

การเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทรโดยใช้แคลเซินโดโลไมท์

นางสาวณัฐพร สุขพลอย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

RECOVERY OF MAGNESIUM HYDROXIDE FROM SALT FIELD BRINE USING  
CALCINED DOLOMITE

Miss Natthaporn Sookploy

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเก็บกลับคืนแมงกานีสไฮดรอกไซด์จากน้ำขม  
ของการผลิตเกลือสมุทรโดยใช้แคลเซินโดโลไมท์

โดย

นางสาวณัฐพร สุขพลอย

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวิตย์ วิวรรณะเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน)

ณัฐพร สุขพลอย : การเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทรโดยใช้แคลไซต์โดโลไมท์. (RECOVERY OF MAGNESIUM HYDROXIDE FROM SALT FIELD BRINE USING CALCINED DOLOMITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์, 92 หน้า.

ในประเทศไทยมีการผลิตเกลือสมุทรจากการระเหยของน้ำทะเลมาตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยกระบวนการผลิตดังกล่าวจะมีปริมาณน้ำที่ออกมาเป็นจำนวนมากต่อการผลิตหนึ่งครั้ง น้ำที่ดังกล่าวมีถูกเรียกว่า“น้ำขม”เนื่องจากมีปริมาณความเค็มสูงมากคือตั้งแต่ 35 ppt ขึ้นไป ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงองค์ประกอบของน้ำขมเหลือทิ้งเพื่อทำการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ โดยการใช้แร่โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน คือ 50, 100, 200 และ 325 เมช มาผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เพื่อทำการคัดเลือกขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีค่าการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎีมากที่สุด จากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำขมเหลือทิ้งเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ โดยพบว่าขนาดอนุภาคของโดโลไมท์ที่ 200 เมชหรือ 74 ไมครอน เหมาะสมที่สุดต่อการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแร่โดโลไมท์และจากการศึกษาถึงลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่า ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์กับแคลไซต์โดโลไมท์มีลักษณะของการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐุมภูมิ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ หรือที่เรียกว่า บรูไซต์ ส่วนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากตัวอย่างน้ำขมกับแคลไซต์โดโลไมท์จะมีลักษณะของการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐุมภูมิเช่นเดียวกันแต่โครงสร้างจะเป็นแผ่นบางสลับกับเส้นใยและอยู่กันอย่างหลวมๆ ภายในผลึกมีความเป็นรูพรุนสูง

ภาควิชา.....วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม.....

ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมทรัพยากรธรณี.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

## 5270753021 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : SALT FIELD / WASTE BRINE / BITTERN / CALCINED DOLOMITE /  
MAGNESIUM HYDROXIDE

NATTHAPORN SOOKPLOY : RECOVERY OF MAGNESIUM HYDROXIDE FROM  
SALT FIELD BRINE USING CALCINED DOLOMITE. ADVISOR: ASSOC.PROF.  
QUANCHAI LEEPOWPANTH, Ph.D.,92 pp.

Salt production from sea water in Thailand by solar evaporation ponds, produced waste brine or bitterns. This waste brine was analyzed by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The analysis showed the presence of sodium ( $\text{Na}^+$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sulphate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ) and chloride ( $\text{Cl}^-$ ) which magnesium chloride ( $\text{MgCl}_2$ ) is the major component. In various parts of the world, process technologies have been developed to recover these chemicals directly from salt field brine or from bitterns which is the waste or spent brine after harvesting of salt crystallized by solar evaporation of sea water. Magnesium hydroxide ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) is a valuable chemical produced from sea water and its bitterns through precipitation process. In this study, the recovery of magnesium hydroxide from salt field waste brine waste was investigated using calcined dolomite. The magnesium hydroxide precipitated was analyzed by X-ray fluorescence (XRF) and compared with magnesium hydroxide precipitation from the synthetic magnesium chloride. The effects of magnesium ion ( $\text{Mg}^{2+}$ ) concentration, solid-liquid ration and dolomite particle size on magnesium hydroxide precipitation rate were also determined at room temperature using calcined dolomite at  $950^\circ\text{C}$ .

Department :  Mining and Petroleum Engineering Student's Signature.....

Field of Study :  Georesources Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคุณสมบุรณ์ เจริญภูมิการกิจ และบุคลากรที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเพื่อข้อมูลและเครื่องมือในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณคุณพูนศักดิ์ นิลเกตรา เจ้าของบริษัท ส.รอยเจริญ ค่าเกลือ ที่เอื้อเพื่อข้อมูลและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำขมเพื่อมาใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบุคลากรและขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนกำลังใจทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่ น้อง และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่ได้สนับสนุนและช่วยเหลือตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....		จ
กิตติกรรมประกาศ.....		ฉ
สารบัญ.....		ช
สารบัญตาราง.....		ญ
สารบัญภาพ.....		ฎ
บทที่		
1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
	2.1 แหล่งผลิตเกลือสมุทรในประเทศไทย.....	4
	2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของจังหวัดสมุทรสาคร.....	6
	2.3 องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบในน้ำทะเล.....	6
	2.3.1 ความเค็ม.....	8
	2.3.2 วิธีการตรวจวัดความเค็ม .....	9
	2.4 การผลิตเกลือสมุทร.....	12
	2.4.1 การเตรียมพื้นที่.....	12
	2.4.2 การทำนาเกลือ.....	12
	2.4.1 ผลพลอยได้จากการผลิตเกลือสมุทร.....	13
	2.5 กระบวนการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมมาเกลือ.....	14
	โดยใช้แคลเซินโดโลไมท์.....	
	2.5.1 แร่โดโลไมท์.....	14
	2.5.2 แคลเซินโดโลไมท์.....	16

บทที่	หน้า	
2.5.4	กระบวนการเกิดตะกอนแมงกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	18
2.5.5	กระบวนการตกตะกอน.....	19
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1	สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.1.2	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2	เลือกพื้นที่เก็บตัวอย่าง.....	31
3.2.1	การเก็บตัวอย่างน้ำขม.....	33
3.2.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างน้ำขม.....	33
3.3	การเตรียมตัวอย่างแคลไซต์โดโลไมท์.....	34
3.3.1	การศึกษาขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัว.....	35
3.4	การตกตะกอนแมงกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากตัวอย่างน้ำขมโดยใช้.....	36
	แคลไซต์โดโลไมท์.....	
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	37
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำขม.....	37
4.2	ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัว.....	38
4.2.1	ผลการศึกษาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก.....	38
4.2.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแคลไซต์โดโลไมท์.....	39
4.3	ผลการวิเคราะห์ตะกอนแมงกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	40
4.3.1	ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของ.....	41
	แคลเซียมต่อแมงกนีเซียมในการเก็บกลับคืนตะกอนแมงกนีเซียม.....	
	ไฮดรอกไซด์.....	
4.3.2	ผลการศึกษาลักษณะของตะกอนแมงกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	42
5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1	อภิปรายสรุปผลการวิจัย.....	48
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	49
	รายการอ้างอิง.....	50



บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงกลุ่มธาตุที่มีปริมาณมากในน้ำทะเล .....	7
2.2	แสดงกลุ่มธาตุที่มีปริมาณน้อยในน้ำทะเล.....	8
2.3	แสดงลำดับการตกตะกอนของแร่ธาตุจากก่อนไปหลังในการระเหย..... ของน้ำทะเล 1 kg.....	13
2.4	แสดงองค์ประกอบในน้ำขม.....	17
4.1	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างไอออนในตัวอย่งน้ำขมที่ 1..... และตัวอย่งน้ำขมที่ 2.....	37
4.2	แสดงร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของโดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน.....	39
4.3	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบของโดโลไมท์และแคลไซต์..... โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาค 200 เมช.....	40
4.4	แสดงปริมาณตะกอนแมกนีเซียมและร้อยละของการเก็บกลับคืนแมกนีเซียม.... จากน้ำขมและแคลไซต์โดโลไมท์เปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียม..... คลอไรด์สังเคราะห์.....	41
4.5	แสดงปริมาณตะกอนแมกนีเซียมและร้อยละของการเก็บกลับคืนแมกนีเซียม.... จากน้ำขมเปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์.....	42

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงจังหวัดที่มีการผลิตเกลือสมุทรปริมาณมากในประเทศไทย.....	5
2.2	แสดงเครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer).....	10
2.3	แสดงเครื่องมือวัดความเค็มชนิดพกพา (Refractometer).....	11
2.4	แสดงขั้นตอนการผลิตเกลือสมุทร.....	12
2.5	แสดงรูปร่างผลึกของแร่โดโลไมท์.....	16
2.6	แสดงช่วงอุณหภูมิที่สลายตัวของ CO <sub>2</sub> ในโดโลไมท์ (DTA curve of Dolomite)..	17
3.1	แสดงพื้นที่นาปลงสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขมที่ 1.....	32
3.2	แสดงพื้นที่นาปลงสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขมที่ 2.....	32
3.3	แสดงขวดพลาสติกชนิดเพฟลอนหรือพลาสติกนาลีนชนิดโพลีโพรไพลีน.....	33
3.4	แสดงแร่โดโลไมท์ก่อนนำไปบด.....	34
3.5	แสดงแร่โดโลไมท์หลังจากนำไปบด.....	35
4.1	แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง..... X-ray Diffraction.....	37
4.2	แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา..... ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	45
4.3	แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา..... ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย..... 200 เท่า.....	45
4.4	แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา..... ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	46
4.5	แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา..... ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย..... 1,500 เท่า.....	46
4.6	แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา..... ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	47

ภาพที่	หน้า
4.7	47
แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา.....	
ระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย.....	
20,000 เท่า.....	

