	Depletion
4	3 - 6	1.544	Dissolution	1.412	Dissolution	-0.753	Depletion	-0.167	Depletion
5	2 - 5	0.868	Dissolution	1.146	Dissolution	-0.477	Depletion	0.028	Depletion
6	1 - 4	0.451	Diffusion	0.691	Delayed diffusion or dissolution	0.305	Surface wash-off	0.240	Surface wash-off



รูปที่ 4.59 การชะละลายสะสมของ Zn ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$

4.3 ผลการศึกษาซีเมนต์เพสต์ภายหลังการทดสอบการชะละลาย

4.3.1 ผลตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก

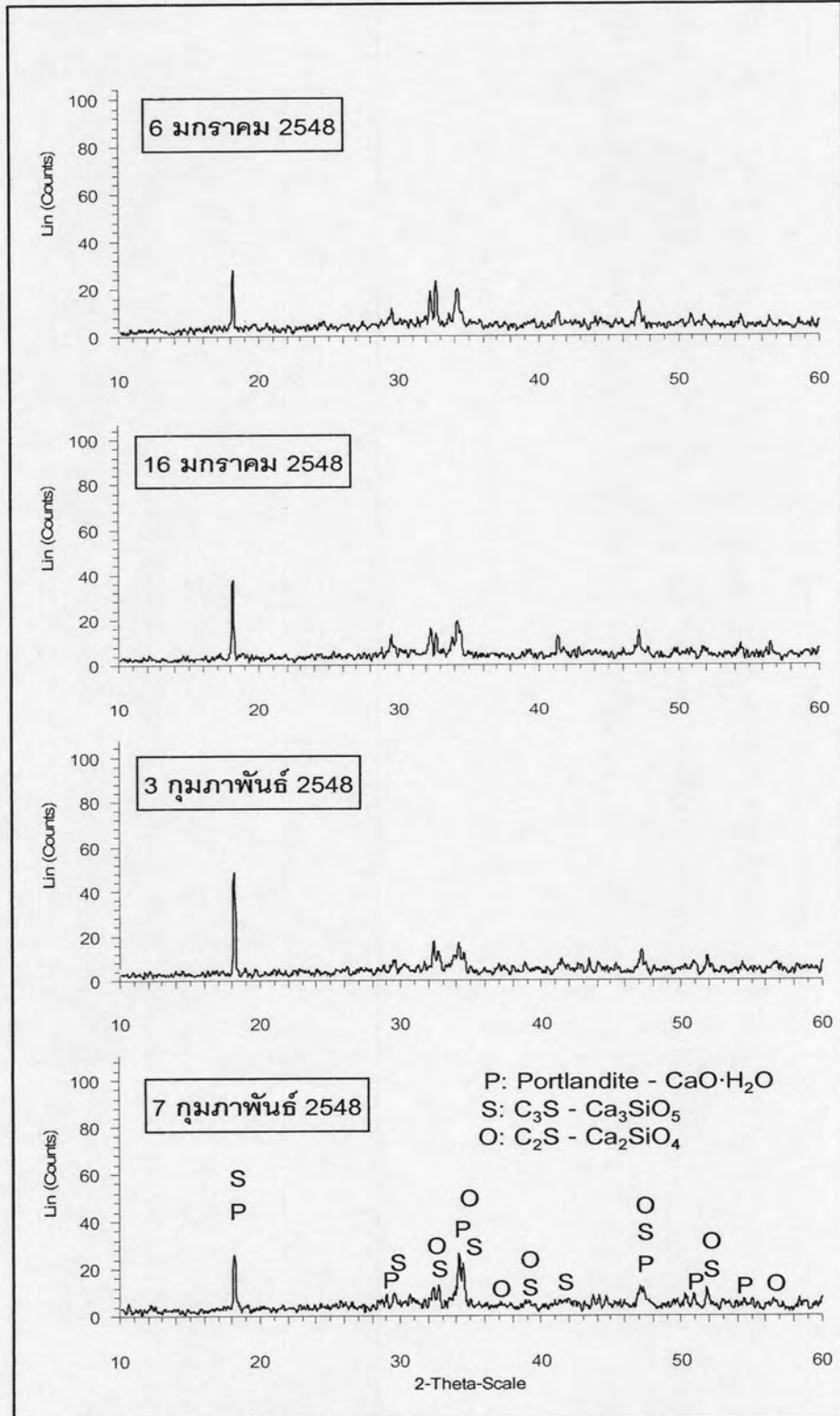
จากการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 วัน (ก่อนการทดสอบการชะละลาย) และตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ภายหลังผ่านการทดสอบการชะละลาย มาตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก (Mineralogical Composition) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และ Relative Intensity เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่อยู่ในรูปผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่อาจเกิดขึ้นด้วยการนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้ โดยผลการทดลองทั้งหมด แสดงในรูปที่ ง.1 ถึงรูปที่ ง.36 (ภาคผนวก ง.)

จากการวิเคราะห์โดย XRD ในรูปที่ 4.60 สารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ก่อนการทดสอบการชะละลายอยู่ในรูปผลึก (Crystalline Phase) เห็นได้จากกราฟที่มี Peak สูงเด่นชัด ได้แก่ ไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต มีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 29.48° และ 34.29° ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 18.12° 34.16° 47.20° และ 50.84° และ งานวิจัยของ Shondeep, Sharkar และ Wheeler ในปี 2001 พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่า Diffraction Peak ที่ 18° ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นกัน นั้นไม่พบ Diffraction Peak เนื่องจากอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous Phase) (Stephan และ คณะ, 1998; Achternbosh และคณะ, 2003)