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในแต่ละปีประเทศไทยมีกำลังการผลิตเกลือประมาณ 990,000-1,100,000 ตันต่อปี (กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์, 2553) โดยคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 4-9 ตันต่อไร่ หรือ 2.5-6 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในการผลิตเกลือของประเทศไทย แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เกลือทะเลหรือเกลือสมุทรและเกลือหินหรือเกลือสินเธาว์ โดยแต่ละประเภทมีที่มาแตกต่างกัน คือ เกลือทะเลหรือเกลือสมุทร (Sea Salt) คือ เกลือที่ผลิตขึ้นโดยการนำน้ำทะเลขึ้นมาตากแดดให้น้ำระเหยไปเหลือแต่ผลึกเกลือตกอยู่ (Solar Evaporation System) เกลือประเภทนี้มีการผลิตและการใช้มาตั้งแต่สมัยโบราณและถือเป็นอาชีพเก่าแก่อาชีพหนึ่งของโลกและของคนไทย โดยได้มีการกำหนดเป็นสินค้าเกษตรกรรมขึ้นต้นตามพระราชบัญญัติธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร พ.ศ. 2509 ส่วนอีกประเภท คือ เกลือหินหรือเกลือสินเธาว์ (Rock Salt) คือ เกลือที่ผลิตขึ้นโดยใช้วิธีขุดน้ำลงไปละลายเกลือในบ่อเกลือหรือใช้วิธีสูบน้ำเกลือใต้ดินขึ้นมาตากแดดหรือโดยการต้มเพื่อให้ได้ตะกอนเกลือและหากใช้เครื่องจักรที่ทันสมัยสามารถผลิตได้ตลอดปี โดยเกลือสินเธาว์จะมีความแตกต่างกับเกลือทะเลในแง่ของการบริโภค คือ เกลือสินเธาว์ไม่มีสารไอโอดีนซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายและในปัจจุบันเกลือสินเธาว์ได้ถูกกำหนดเป็นสินค้าอุตสาหกรรมตามพระราชบัญญัติแร่ พ.ศ. 2510

เกลือเป็นสารเคมีชนิดหนึ่ง มีชื่อทางเคมีว่า “โซเดียมคลอไรด์” (NaCl) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว รสเค็ม เกลือเป็นแร่ธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์ โดยมนุษย์ควรจะต้องบริโภคเกลือประมาณวันละ 5-10 กรัม เพื่อนำไปช่วยรักษาสมดุลของน้ำในร่างกายให้เซลล์เนื้อเยื่อต่างๆ ทำงานอย่างปกติ นอกจากนี้เกลือยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้มากมาย เช่นปรุงอาหาร ถนอมอาหาร ผสมกับน้ำแข็งเพื่อเพิ่มความเย็น ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีต่างๆ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) หรือโซดาทำขนม โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{NaCO}_3$ ) หรือโซดาแอส โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟและไฮโดรคลอริก (HCl) หรือกรดเกลือ ใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น โรงงานฟอกหนัง โรงงานทำกระดาษ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมการผลิตเกลือจากน้ำทะเลหรือการผลิตเกลือสมุทร ซึ่งในแต่ละครั้งของกระบวนการผลิตเกลือนั้นจะเกิดน้ำขมออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งโดยปกติแล้วจะถูกจำหน่ายในราคาถูกเพื่อนำไป

จากเหตุผลและความสำคัญดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ในการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมการผลิตยาระบาย และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การกำจัดโลหะหนัก การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแยกสกัดและเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) จาก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สํารวจศึกษาข้อมูลการเกิดน้ำขมจากการทำนาเกลือสมุทรในประเทศไทย
- 1.3.2 เก็บตัวอย่างน้ำขมและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 1.3.3 เก็บตัวอย่างโดโลไมท์และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 1.3.4 ศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของโดโลไมท์และเวลาในการแคลไซน์ใน
- 1.3.5 ศึกษาการแยกสกัด  $Mg(OH)_2$  จากสารละลาย  $MgCl_2$  สังเคราะห์โดยใช้แคลไซน์
  - 1.3.5.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วน  $Ca^{++}$ (จากโดโลไมท์)/ $Mg^{++}$ (จากที่ความเข้มข้นของ  $MgCl_2$  ต่างๆ
  - 1.3.5.2 ศึกษาอัตราการแปรสภาพของ  $Mg^{++}$  ที่อัตราส่วน  $Ca^{++}/Mg^{++}$  ที่
- 1.3.6 ศึกษาการแยกสกัด  $Mg(OH)_2$  จากน้ำขมโดยใช้แคลไซน์โดโลไมท์ที่อัตราส่วน
  - 1.3.6.1 ศึกษาอัตราการแปรสภาพของ  $Mg^{++}$  ในน้ำขมที่อัตราส่วน
  - 1.3.6.2 ศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาคของตะกอน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถนำแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทรกลับมาใช้ประโยชน์ได้
- 1.4.2 สามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากน้ำขมซึ่งเป็นของเสียที่ไม่มีมูลค่าได้
- 1.4.3 ทราบพฤติกรรมการแยกสกัดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมนเกลือโดยใช้
- 1.4.4 เพื่อเปรียบเทียบรูปร่างลักษณะและปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่สกัดได้จาก Synthetic  $MgCl_2$  กับน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทร
- 1.4.5 พัฒนาระบวนการเก็บกักคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทรเพื่อให้สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แหล่งผลิตเกลือสมุทรในประเทศไทย

การผลิตเกลือสมุทรต้องใช้น้ำทะเลเป็นวัตถุดิบ ดังนั้นแหล่งผลิตจึงต้องอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล ถึงแม้ประเทศไทยจะมีชายฝั่งทะเลยาวถึง 2,600 กิโลเมตร แต่แหล่งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเกลือทะเลมีค่อนข้างจำกัด คือ ต้องมีลักษณะทางภูมิประเทศเป็นที่ราบ สภาพดินต้องเป็นดินเหนียว สามารถกักน้ำได้ดีป้องกันไม่ให้น้ำเค็มซึมลงไปได้ดิน ป้องกันไม่ให้น้ำจืดซึมขึ้นมาบนดินและมีกระแสลมกับแสงแดดช่วยในการตกผลึกเกลือ

แหล่งผลิตที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มที่มีการผลิตมาก ประมาณร้อยละ 90 ของผลผลิตทั้งประเทศ อยู่ที่ 3 จังหวัดภาคกลาง คือ จังหวัดเพชรบุรี สมุทรสาครและสมุทรสงคราม
2. กลุ่มที่มีการผลิตเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 10 ของผลผลิตทั้งประเทศ อยู่ที่ 4 จังหวัดในภาคกลางและภาคใต้ คือ จังหวัดชลบุรี จันทบุรี ฉะเชิงเทราและปัตตานี





ภาพที่ 2.1 แสดงจังหวัดที่มีการผลิตเกลือสมุทรปริมาณมากในประเทศไทย

ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยได้ใช้พื้นที่จังหวัดสมุทรสาครมาเป็นกรณีศึกษาเนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดสมุทรสาครเป็นพื้นที่ที่อยู่ติดกับชายฝั่งทะเลจึงทำให้เอื้ออำนวยต่อการผลิตเกลือสมุทรซึ่งถือได้ว่าเป็นแหล่งผลิตเกลือสมุทรปริมาณมากที่สุดในประเทศไทย

## 2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของจังหวัดสมุทรสาคร

จังหวัดสมุทรสาครเป็นจังหวัดชายทะเล ตั้งอยู่ริมฝั่งแม่น้ำท่าจีนในเขตพื้นที่ภาคกลาง ตอนล่างของประเทศไทยประมาณเส้นรุ้งที่ 130 องศาเหนือและเส้นแวงที่ 100 องศาตะวันออก มีพื้นที่ 872.347 ตารางกิโลเมตรหรือประมาณ 545,216 ไร่ มีอาณาเขตติดต่อ ดังนี้

ทิศเหนือ ติดต่อกับจังหวัดนครปฐม

ทิศใต้ ติดทะเลอ่าวไทย

ทิศตะวันออก ติดต่อกับกรุงเทพมหานคร

ทิศตะวันตก ติดต่อกับจังหวัดสมุทรสงครามและจังหวัดราชบุรี

จังหวัดสมุทรสาคร มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มชายฝั่งทะเล สูงจากระดับน้ำทะเล ประมาณ 1- 2 เมตร มีแม่น้ำท่าจีนไหลผ่านตอนกลางจังหวัด ไหลคดเคี้ยวตามแนวเหนือใต้ลงสู่อ่าวไทยที่อำเภอเมืองสมุทรสาคร ระยะทางยาวประมาณ 70 กิโลเมตร พื้นที่ตอนบนในเขตอำเภอบ้านแพ้วและอำเภอกะทู้มแบน มีความอุดมสมบูรณ์ของดินและมีโครงข่ายแม่น้ำลำคลองเชื่อมโยงถึงกันกระจายอยู่ทั่วพื้นที่กว่า 170 สาย จึงเหมาะที่จะทำการเพาะปลูกพืชนาชนิดและบางส่วนเป็นย่านธุรกิจอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัย พื้นที่ตอนล่างของจังหวัดในเขตอำเภอเมืองสมุทรสาครอยู่ติดชายฝั่งทะเลยาว 41.8 กิโลเมตร จึงเหมาะที่จะประกอบอาชีพประมงทะเลเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งและทำนาเกลือ

## 2.3 องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบในน้ำทะเล (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)

ทะเลเป็นแหล่งน้ำที่มีอยู่เป็นจำนวนถึง 97.2% ของแหล่งน้ำบนผิวโลก โดยประมาณ 96.5% ประกอบด้วยน้ำและ 3.5% ประกอบด้วยสารต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล น้ำทะเลมีคุณสมบัติเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolytic solution) ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายของเกลือแร่ต่าง ๆ สามารถจำแนกองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในน้ำทะเลได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. กลุ่มที่มีปริมาณมาก (major constituents) มีอยู่ 14 ชนิด เกลือของธาตุเหล่านี้เมื่อนำมารวมกันจะคิดเป็น 99.9% ของเกลือที่ละลายในทะเลทั้งหมด