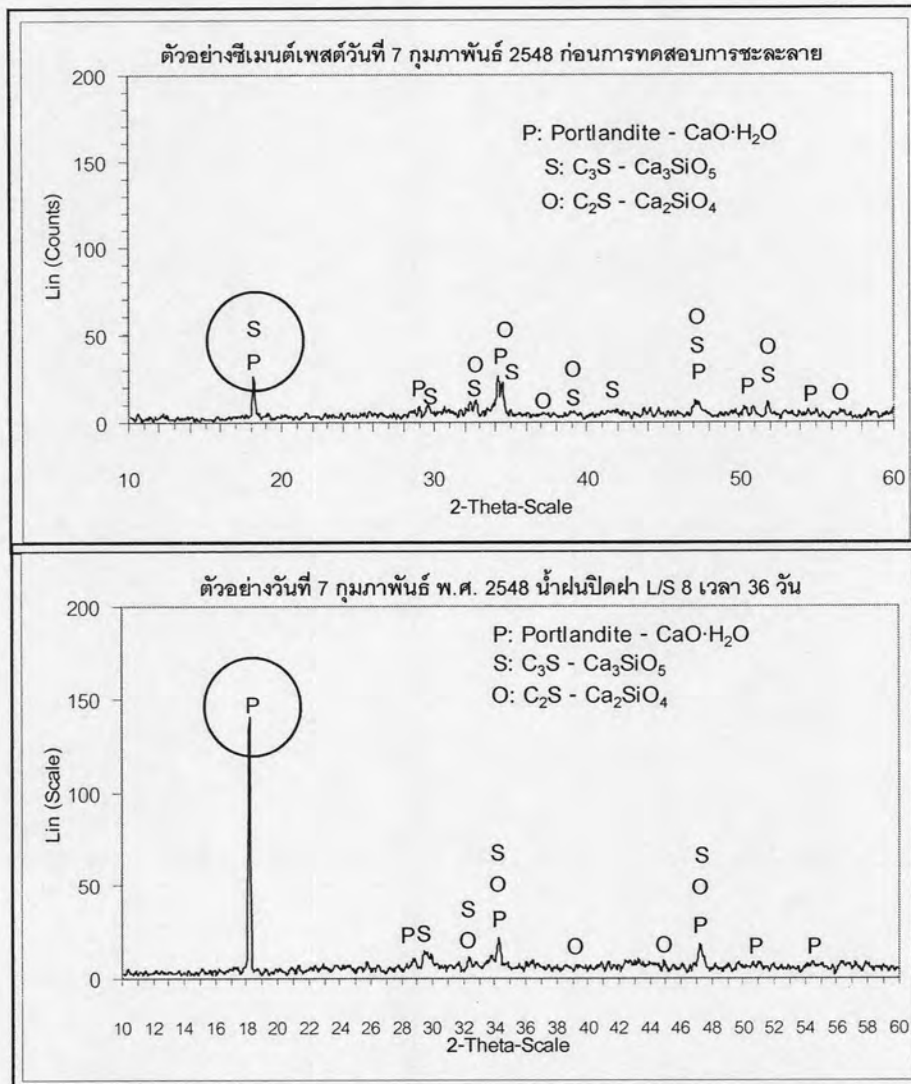
ภายหลังจากการทดสอบการชะละลายพบว่าปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ลดลง (Spence, 1993; Stephan และคณะ, 1998) เนื่องจาก C_3S และ C_2S เป็นสารตั้งต้นถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.61

จากผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นอีกว่าการทดสอบการชะละลายชนิดปิดฝา ของสารชะละลายทั้ง 3 ชนิดนั้น เกิดตะกอน $CaCO_3$ ขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของพีเอชที่มีค่าลดลง ในช่วงทำของการทดสอบเนื่องจากยังมีช่องอากาศเหลืออยู่ในหลอดทดสอบ รูปที่ 4.62 แสดง $CaCO_3$ ที่ปรากฏในซีเมนต์เพสต์ภายหลังการทดสอบจากสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด แต่กระนั้น ปริมาณของ $CaCO_3$ ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์จากสารชะละลายชนิดปิดฝายังเทียบไม่ได้กับใน ผนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาทดสอบดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.63 นอกจากนี้ สำหรับในสารชะละลาย

นั้นภายหลังจากทดสอบพบว่ามีการเกิดตะกอนเกิดขึ้นซึ่งเมื่อนำตะกอนเหล่านั้นไปตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD พบว่าเป็นตะกอนของหินปูน (CaCO_3) เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เฟสค์ แสดงผลอยู่ในรูปที่ 4.64