2. กลุ่มที่มีปริมาณน้อย (minor constituents) ได้แก่ ธาตุที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1 ppm โดยน้ำหนัก แม้ว่าธาตุในกลุ่มนี้จะมีปริมาณน้อยในธรรมชาติจนไม่มีผลต่อการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำทะเล แต่ก็จัดว่ามีความสำคัญในขบวนการเกี่ยวกับอินทรีย์และ

ตารางที่ 2.1 แสดงกลุ่มธาตุที่มีปริมาณมากในน้ำทะเล

Constituent	Concentration (g/kg)	Percent by weight (%)
<b>Water Itself</b>		
Oxygen	857.800	85.80
Hydrogen	107.200	10.70
<b>The Most Abundant Ions</b>		
Chloride (Cl <sup>-</sup> )	18.980	1.90
Sodium (Na <sup>+</sup> )	10.556	1.10
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	2.649	0.30
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	1.272	0.10
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	0.400	0.04
Potassium (K <sup>+</sup> )	0.380	0.04
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.140	0.01
<b>Total</b>	<b>999.377</b>	<b>99.90</b>

ที่มา : Wilson T.R.S. (1975)

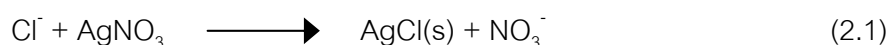
ตารางที่ 2.2 แสดงกลุ่มธาตุที่มีปริมาณน้อยในน้ำทะเล

Constituent	Concentration in ppm mg/kg (mg/L)	Concentration in ppm mg/1,000 kg
<b>Minor Elements</b>		
Bromine (Br)	65	
Strontium (Sr)	8	
Boron (B)	4	
Silicon (Si)	3	
Fluorine (F)	1	
<b>Important Trace Elements</b>		
Nitrogen (N)		300
Lithium (Li)		170
Phosphorus (P)		70
Constituent	Concentration in ppm mg/kg (mg/L)	Concentration in ppm mg/1,000 kg
Iron (Fe)		10
Aluminum (Al)		10
Manganese (Mn)		2
Lead (Pb)		0.04
Mercury (Hg)		0.03
Gold (Au)		0.000004

ที่มา : Wilson T.R.S. (1975)

### 2.3.1 ความเค็ม (Salinity)

ความเค็ม (Salinity) คือ ปริมาณโดยน้ำหนักของของแข็งละลายทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำทะเล เมื่อคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ถูกเปลี่ยนเป็นออกไซด์ ( $\text{O}^{2-}$ ), โบรไมด์ ( $\text{Br}^-$ ) และไอโอดีน ( $\text{I}^-$ ) ถูกเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) และสารอินทรีย์ทั้งหมดถูกออกซิไดซ์ มีหน่วยเป็นกรัมของเกลือต่อน้ำทะเล 1 กิโลกรัมหรือส่วนในพันส่วน (part per thousand, ppt) ความเค็มของน้ำทะเลจะมีค่าอยู่ในช่วง 30-36 ppt โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 34.7 ppt ในบางบริเวณอาจพบค่าที่สูงหรือต่ำกว่านี้



โดยคลอริด์ คือ ปริมาณทั้งหมดของคลอริด์ โบรมีนและไอโอดีน ในหน่วยกรัมในน้ำทะเล 1 กิโลกรัม โดยที่โบรมีนกับไอโอดีนถูกแทนที่ด้วยคลอริด์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค็ม (S‰) กับคลอริด์ ดังสมการที่ 2.3

$$\text{S‰} = 1.80655 \times \text{Cl‰} \quad (2.3)$$

โดย ‰ คือ part per thousand, ppt, per mil

### 2.3.2 วิธีการตรวจวัดความเค็ม (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)

การวัดความเค็มของน้ำมีหลายวิธี ดังนี้

#### 1. วัดความถ่วงจำเพาะ

การวัดความเค็มโดยใช้ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, SG) เป็นการเทียบน้ำหนักของน้ำที่จะวัดกับน้ำบริสุทธิ์ในปริมาณที่เท่ากัน ณ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตัวเลขที่แสดงออกมาเป็นตัวเลขสัดส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำทั้งสอง โดยกำหนดให้น้ำบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.000 น้ำทะเลมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.023 ถึง 1.027 ค่าความถ่วงจำเพาะจะขึ้นกับอุณหภูมิ ตามคุณสมบัติของน้ำที่มีปริมาตรเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

การวัดความถ่วงจำเพาะจะใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ซึ่งมีท่อนลอยและขีดแสดงค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งไฮโดรมิเตอร์แต่ละอันจะตั้งค่าความถ่วงจำเพาะไว้ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ปกติจะตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

วิธีการตรวจวัดสามารถทำได้ดังนี้

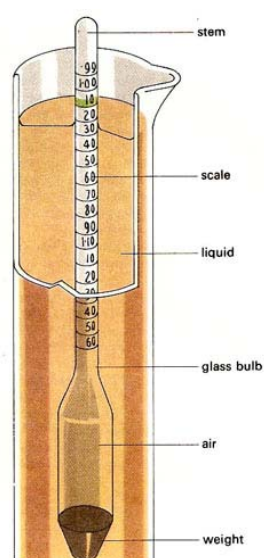
1.1 ล้างกระบอกตวงพลาสติกใสขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยน้ำตัวอย่าง อย่างน้อย 2 ครั้ง

1.2 เติมน้ำตัวอย่าง 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกระบอกตวง

1.3 วัดค่าอุณหภูมิของน้ำโดยให้กระเปาะของเทอร์มอมิเตอร์อยู่ที่ระดับผิวหน้าน้ำลงไปอีก 10 เซนติเมตร และบันทึกค่าที่ได้

1.4 หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในน้ำในกระบอกตวงอย่างช้า ๆ โดยต้องระวังมิให้ไฮโดรมิเตอร์สัมผัสกับผนังด้านในของกระบอกตวง รอให้ไฮโดรมิเตอร์ลอยอย่างอิสระจนกว่าจะหยุดนิ่งและอ่านค่าจากไฮโดรมิเตอร์ ณ จุดโค้งต่ำสุดของน้ำที่นั่นดังแสดงในภาพที่ 2.2 ค่าที่อ่านได้คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำและอ่านตัวเลขหลังจุดทศนิยม 3 ตำแหน่งเป็นอย่างน้อย

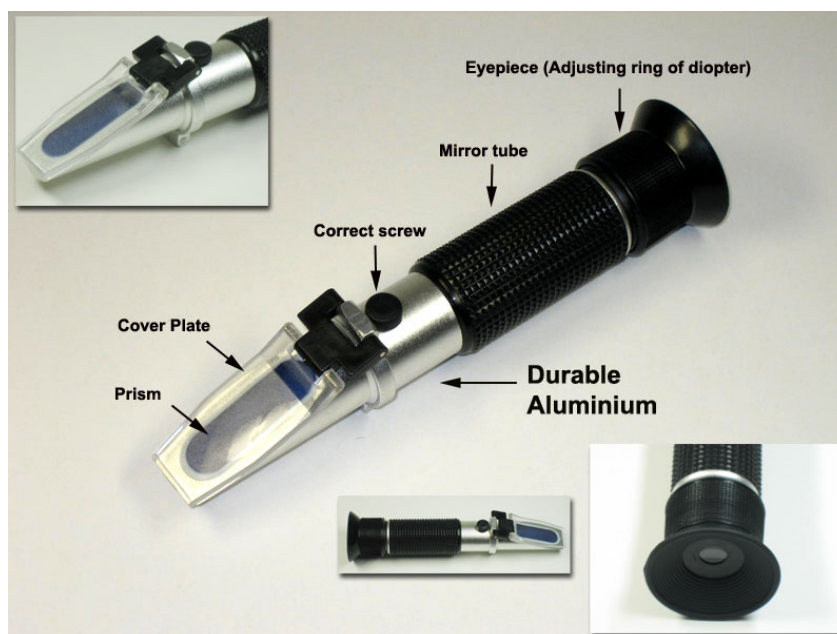
1.5 นำค่าอุณหภูมิของน้ำและความถ่วงจำเพาะของน้ำไปเทียบกับตารางการเทียบค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค็มของน้ำ (ppt) กับความหนาแน่นและอุณหภูมิของน้ำ (ตารางแสดงในแสดงภาคผนวก ข) เพื่อให้ได้ค่าความเค็มของน้ำ ตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำตัวอย่างมีอุณหภูมิ 22 °C และมีความถ่วงจำเพาะ 1.007 ค่าความเค็มของน้ำตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 10.6 ppt



ภาพที่ 2.2 แสดงเครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

## 2. ดัชนีการหักเหแสง (Refractive index)

เครื่องวัดความเค็มชนิดพกพา refractometer หรือ salinometer สามารถใช้วัดการหักเหของแสงของน้ำหรือสารละลายต่างๆ ได้ เครื่องมือชนิดนี้เล็กกะทัดรัดแต่มีราคาแพง สามารถวัดได้อย่างแม่นยำและใช้น้ำปริมาณน้อยในการวัด โดยจะปรับแต่งมาให้อ่านหน่วยที่วัดออกมาเป็น ppt และต้องใช้ในอุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น



ภาพที่ 2.3 แสดงเครื่องวัดความเค็มชนิดพกพา (Refractometer)

## 3. Sodium ion-selective meter

Sodium ion-selective meter ใช้อิเล็กโทรดที่เลือกวัดเฉพาะอิออนของโซเดียม ซึ่งจะวัดความเค็มและได้ผลออกมาเป็นหน่วยวัด g/l ที่เราสามารถใช้อุปกรณ์นี้เลือกวัดเฉพาะโซเดียมแล้วแปลผลออกมาเป็นความเค็มนั้น เนื่องจากเกลือแกงหรือ Sodium chloride เป็นเกลือส่วนใหญ่ของน้ำนั่นเอง