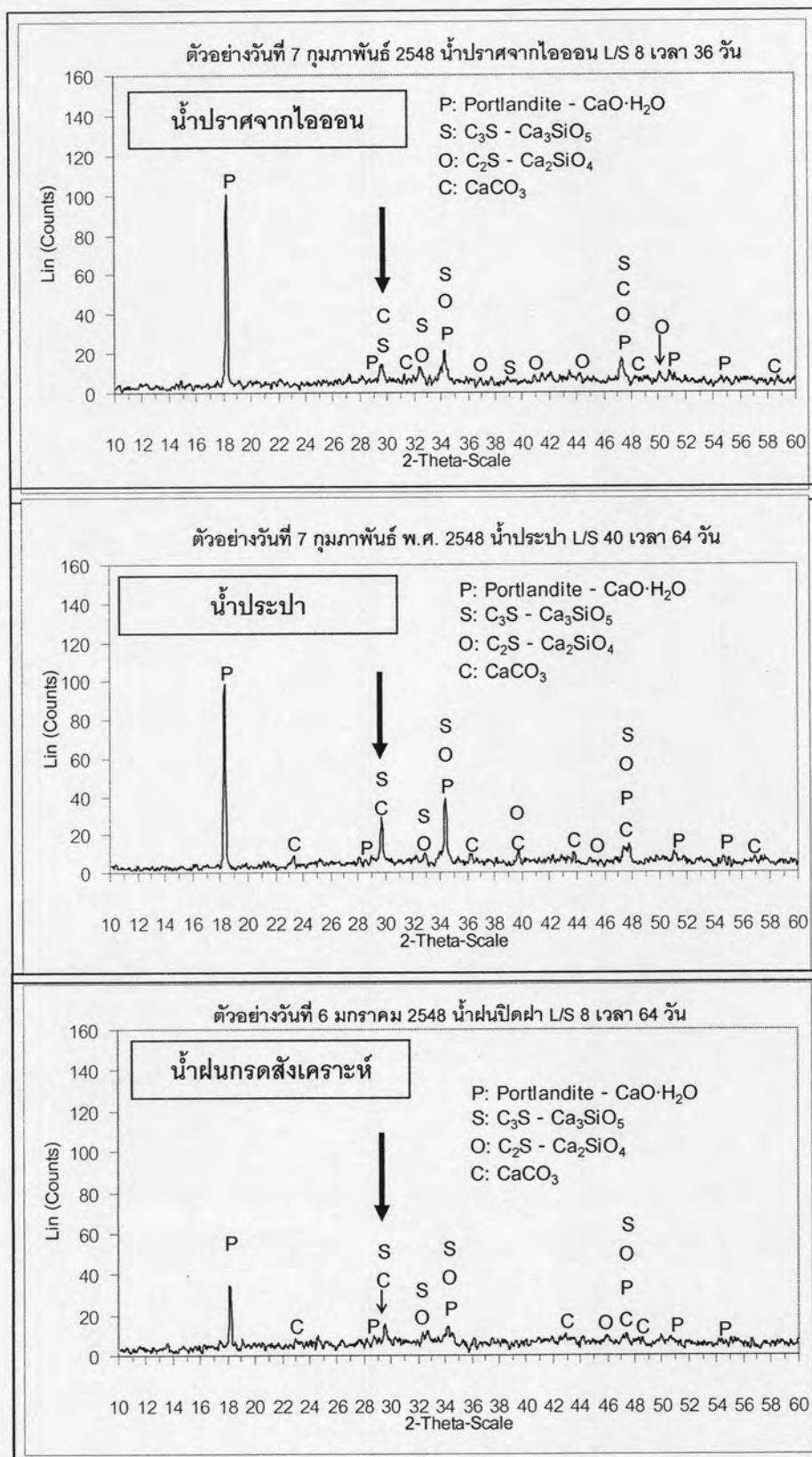


รูปที่ 4.60 ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เฟสค์วันต่างๆ ก่อนการชะละลาย

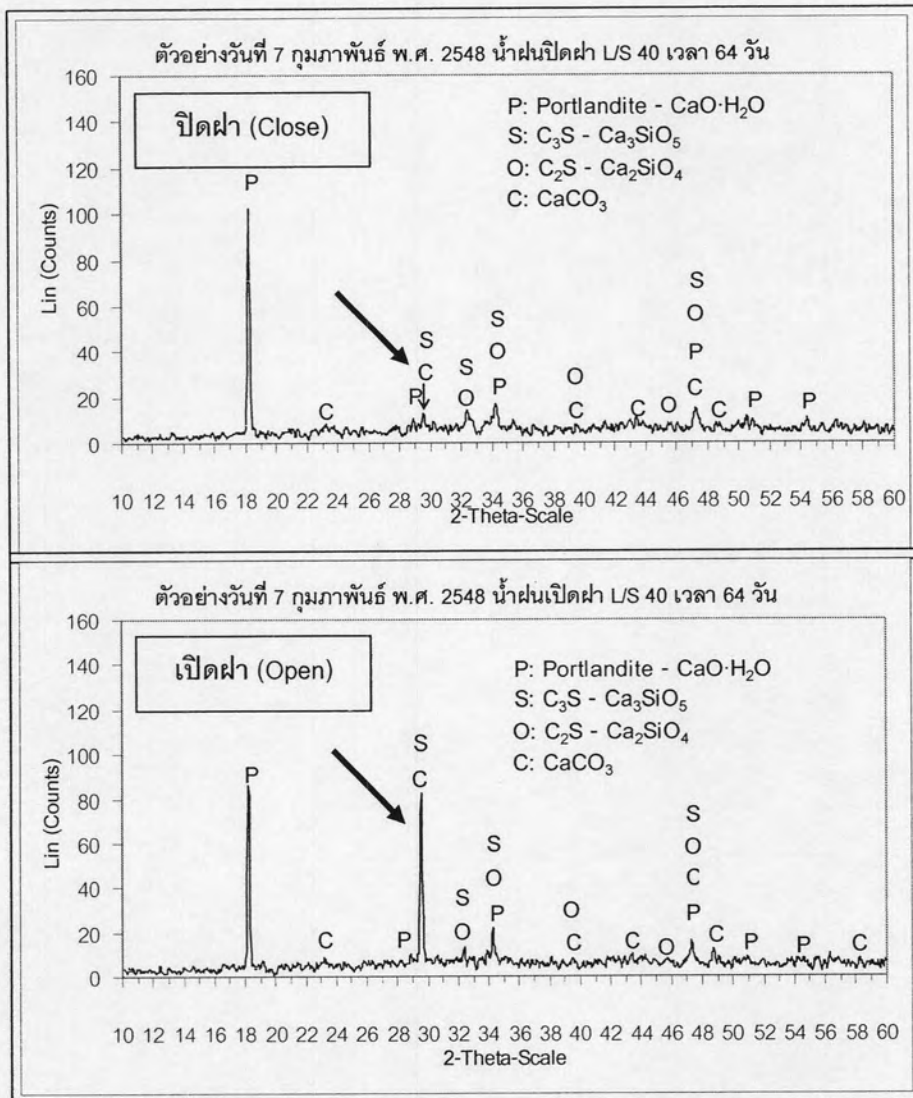


รูปที่ 4.61 ผล XRD เปรียบเทียบปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อน และ หลังการทดสอบการชะละลาย