## 4. Chlorinity

คลอรีนิตี้เป็นการวัดปริมาณสารประกอบฮาโลเจน (Halide) ทั้งหมดในน้ำ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค็ม ปริมาณฮาโลเจนที่วัดได้จะสามารถคำนวณกลับเป็นความเค็มได้ ส่วนวิธีการหาค่า Halide จะใช้วิธีไตเตรต (Titration Chlorinity) หน่วยเป็น part per thousand (ppt)

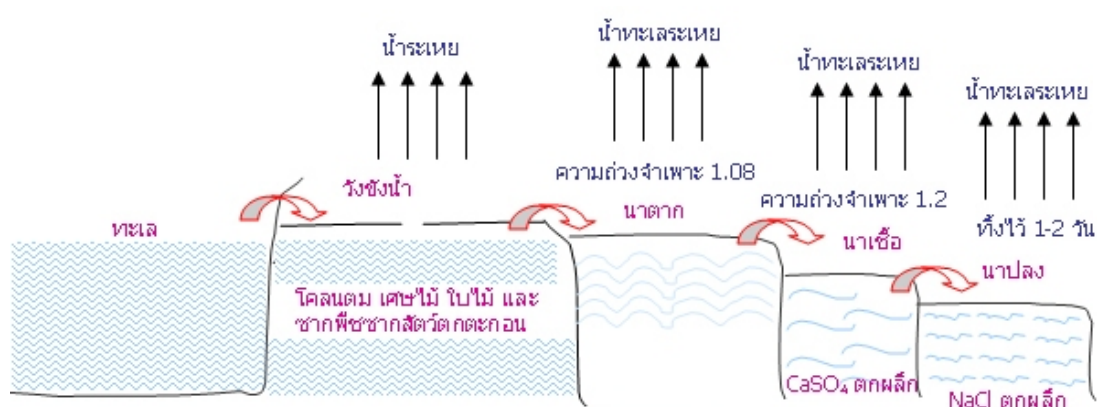
## 2.4 การผลิตเกลือสมุทร (Salt Production) (จิวรรณ เทนอิสสระ, 2554)

### 2.4.1 การเตรียมพื้นที่

โดยทั่วไปใช้พื้นที่ประมาณ 40 ไร่ จากนั้นปรับพื้นที่ให้เรียบแน่น แบ่งออกเป็นแปลงๆ แปลงละ 1 ไร่ ยกขอบแปลงให้สูงแล้วทำร่องระบายน้ำระหว่างแปลง

### 2.4.2 การทำนาเกลือ

1. แบ่งพื้นที่ทำนาเป็น 3 ตอน ได้แก่ นาตาก นาเชื้อและนาปลง ซึ่งระดับพื้นที่จะลดหลั่นลงตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการระบายน้ำและขังน้ำ
2. ก่อนถึงฤดูการทำนาเกลือ ให้ระบายน้ำเข้าเก็บขังไว้เพื่อให้น้ำสะอาด ผงโคลนตม แร่ธาตุ จะได้ตกตะกอน พื้นที่ที่ขังน้ำไว้ตอนนี้เรียกว่า “นาวัง”
3. จากนั้นระบายน้ำเข้าสู่นาตาก ให้ระดับน้ำสูงกว่าพื้นนาประมาณ 5 cm เมื่อน้ำระเหยไปจนวัดความถ่วงจำเพาะของน้ำทะเลได้ 1.08 จึงถ่ายน้ำสู่นาเชื้อ เพื่อให้แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ตกผลึกออกมาเป็นผลพลอยได้ ส่วนน้ำทะเลที่เหลือปล่อยให้ระเหยไปจนมีความถ่วงจำเพาะ 1.2 แล้วจึงระบายน้ำทะเลนั้นเข้าสู่นาปลง จากนั้นโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) จะเริ่มตกตะกอน โดยปกติจะปล่อยให้  $\text{NaCl}$  ตกผลึกประมาณ 9-10 วัน จึงขูดเกลือออกขณะที่มีน้ำทะเลขังอยู่ เกลือที่ได้นำไปตากแดด 1-2 วันแล้วจึงเก็บเข้าฉาง



ภาพที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการผลิตเกลือสมุทร



ในการนำน้ำทะเลมาระเหยอย่างช้าๆ เช่น ในการทำนาเกลือ พบว่า เกลือหลักที่ได้คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แต่ที่จริงแล้วเกลือที่ตกตะกอนก่อน NaCl คือ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ในตารางที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการตกตะกอนของเกลือจากน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า NaCl เริ่มตกตะกอนก็ต่อเมื่อน้ำระเหยออกไปจนกระทั่งปริมาณของน้ำทะเลลดลงเหลือ 9.5 %

ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการตกตะกอนของแร่ธาตุจากก่อนไปหลังในการระเหยของน้ำทะเล 1 kg.

ความหนาแน่น (g/l)	ปริมาตร (l)	น้ำหนักเกลือ(g)						
		$\text{CaCO}_3$	$\text{CaSO}_4^{2-}$	NaCl	$\text{MgCl}_2$	$\text{MgSO}_4$	NaBr	KCl
1.026	1.000							
1.050	0.533	0.0642						
1.126	0.190	0.0530	0.5600					
1.202	0.112		0.9070					
1.214	0.095		0.0508	3.2614	0.0040	0.0078		
1.221	0.064		0.1476	9.6500	0.0130	0.0356		
1.236	0.039		0.0700	7.8960	0.0262	0.0434	0.0728	
1.257	0.030		0.0144	2.6260	0.0174	0.0150	0.0358	
1.278	0.023			2.2720	0.0254	0.0240	0.0518	
1.307	0.016			1.4040	0.5382	0.0274	0.0620	
	0.000			2.5850	1.8545	3.1640	0.3300	0.5339

ที่มา : Wilson T.R.S. (1975)

#### 2.4.3 ผลพลอยได้จากการผลิตเกลือสมุทร

1. สัตว์น้ำทะเลต่างๆ เช่น กุ้งขาว กุ้งแชบ๊วย ปลาหมอคาง ปลากระพง ปูทะเล ฯลฯ อยู่ในนาแว้ง เป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบธรรมชาติเพื่อเป็นรายได้เสริมทางหนึ่ง

2. น้ำขมหรือน้ำแ่ คือ น้ำที่เหลือจากการทำนาเกลือซึ่งจะมีความเค็มตั้งแต่ 30 ppt ขึ้นไป โดยในแต่ละปีของการทำนาเกลือจะมีปริมาณน้ำขมเกิดขึ้นประมาณ 5,000 ลิตรต่อไร่ของนาปลง โดยสามารถนำไปผสมกับน้ำปกติเพื่อใช้เพาะเลี้ยงกุ้งหรือสามารถเก็บไว้เพื่อเป็นน้ำเชื้อในการทำนาเกลือครั้งต่อไป

3. เกลือจัดหรือยิปซัม เป็นสินแร่ที่เกิดในนาเกลือเฉพาะแปลงที่ใช้กักเก็บน้ำขม (นารองเชื้อและนาเชื้อ) เกลือจัดจะเกิดอยู่บนหน้าดิน เกษตรกรชาวนาเกลือจะทำเกลือจัดในฤดูฝน หลังจากหมดฤดูทำนาเกลือแล้ว โดยจะขังน้ำฝนไว้ในแปลงนาที่มีเกลือจัด แล้วรวบรวมเกลือจัดเข้าเป็นกองๆ จากนั้นก็จะร่อนและล้างเอาเศษดินเศษโคลนออกให้เหลือแต่เม็ดเกลือจัดที่แข็งคล้ายทรายหยาบๆและไม่ละลายน้ำ

4. ดีเกลือ การทำดีเกลือจะทำแปลงเฉพาะไม่ปนกับแปลงนาเกลือ โดยนำน้ำจากการรื้อเกลือแต่ละครั้งไปขังรวมกันไว้ ทั้งไว้ระยะหนึ่งก็จะมีดีเกลือเกิดขึ้นเกาะอยู่ตามพื้นนา เกษตรกรชาวนาเกลือจะเก็บดีเกลือทุกวันในเวลาเช้าก่อนแดดออก (ถ้าแดดจัดดีเกลือจะละลายไปกับน้ำ) ดีเกลือชนิดนี้จะเป็นเม็ดสีขาวมีรสขม นำไปใช้ประกอบเป็นเครื่องยาไทยโบราณประเภทยาระบายหรือยาถ่ายและน้ำที่อยู่ในนาดีเกลือจะมีความเค็มจัดมากเรียกว่า “น้ำดีเกลือ” นำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการทำเต้าหู้ เป็นสารทำให้เต้าหู้แข็งตัว

5. ชี้แดด เป็นส่วนที่อยู่บนผิวดินของนาเกลือ มีลักษณะเป็นแผ่นร่อนอยู่บนผิวนา ซึ่งเกษตรกรชาวนาเกลือต้องทำการเก็บชี้แดดก่อนทำการบดดินตอนต้นฤดูการทำนาเกลือ ชี้แดดนี้สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยปลูกพืชได้

## 2.5 กระบวนการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมมาเกลือโดยใช้แคลไซต์โดโลไมท์ในกระบวนการเคมี

### 2.5.1 แร่โดโลไมท์ (dolomite) (คชินท์ สายอินทวงศ์, 2543)

โดโลไมท์เป็นแร่ที่พบได้ทั่วไปบนผืนโลก ซึ่งสัดส่วนของ CaO และ MgO จะแตกต่างกันไปตามแหล่งต่างๆ พบมากในประเทศอิตาลี ฝรั่งเศส จีน อินเดีย สหรัฐอเมริกา ในประเทศไทยพบได้มากที่จังหวัดกาญจนบุรีอยู่บริเวณเขตติดต่อระหว่างอำเภอเมืองและอำเภอมอแก้ว อำเภอคอนสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานีและอำเภอนอมจังหวัดนครศรีธรรมราช ที่อื่นๆ ได้แก่ จังหวัดแพร่ ราชบุรี ชลบุรี จันทบุรีและสงขลา