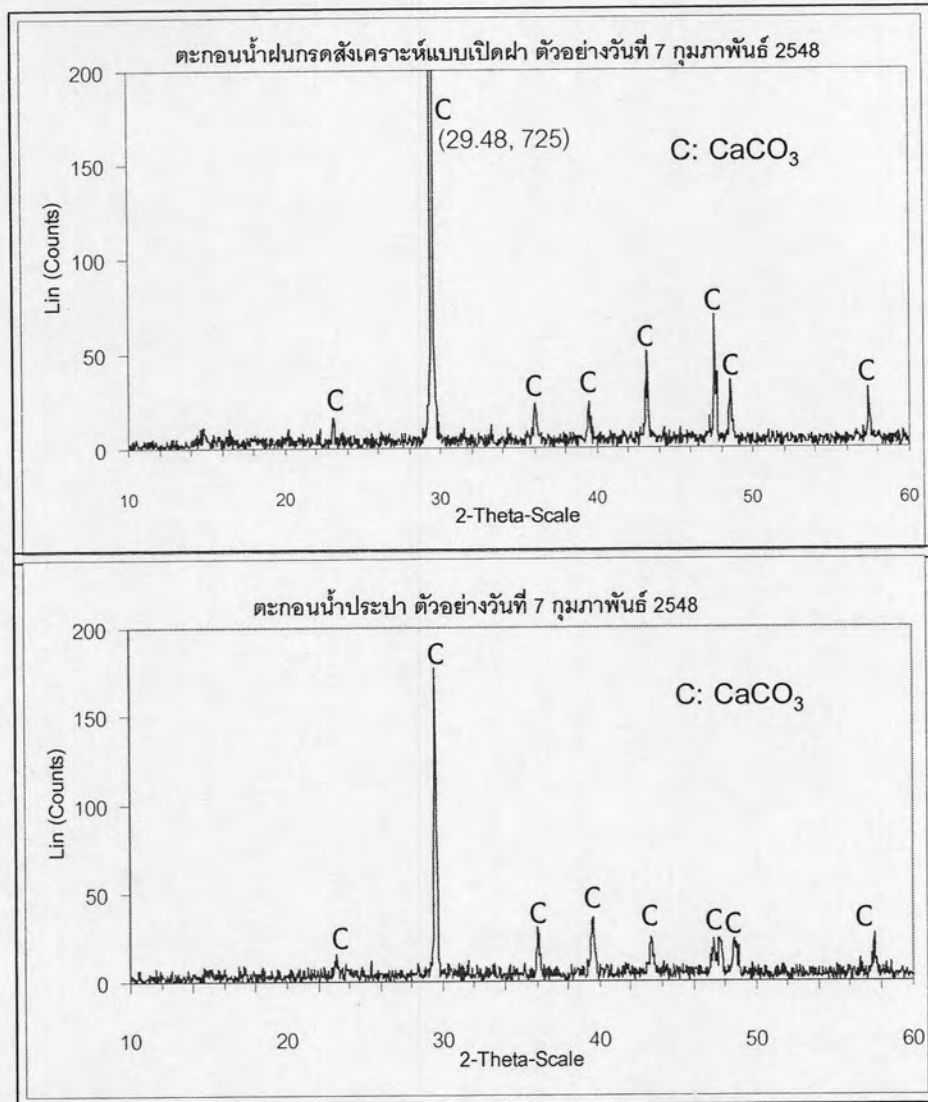
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD นั้น ยังไม่สามารถตรวจพบสารประกอบโลหะหนักที่ต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เวลาการทดสอบต่างๆ อาจเนื่องด้วยปริมาณความเข้มข้นที่มีเมื่อเทียบกับกับซีเมนต์นั้นมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้ peak ของซีเมนต์บดบัง peak ของสารประกอบโลหะหนักที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ในซีเมนต์เพสต์นั้นประกอบไปด้วยธาตุที่อยู่ร่วมกันมากมายหลายชนิดซึ่งเป็นการยากที่จะระบุว่าเป็นสารประกอบชนิดใดจากผล XRD ที่ได้หากไม่พบ peak ที่เด่นชัดของสารประกอบนั้น ๆ



รูปที่ 4.62 ผล XRD แสดง CaCO_3 ที่เกิดขึ้นในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ภายใต้การทดสอบ



รูปที่ 4.63 ผล XRD เปรียบเทียบปริมาณ CaCO_3 ของการทดสอบชนิดปิดฝาและเปิดฝา

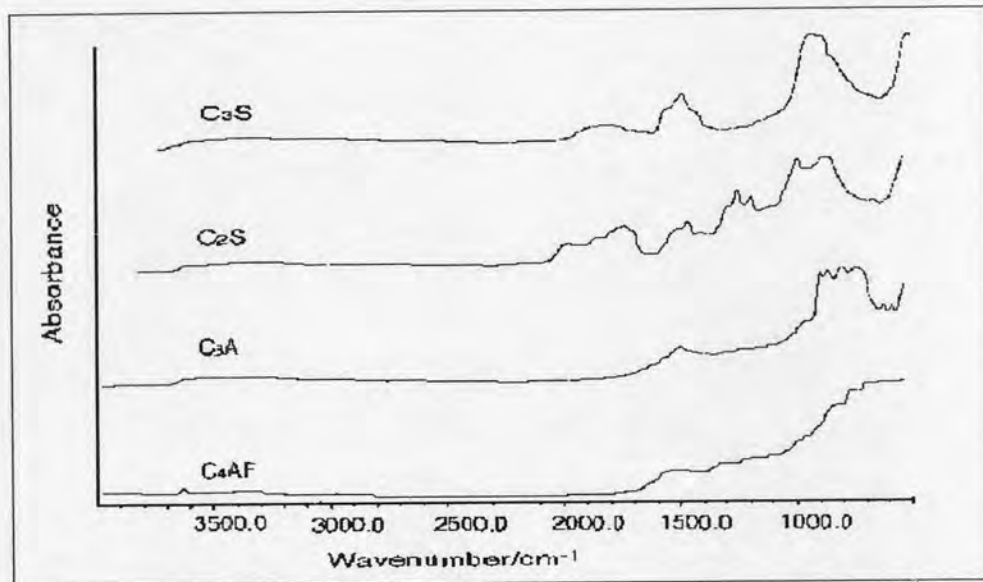


รูปที่ 4.64 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้นในสารชะละลายภายหลังการทดสอบ