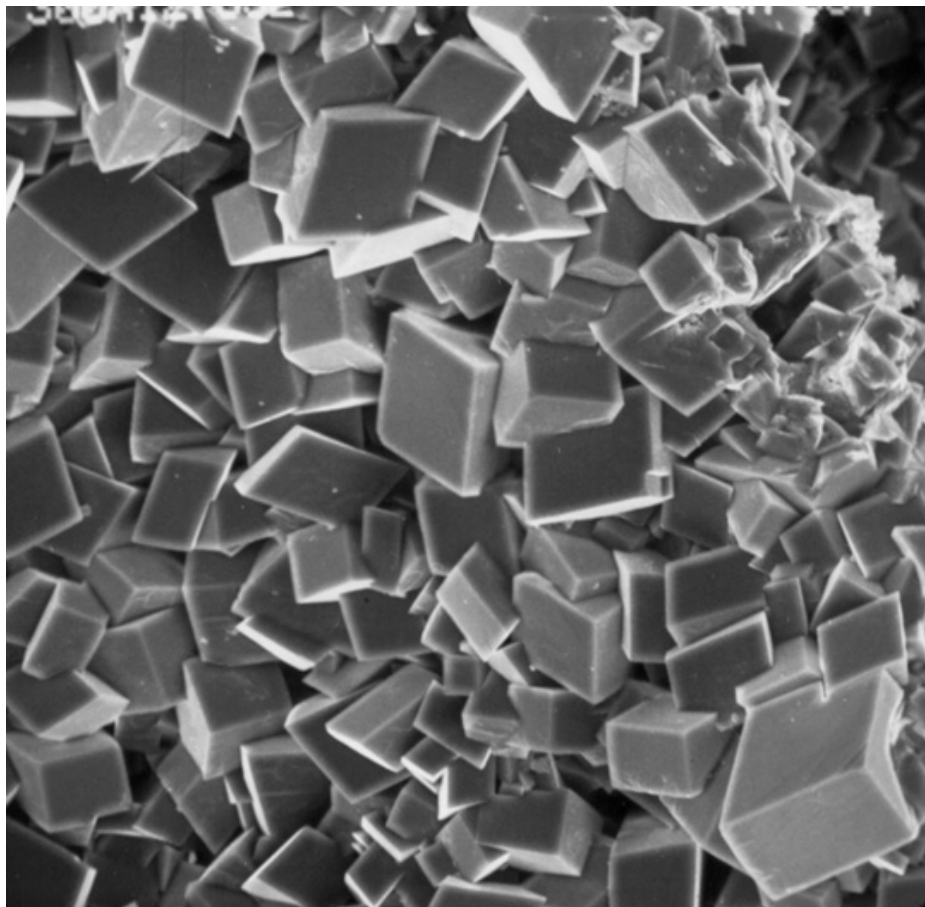
คุณสมบัติทางฟิสิกส์ โดโลไมท์มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนาล ผลึกของแร่มักพบในรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนผิวหน้าผลึกมักจะโค้ง บางครั้งจะโค้งเป็นรูปคล้ายอานม้า ผลึกในแบบอื่นมีพบได้บ้างแต่น้อย ซึ่งอาจพบเป็นเม็ดหยาบๆ ไปจนกระทั่งเม็ดเล็กๆ จนเกาะกันแน่น ความแข็ง 3.5-4 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.85 ความวาวคล้ายแก้ว บางชนิดมีความวาวคล้ายมุก (pearl spar)

คุณสมบัติทางเคมี โดโลไมท์มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ส่วนประกอบของโดโลไมท์ตามทฤษฎีนั้นจะมี  $\text{CaCO}_3$  54 % และ  $\text{MgCO}_3$  46 % หรือ แมกนีเซียมออกไซด์ 21.7% แคลเซียมออกไซด์ 30.4% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 47.9% นั่นคือส่วนมากจะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า ส่วนแร่ตัวอื่น ๆ นั้นประกอบด้วย  $\text{MgSO}_4$  ปนอยู่เล็กน้อย รวมทั้ง  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ด้วย ซึ่งจะทำให้สีของก้อนแร่นั้นแปรเปลี่ยนไปได้ตั้งแต่สีครีม ชมพู เหลือง จนกระทั่งสีน้ำตาล เทา

โครงสร้างผลึกมีได้ตั้งแต่เป็นรูปผลึก จนถึงอสัณฐาน (amorphous phase) สีหลังเผาที่  $950^\circ\text{C}$  จะเป็นสีขาว ซึ่ง  $\text{CO}_2$  ในตัวแร่จะถูกกำจัดออกไปจนหมด เหลือแต่  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  โดยปกติโดโลไมท์มีส่วนสัดของ  $\text{CaCO}_3$  ต่อ  $\text{MgCO}_3$  ประมาณ 1:1 เนื้อหินมักจะมีรอยแตกขนาดเล็กค่อนข้างมาก ทำให้ผิวนอกขรุขระ โดโลไมท์จะหนักกว่าและแข็งกว่าหินปูนเล็กน้อย มีหลายสีเช่นสีขาว เทาและ เทาเข้ม

การกำเนิดของแร่โดโลไมท์ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการทุติยภูมิที่ทำให้อนุผลแมกนีเซียมสามารถเข้าไปแทนที่อนุผลแคลเซียมในโครงสร้างแร่เดิมได้ ซึ่งในหลายๆกรณีสภาพการณ์เช่นนี้มักเกี่ยวข้องกับที่เกิดแร่ในกลุ่มของอีวาพอไรต์ (evaporites) เช่น ยิปซัมและเกลือหิน ในประเทศไทยมักเกิดอยู่ใกล้เคียงกับเขาหินปูน เกิดเป็นชั้นหินปูนโดโลไมท์ (dolomitic limestone) หรือพบเกิดในสายแร่ตะกั่วหรือสายแร่สังกะสีที่ตัดผ่านหินปูน

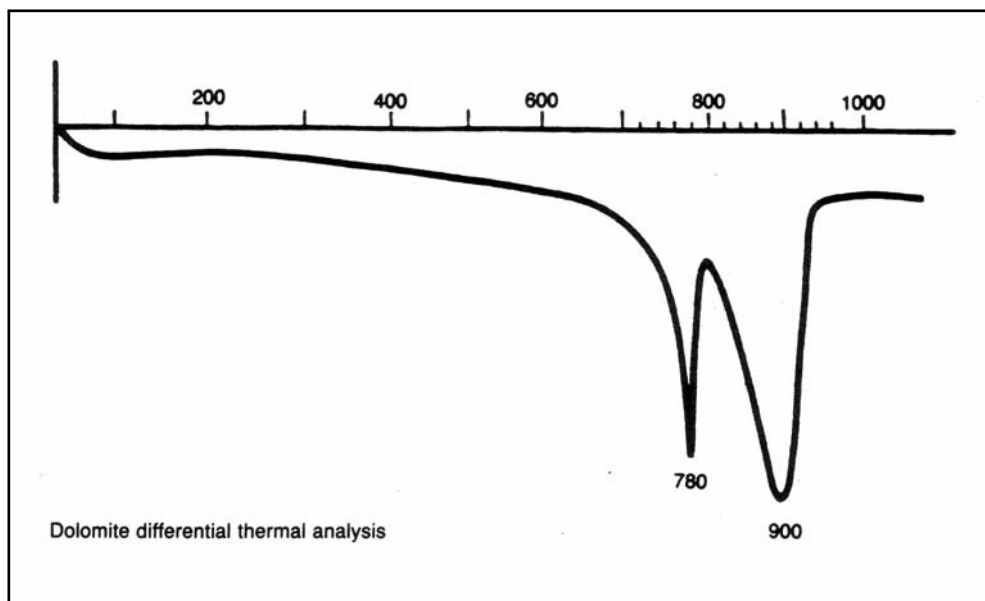
**คุณสมบัติในการทำปฏิกิริยา** โดโลไมท์จะทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ (HCl) อย่างช้าๆในอุณหภูมิธรรมดา แต่ถ้าบดเนื้อแร่ให้เป็นก้อนเล็กๆละเอียดจะเพิ่มอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาโดยจะละลายในกรดเป็นฟองฟู หากไม่บดต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกที่มีอุณหภูมิสูงจึงจะทำปฏิกิริยาเป็นฟองฟู



ภาพที่ 2.5 แสดงรูปร่างผลึกของแร่โดโลไมท์

### 2.5.2 แคลไซน์โดโลไมท์ (calcine dolomite)

แคลไซน์โดโลไมท์ (calcine dolomite) คือโดโลไมท์ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว โดยการนำเอาแร่โดโลไมท์ มาทำการเผา (calcine) ที่อุณหภูมิ 950 - 1000°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) (decomposition stage) ในโดโลไมท์ ในเตาเผาแบบ rotary kiln ผลิตภัณฑ์โดโลไมท์ที่ได้ เรียกว่า dead-burned dolomite โดยโดโลไมท์ที่ผ่านการเผาจะนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ โดยใช้เป็นอิฐทนไฟ สำหรับเตาหลอมเหล็ก และเตาเผาซีเมนต์ ซึ่งก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่สลายตัวนี้เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดรูพรุน ฐูเข็มบนผิวหน้าเคลือบได้



ภาพที่ 2.6 แสดงช่วงอุณหภูมิที่สลายตัวของ  $\text{CO}_2$  ในโดโลไมท์ (DTA curve of dolomite)

### 2.5.3 องค์ประกอบของน้ำขมที่มาจากการผลิตเกลือสมุทร

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการสกัดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมของการผลิตเกลือสมุทร ดังนั้นในน้ำขมดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบจึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับแร่โดโลไมท์แล้วเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้

### ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบในน้ำขม

องค์ประกอบธาตุ	ppm
Chloride, $\text{Cl}^-$	35800
Sodium, $\text{Na}^+$	25650
Sulfate, $\text{SO}_4^{2-}$	5000
Magnesium, $\text{Mg}^{2+}$	2750
Calcium, $\text{Ca}^{2+}$	80
Potassium, $\text{K}^+$	720
Bromide, $\text{Br}^-$	120
Silicon, $\text{Si}_4$	2

ที่มา : S. Al Mutaz and K.M. Wagialia,(1980)

#### 2.5.4 กระบวนการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ในงานวิจัยนี้เป็นการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมเหลือทิ้งของการผลิตเกลือสมุทรโดยใช้แคลไซต์โดโลไมต์ ดังนั้นจะมีกระบวนการเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกริยาของการเผาโดโลไมท์หรือแคลไซต์โดโลไมท์(Calcination of dolomite)** (M.Halman, A.Frei, and A.Steinfeld, 2008)

แคลไซต์โดโลไมท์คือการนำแร่โดโลไมท์ไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในแร่โดโลไมท์แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

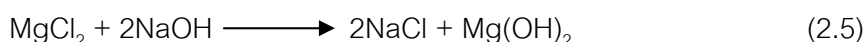


ซึ่งนอกจากการเผาโดโลไมท์จะทำให้เกิดการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์โมเลกุลอิสระหลังจากการเผาอีกด้วย

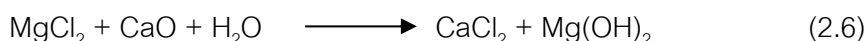
**ขั้นตอนที่ 2 การทำปฏิกริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์และแมกนีเซียมคลอไรด์เกิดเป็นตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์**

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)<sub>2</sub>) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์กับสารประกอบชนิดต่างๆ ดังนี้

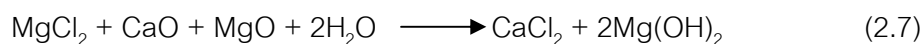
1. เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.5



2. เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์กับแคลเซียมออกไซด์ในรูปของเหลวปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6



3. เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์กับแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในรูปของเหลวปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7



ซึ่งจากสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 จะเห็นว่าเกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียง 1 โมล ส่วนสมการที่ 2.7 เกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแคลไซน์โดโลไมท์ มาเป็นตัวแทนของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์กับแมกนีเซียมออกไซด์และนำตัวอย่างน้ำขม เหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทรมาเป็นตัวแทนของสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์เพื่อทำการศึกษาถึงลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

#### 2.5.6 กระบวนการตกตะกอน

จากการเกิดตะกอนทางเคมีข้างต้นจะก่อให้เกิดตะกอนของแข็งปะปนอยู่ในของเหลว ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำตะกอนไปใช้ประโยชน์ได้จึงจำเป็นต้องทำการแยกตะกอนของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งวิธีการที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพคือการตกตะกอน (sedimentation) โดยอาศัยหลักการที่ว่าตะกอนของแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวย่อมจะตกตะกอนแยกตัวออกมาตัวแปรที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในกระบวนการตกตะกอนก็คือความเร็วของการตกตะกอนซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่นและรูปร่างของอนุภาครวมไปถึงความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวด้วย

##### 2.5.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันซึ่งปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

##### ก. ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

จากสมการของ Stoke (stoke's equation) ที่ใช้อธิบายถึงความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคทรงกลมในสารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำพบว่า ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจะสัมพันธ์กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคดังนี้ (Foust และคณะ, 1980)

$$v_t = \frac{gD_p^2(P_p - P)}{18} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $V_t$  คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค  
 $G$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ,  $9.81\text{m/s}^2$   
 $D_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาค  
 $P_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  
 $P$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว  
 $\mu$  คือ ค่าความหนืดของของเหลว

ซึ่งจากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูงขึ้นหรือความหนืดของของเหลวมีค่าลดลง

### ข. ความเข้มข้นของอนุภาค

ความเข้มข้นของอนุภาคจะมีผลที่สำคัญต่อความเร็วของการตกตะกอน โดยเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกขัดขวางจากอนุภาคอื่นที่แวดล้อมอยู่ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “hindered settling” โดยที่ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในกรณีนี้จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคที่คำนวณได้จาก stoke's equation ซึ่งมีสมการดังนี้ (Foustและคณะ, 1980)

$$v_H = \left\{ \frac{gD_p^2(P_p - p)}{18} \right\} (R) \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $V_H$  คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในกรณี hindered settling  
 $R$  คือ correction factor

### ค. การรวมตัวกันของอนุภาค

การรวมตัวของอนุภาคในกระบวนการตกตะกอนจะช่วยในการเปลี่ยนกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอให้มารวมกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งจะช่วยเพิ่มความเร็วในการตกตะกอนได้มาก รูปร่างและความหนาแน่น



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การศึกษาของ Mullin และคณะ

Mullin และคณะ (1989) ได้ศึกษาถึงปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลที่มีความเค็มสูงมาก (dead sea) และเมื่อนำไปวิเคราะห์พบว่าปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์อยู่เป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอน  $Mg(OH)_2$  ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย  $MgCl_2$  และ NaOH ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ เวลา ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และความเร็วรอบ ดังนี้

1. **เวลา** ขนาดของตะกอน  $Mg(OH)_2$  จะมีแนวโน้มเล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นภายในช่วงต้นๆของกระบวนการโดยที่ 60-70% ของขนาดอนุภาคที่ลดลงจะเกิดภายในครึ่งชั่วโมงแรกของการเกิดตะกอน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการรวมตัวกันของอนุภาคจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและอาจจะมีขนาดใหญ่สุดได้ จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กลง อันเนื่องมาจากการแตกตัวของอนุภาค (deagglomeration) อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง ขนาดของอนุภาคจะมีค่าคงที่อันเนื่องมาจากอัตราการรวมตัวกันและการแตกตัวของอนุภาคมีค่าเท่ากัน

2. **ความเข้มข้นของสารตั้งต้น** ขนาดเริ่มต้นของอนุภาคที่รวมตัวกันมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคมีมาก อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งขนาดของอนุภาคจะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งขนาดสุดท้ายของตะกอน  $Mg(OH)_2$  ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

3. **ความเร็วรอบของการกวน** การลดลงของขนาดอนุภาคที่รวมตัวจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของการกวน โดยยิ่งมีความเร็วรอบมากก็จะยิ่งทำให้อนุภาคแตกตัวเร็วขึ้น ซึ่งขนาดสุดท้ายของตะกอน  $Mg(OH)_2$  ที่ความเร็วรอบสูงจะเล็กกว่าตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ

### 2.6.2 การศึกษาของ Turek และคณะ

Turek และคณะ (1985) ได้ศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนของน้ำทะเลความเค็มสูง (dead sea) กับหินปูนโดยพบว่าขนาดของตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่างๆมีดังนี้

#### ก. ลักษณะของผลึก

ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีลักษณะของการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐมภูมิ (primary crystal) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ (hexagonal thin plate) หรือที่เรียกว่า บรูไซต์ (brucite) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $12 \pm 3.5$  nm มารวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นทรงกลมเรียกว่าผลึกแบบทุติยภูมิ (secondary crystal)

นอกจากนี้ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับกับน้ำโดยจะเกิดการดูดน้ำไว้บนผิวของผลึก (iyosorption) ซึ่งเมื่อผลึกเหล่านี้เกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ น้ำจะถูกเก็บรวบรวมอยู่ภายในรูพรุนของผลึกที่เกาะตัวกัน ซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความหนาแน่นต่ำและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความเร็วของตะกอนมีค่าต่ำ

### 2.6.3 การศึกษาของ Lartey

R.B. Lartey (1997) ได้ทำการเก็บกลับคืนสารเคมีที่มีประโยชน์จากน้ำขมเหลือทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเกลือ Pambros Salt Industries (Accra) โดยใช้เครื่อง Neutron Activation Analysis (NAA) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำขม ซึ่งพบว่ามีปริมาณ  $Mg^{2+}$  สูงถึง 4.24 w/w% หรือ คิดเป็น 16.60 w/w%  $MgCl_2$  ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

Table 2. NAA Analysis of Brine Samples (w/w%)

Element	Sample No.						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Na	4.50	5.96	6.30	5.10	4.80	1.63	1.12
Ca	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mg	4.24	2.20	1.82	0.82	0.61	0.27	0.26
K	0.92	0.41	0.47	0.37	0.11	0.02	0.02
Fe	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	14.60	14.8	14.40	11.70	8.70	3.39	2.88
S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Br	0.21	0.11	0.10	0.04	0.3	0.01	0.01

\* ND = Not Detected.

และเปรียบเทียบกับการใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ได้แสดงดังตารางที่ 3

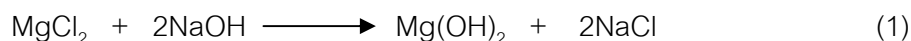
Table 3. AAS Analysis of Brine Samples (w/w%)

Element	Sample No.						
	1	2	3	4	5	6	7
Na	4.0	5.33	5.75	4.62	4.27	1.21	0.83
Ca	0.06	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01	0.005
Mg	4.58	2.28	1.85	1.07	0.82	0.19	0.14
K	1.17	0.47	0.48	0.34	0.17	0.07	0.04
Fe	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

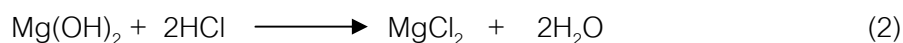
ก. การเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) ในการตกตะกอน

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นมี 2 ขั้นตอน คือ

1. การตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 1



2. การล้างตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 โมลาร์ ( $HCl$  6M) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2



จากนั้นนำตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ไปวิเคราะห์และหา %Yield พบว่าผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4, 5 และ 6

Table 4. Yield of  $Mg(OH)_2$  from Brine samples (200 ml)

Samples No.	$Mg(OH)_2$ Yield (g)	
	Theoretical*	Experimental
1	25.66	27.11
2	11.71	12.58
3	10.50	10.86

\* From Table 2.