สำหรับการชะละลายที่ลดลงของโลหะหนักในช่วงท้ายของการทดสอบซึ่งคาดว่าเกิดจากการเกิดคาร์บอนชั้นในระบบทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักไปพร้อมกับหินปูนซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วย XRD แต่จากการศึกษาพบว่าปริมาณหินปูนที่มีความเข้มข้นสูงอาจบดบัง peak ของสารประกอบโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยทำให้ตรวจวัดไม่พบโลหะหนักในตะกอนหินปูนจึงไม่สามารถสรุปสาเหตุของการที่โลหะหนักเกิดการชะละลายลดลงในช่วงหลังได้

4.3.2 ผลการตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนัก

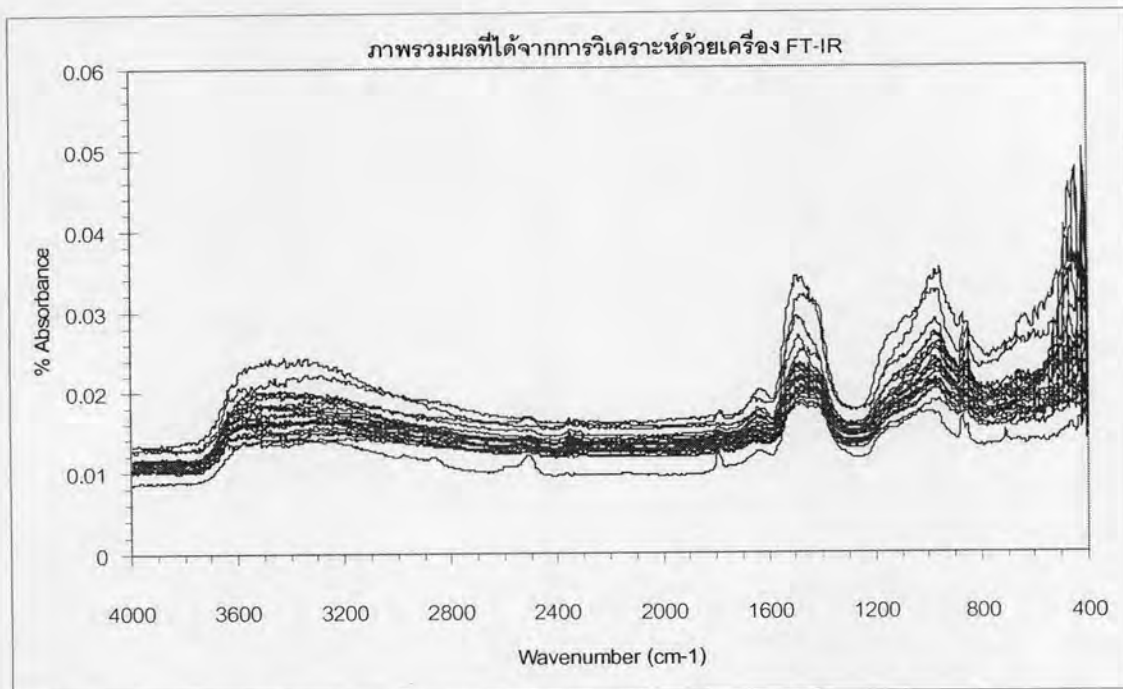
การศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนักโดยใช้รังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง FT-IR เป็นการตรวจวัดในเชิงคุณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้างปูนซีเมนต์ผลจากการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ภายหลังการทดสอบการชะละลายมาวิเคราะห์พันธะของสารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) สรุปรูปกราฟความถี่ที่วัดได้ แสดงดังรูปที่ 4.65 ถึงรูปที่ 4.72 โดยแกนนอน (x) คือค่าเลขคลื่น และแกนตั้ง (y) คือค่า Absorbance (%) ส่วนกราฟความถี่ที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่าง แสดงในรูปที่ ๑.2 ถึงรูปที่ ๑.28 (ภาคผนวก ๑.)



รูปที่ 4.65 รูปแบบสารประกอบของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR (Hughes และคณะ, 1995)

Hughes และคณะ (1995) ศึกษาารูปแบบสารประกอบของ C_3S และ C_2S จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของกราฟความถี่พันธะของสารประกอบในปูนซีเมนต์แต่กราฟรูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีลักษณะที่ต่างไปบ้าง ทั้งนี้เนื่องจาก C_3S C_2S C_3A และ C_4AF เป็นสารตั้งต้นและจะถูกใช้ไปเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่จากผลการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์

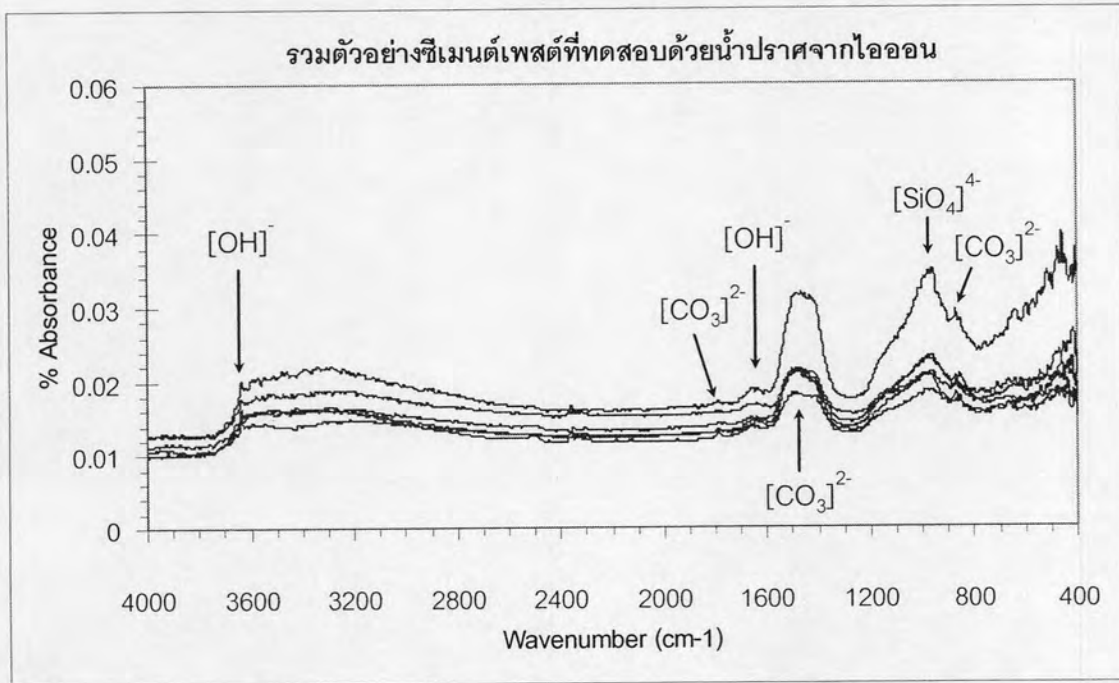
ในการศึกษาผลของโลหะหนักต่อพันธะของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ภายหลังการชะละลายที่เวลาต่างๆ นั้น เบื้องต้นจะทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันใดวันหนึ่ง (เลือกวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2548) ที่เวลา 64 วัน และ 36 วัน ของสารชะละลายชนิดต่างๆ เมื่อพบความแตกต่างที่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลของโลหะหนักต่อพันธะของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ได้จึงจะทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นด้วยเครื่อง FT-IR ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.66



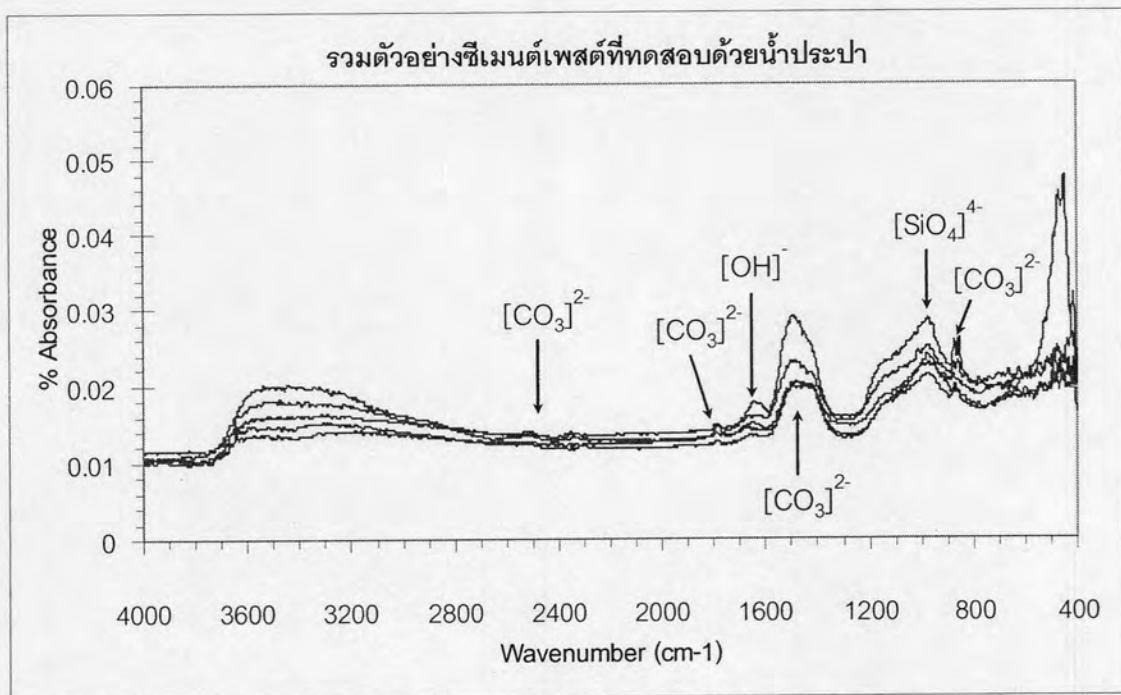
รูปที่ 4.66 ภาพรวมผลที่ได้จากการวิเคราะห์ซีเมนต์เพสต์ซึ่งผ่านการชะละลายด้วยเครื่อง FT-IR

สำหรับการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ครั้งนี้จะทดลองโดยการนำสาร Ca(OH)_2 และ Zn(OH)_2 มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของไฮดรอกซิล (OH^-) และสาร CaCO_3 และ Cu_2CO_3 มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และสาร $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ MgSO_4 มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบเลขคลื่นที่ได้กับข้อมูลของ Nakamoto (1986) Spence (1993) Hughes และคณะ (1995) และ Mollah และคณะ (2000) จะเห็นได้ว่า สารที่นำมาวิเคราะห์มีเลขคลื่นใกล้เคียงกับเอกสารที่อ้างอิง โดยแสดงในรูปที่ จ.1 และตารางที่ จ.1 (ภาคผนวก จ.) ทั้งนี้เนื่องจากเลขคลื่นที่อ้างอิงจากข้อมูลต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นการสังเคราะห์สารบริสุทธิ์ขึ้นมาวิจัย และทำการศึกษาแยกแต่ละพันธะ เพื่อหาเลขคลื่นของพันธะที่ชัดเจน แต่ในการวิจัยครั้งนี้ตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีหลายพันธะรวมอยู่ด้วยกัน อีกทั้งบางพันธะจะมีเลขคลื่นซ้อนทับกัน (Overlap) จึงสามารถบอกเพียงช่วงของเลขคลื่นที่เกิดขึ้น