Table 5. Percentage composition of precipitated and washed  $Mg(OH)_2$

Sample No.	w/w%						
	$Mg(OH)_2$	NaCl	Ca	K	Fe	S	Br
1	90.17	7.45	Nil	1.36	Nil	Nil	0.22
2	92.37	6.60	Nil	0.80	Nil	Nil	0.22
3	91.84	6.90	Nil	0.75	Nil	Nil	0.03

Table 6. Yield of  $MgO$  from  $Mg(OH)_2$  samples calcined at 750 °C for 2 hrs

Sample	$Mg(OH)_2$ (g)	$MgO$ Yield (g)	
		Theoretical	Experimental
A	15.58	10.58	11.61
B	10.86	7.50	7.97

จากการศึกษา R.B. Lartey สรุปว่า น้ำขมเหลือทิ้งที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตเกลือ Pambros Salt Industries (Accra) มีปริมาณ  $Mg^{2+}$  สูงถึง 4.24 w/w% หรือ 16.60 w/w%  $MgCl_2$  ซึ่งมีปริมาณมากพอที่จะนำมาทำการสกัดสารเคมีที่มีประโยชน์ เช่น แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ออกมาแทนที่จะเป็นการปล่อยน้ำขมทิ้งไป แต่อย่างไรก็ตามวิธีการทดลองดังกล่าวยังต้องมีการพัฒนากระบวนการล้างตกตะกอนเนื่องจากตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้โดยมาจากการใช้

#### 2.6.4 การศึกษาของ Mutaz และ Wagialia

I.S. Al Mutaz และ K.M. Wagialia (1990) ได้ทำการศึกษาการเก็บกลับคืนแร่ธาตุแมกนีเซียมจากกระบวนการกลั่นน้ำที่มีความเค็มสูงมากให้บริสุทธิ์เพื่อเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำให้บริสุทธิ์และยังเป็นอีกหนึ่งวิธีการในการจัดการของเสียที่ดี โดยใช้ Arabian Gulf condition เป็นกรณีศึกษา องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งน้ำดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

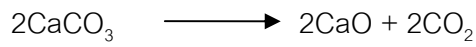
**TABLE 3**

**Approximate Arabian Gulf desalination brine analysis (ppm)**

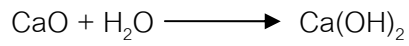
Chloride, $\text{Cl}^-$	35 800
Sodium $\text{Na}^+$	25 650
Sulfate, $\text{SO}_4^{2-}$	5000
Magnesium, $\text{Mg}^{2+}$	2750
Calcium, $\text{Ca}^{2+}$	80
Potassium, $\text{K}^+$	720
Bicarbonate, $\text{HCO}_3^-$	220
Bromide, $\text{Br}^-$	120
Silicon, $\text{Si}_4^-$	2
<b>Total dissolved salt (TDS)</b>	<b>70 000</b>

จากนั้นได้ทำการศึกษาการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมด้วยวิธี Dow Chemical process โดยการนำหินปูนที่ผ่านกระบวนการเผา (calcined limestones) มาใช้ในการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แล้วจึงนำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้

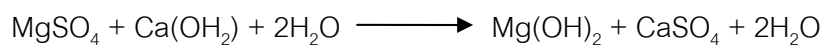
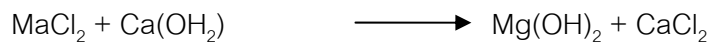
### Calcination



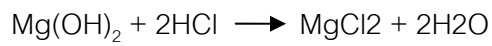
### Slaking



### Precipitation:



### Hydrochlorination



แผนภาพในการทดลองสามารถแสดงได้รูปที่ 2

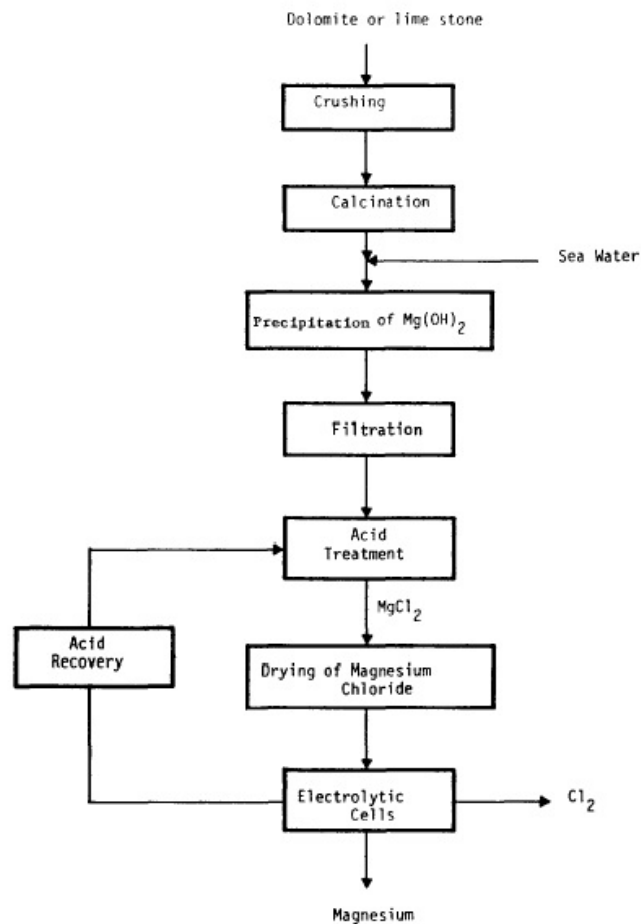


Fig. 2. An outline of the Dow Chemical process.

จากแผนภาพในการทดลองจะเริ่มจากการนำหินปูนไปเผาโดยการให้ความร้อนสูงจากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำขมหรือน้ำทะเลเกิดเป็นตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ กรองตะกอนที่ได้แล้วจึงนำตะกอนดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากนั้นทำให้ตะกอนแห้งและใช้เซลล์ไฟฟ้าในการแยกคลอไรด์ออกจากแมกนีเซียมคลอไรด์ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นธาตุแมกนีเซียม

#### 2.6.5 การศึกษาของ Carson และ Simandl

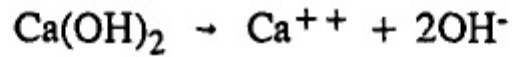
R.C. Carson และ J. Simandl (1993) ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเลโดยใช้โดโลไมท์ในการทำปฏิกิริยา โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสและ 45 องศาเซลเซียส และผลของขนาดอนุภาคโดโลไมท์ต่อการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 50, 100 และ 200 เมช องค์ประกอบทางเคมีของน้ำทะเลที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

**TABLE 1 Partial List of Species Present in Reconstituted Seawater Used in Experiments**

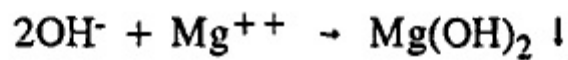
Element	Concentration (ppm)
Cl	18 600
Na	10 400
Mg	1 290
Ca	410
K	380
Br	62
B	4.9
F	1.9

โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) **Dissolution of the calcium hydroxide**



2) **Formation of magnesium hydroxide**



และจากการตกตะกอนในขั้นตอนที่ 2 สามารถเขียนเป็นลักษณะตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ตามลำดับ ดังนี้

Ions  $\longrightarrow$  ionic cluster  $\longrightarrow$  heterogeneous nuclei  $\longrightarrow$  microcrystallites  $\longrightarrow$  final primary crystals  $\longrightarrow$  aggregates  $\longrightarrow$  flocks

การศึกษามวลของขนาดอนุภาคโดโลไมท์ที่มีต่อการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และ 2

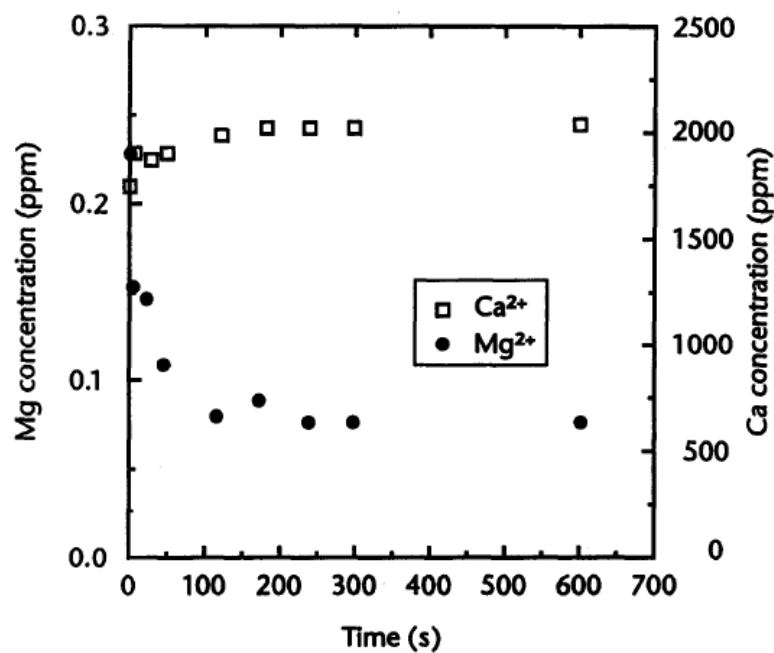


Fig.1 Concentration of magnesium and calcium species greater than 0.2  $\mu\text{m}$ , for 200 mesh (74 micron) dolomite feed, 30°C