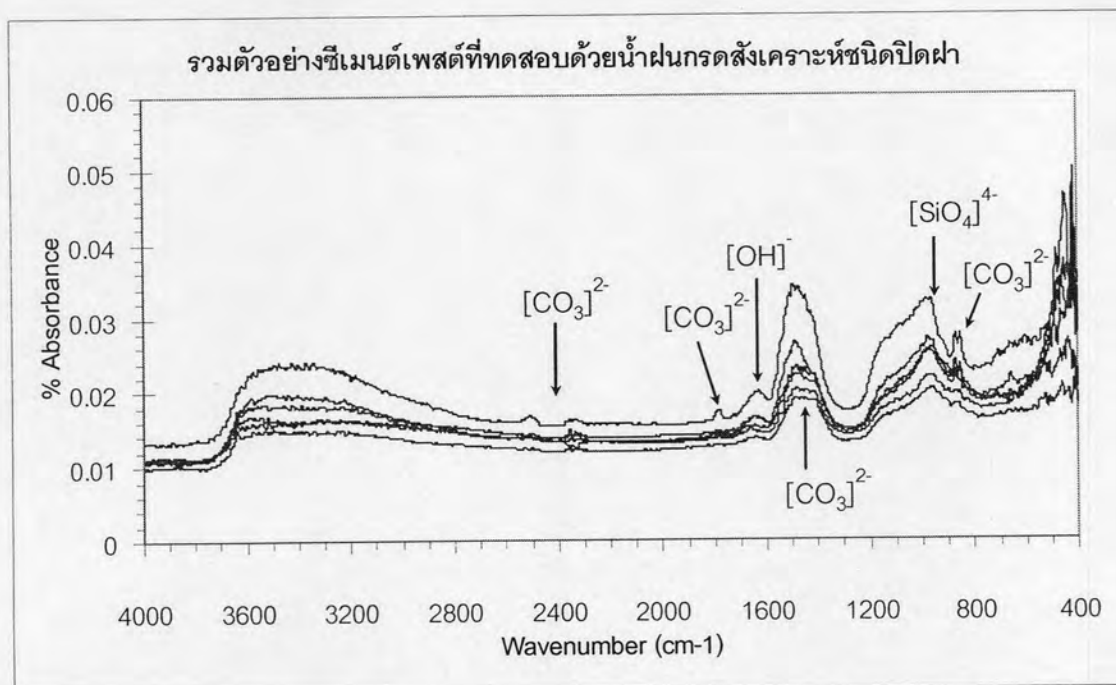
เมื่อเปรียบเทียบเลขคลื่นที่ได้จากการทดลองกับมาตรฐานพันธะของสารที่สร้างขึ้นร่วมกับข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงผลของพันธะของสารประกอบที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ดังรูปที่ 4.67-4.70 โดยแยกตามสารชะละลายซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากโดยในซีเมนต์เพสต์จะมีพันธะของ (CO_3^{2-}) ปะปนอยู่ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD และผลการชะละลายที่ได้ว่าเกิด CaCO_3 ขึ้นสำหรับพันธะ (OH^-) ที่พบนั้นอาจเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปของแข็งหรืออาจจะเป็น Ca(OH)_2 (portlandite) โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (ผลการทดสอบที่ได้ไม่พบโลหะหนักเนื่องจากมีความเข้มข้นน้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบหลักของซีเมนต์)



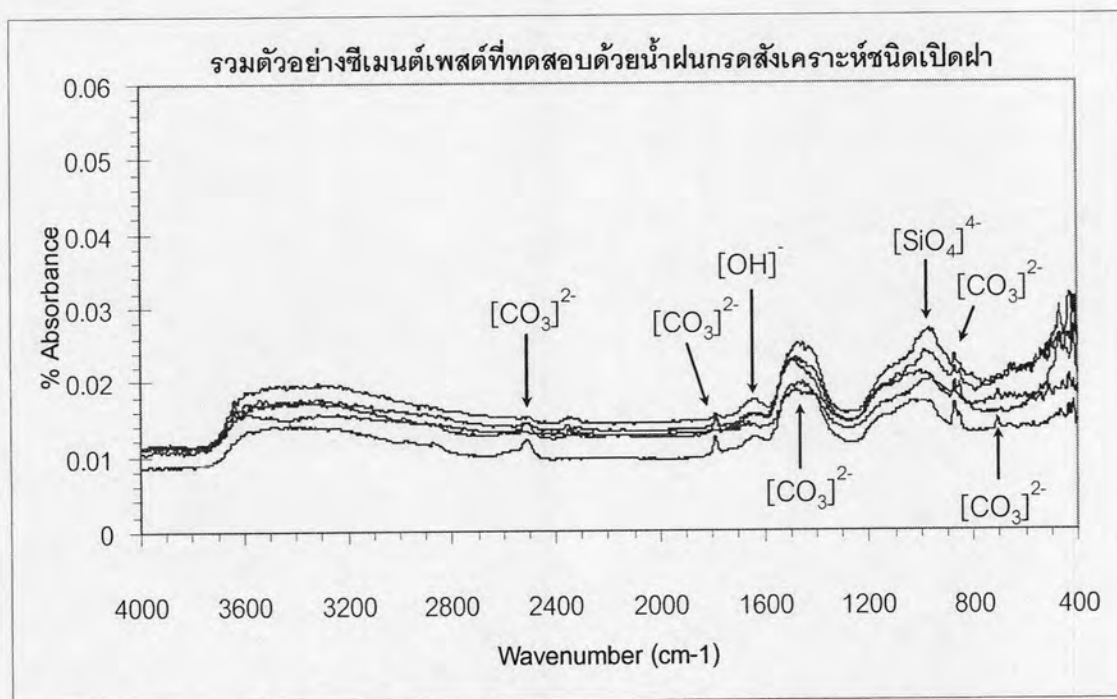
รูปที่ 4.67 ภาพรวมผลการวิเคราะห์สสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังจากทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4.68 ภาพรวมผลการวิเคราะห์สสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังจากทดสอบการชะละลายด้วยน้ำประปา

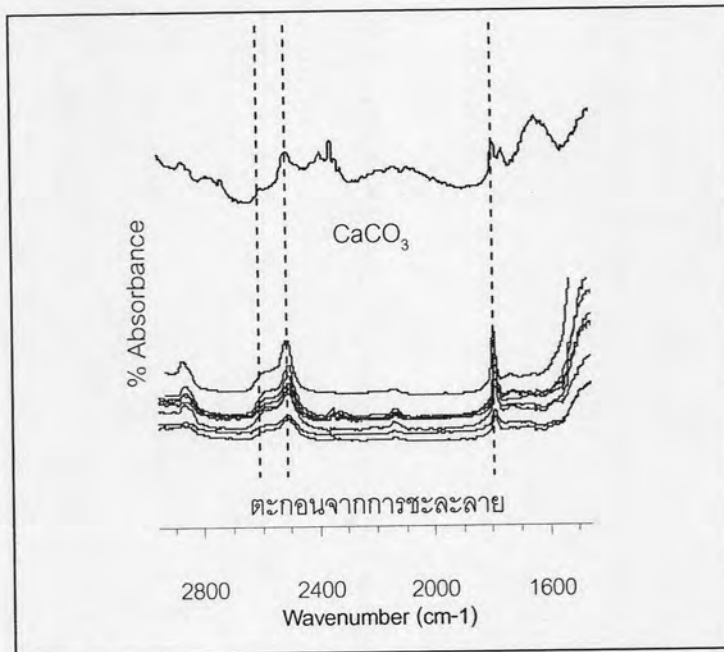


รูปที่ 4.69 ภาพรวมผลการวิเคราะห์สสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังจากทดสอบการชะละลายด้วยน้ำฝนสังเคราะห์ชนิดปิดฝา

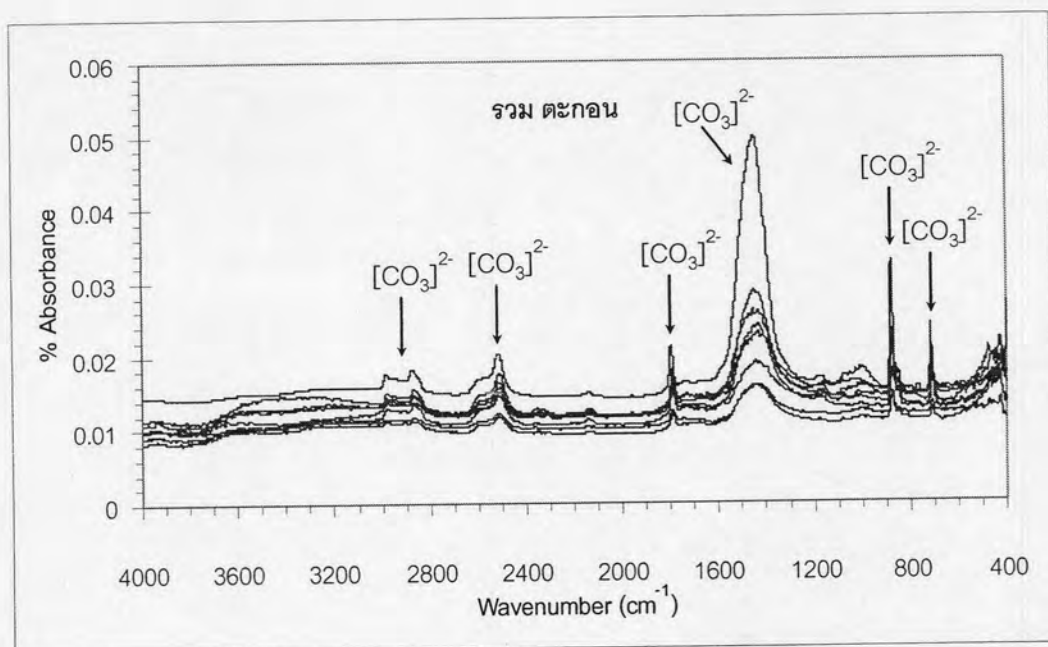


รูปที่ 4.70 ภาพรวมผลการวิเคราะห์สสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังจากทดสอบการชะละลายด้วยน้ำฝนสังเคราะห์ชนิดเปิดฝา

นอกจากนั้นในการทดสอบการชะละลายภายหลังเกิดตะกอนในสารชะละลายซึ่งศึกษาด้วย XRD พบว่าเป็นตะกอนหินปูน ผลที่ได้จากเครื่อง FT-IR สามารถยืนยันได้โดยอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงความถี่ของพันธะ $(\text{CO}_3)^{2-}$ ในตารางที่ ๑.1 (ภาคผนวก ๑.) และการเปรียบเทียบจากมาตรฐานพันธะของ $(\text{CO}_3)^{2-}$ ในรูปที่ 4.71 และรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.71 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบจากตะกอนที่เกิดจากการทดสอบการชะละลาย เทียบกับมาตรฐานพันธะของสาร CaCO_3 ด้วยเครื่อง FT-IR



รูปที่ 4.72 ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบของตะกอนที่เกิดขึ้นในสารชะละลายต่างๆ ภายหลังการทดสอบการชะละลาย