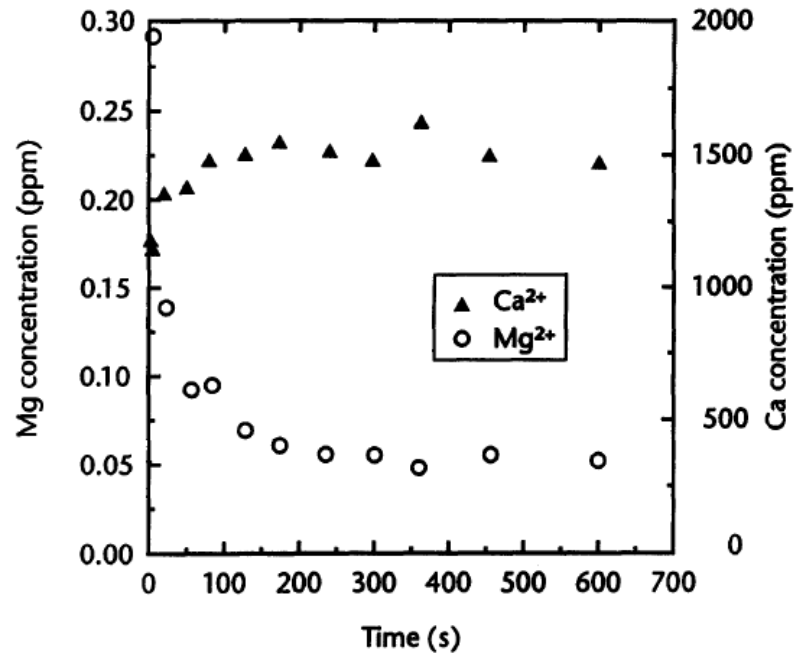


Fig.2 Concentration of magnesium and calcium species greater than  $0.2 \mu\text{m}$ , for 50 mesh (297 micron) dolomite feed,  $30^\circ\text{C}$

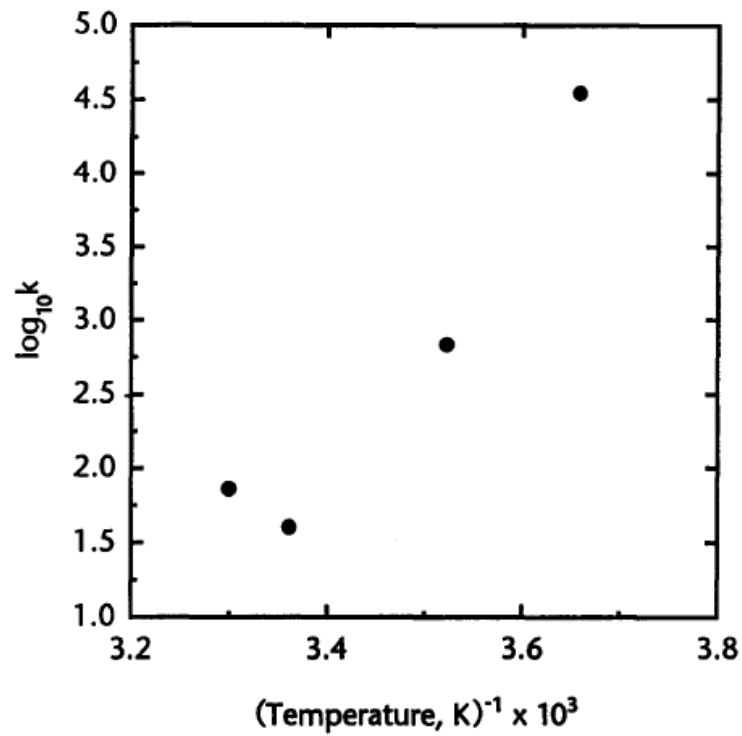


Fig.3 Relationship between temperature and the rate constant for 200 mesh (74 micron) dolomite

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4

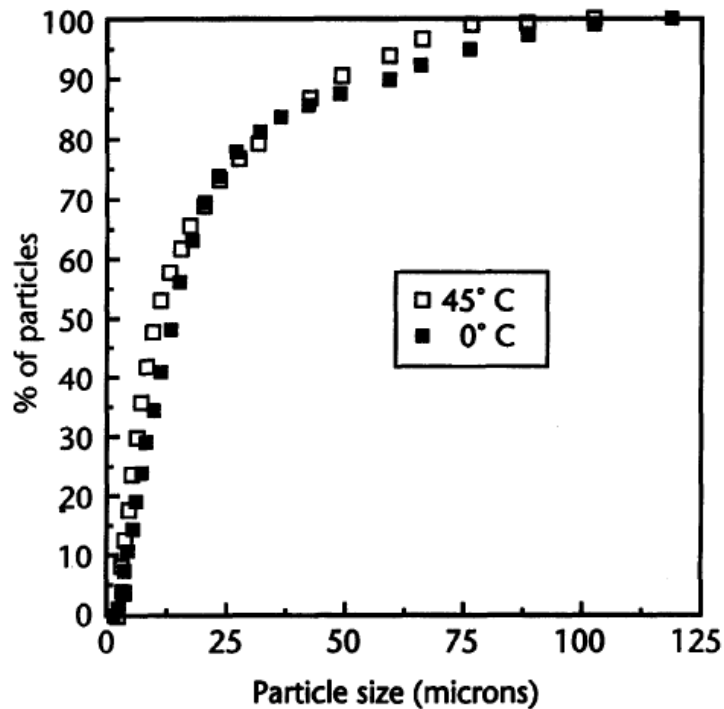


Fig.4 Particle size distribution of solids found in the reactor after 30 minutes for two isothermal tests

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเลโดยใช้โดโลไมท์จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของโดโลไมท์ โดยที่จุดอิ่มตัวยิ่งยวดตะกอนดังกล่าวจะรวมตัวกันในระดับนิวเคลียสเกิดเป็นอนุภาคผลึกขนาดเล็กสามารถเขียนสมการค่าคงที่ของการละลายได้ ดังนี้

$$d(\text{Mg}(\text{OH})_2)/dt = k (\text{Mg}^{2+})^{4.5} \text{ for finely ground dolomite (200 mesh, 74 micron)}$$

$$d(\text{Mg}(\text{OH})_2)/dt = k (\text{Mg}^{2+})^\alpha (\text{Ca}^{2+})^\beta \text{ for coarsely ground dolomite (100 or 50 mesh, 149 or 297 microns)}$$

$$\text{where } \beta = 2.5 \text{ and } 3 < \alpha < 4.$$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ตัวอย่างน้ำขมของบริษัท ส.รวยเจริญ คำเกลือ
2. แร่โดโลไมท์ของบริษัท พี. แอนด์ เอส. แบโรท์ ไม่นิ่ง จำกัด
3. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) ของบริษัท UNIVAR ชนิด Analytical grade

##### 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)
2. X-ray Diffraction (XRD)
3. X-ray fluorescence (XRF)
4. Scanning electron microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น 5410LV Japan
5. Laser particle size analyzer
6. เตาเผาความร้อนสูง (Electric Muffle Furnace)
7. ถังปฏิกรณ์
8. กระดาษวัดพีเอชแบบแผ่นพลาสติก (pH strip) ของบริษัท Micro Essential Laboratory
9. กระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
10. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

#### 3.2 เลือกพื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำขม

ตัวอย่างน้ำขมที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นน้ำขมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทรในขั้นตอนสุดท้ายภายหลังจากที่น้ำทะเลได้ระเหยและเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้ตกตะกอนหมดแล้ว โดยได้มาจากแหล่งผลิตเกลือสมุทรในจังหวัดสมุทรสงคราม ของบริษัท ส.รวยเจริญ คำเกลือ มีความเค็มของน้ำขมคงที่ ซึ่งตัวอย่างที่นำมาศึกษาวิจัยมี 2 ตัวอย่างด้วยกันคือ

1. ตัวอย่างน้ำขมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทร 1 ครั้ง มีความเค็มเท่ากับ 38 ppt
2. ตัวอย่างน้ำขมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทร 3 ครั้ง มีความเค็มเท่ากับ 28 ppt



ภาพที่ 3.1 แสดงพื้นที่นาปลงสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขมที่ 1



ภาพที่ 3.2 แสดงพื้นที่นาปลงที่สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขมที่ 2

### 3.2.1 การเก็บตัวอย่างน้ำนม

ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยได้เลือกวิธีการเก็บตัวอย่างรวมแบบ Integrated (Integrated Samples) โดยใช้ขวดพลาสติกคุณภาพดีซึ่งผ่านการตรวจวิเคราะห์แล้วว่าไม่มีสารแปลกปลอม (Interferences) ออกมา ระหว่างการบรรจุตัวอย่างในระดับที่วิเคราะห์ได้ (Limit of Detection) ภาชนะบรรจุดังกล่าว ได้แก่ พลาสติกชนิดเทฟลอนหรือพลาสติกนาลีน (Nalgene) ชนิดโพลีโพรไพลีน



ภาพที่ 3.3 แสดงขวดพลาสติกชนิดเทฟลอนหรือพลาสติกนาลีนชนิดโพลีโพรไพลีน ขนาด 5 ลิตร

### 3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างน้ำนม

นำตัวอย่างน้ำนมทั้ง 2 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง Inductively

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างแคลไซต์โดโลไมท์ (calcine dolomite)

ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างโดโลไมท์ ของบริษัท พี. แอนด์ เอส. แปรรูป ไม่นิ่งจำกัด มีที่ตั้งอยู่ที่ ตำบลวังดั่ง อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่ง

จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวอย่างโดโลไมท์โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF)



ภาพที่ 3.4 แสดงแร่โดโลไมท์ก่อนนำไปบด



ภาพที่ 3.5 แสดงแร่โดโลไมท์หลังจากนำไปบด

### 3.3.1 การศึกษาขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัว

1. ทำการบดแร่โดโลไมท์ให้มีขนาดละเอียด 50, 100, 200 และ 325 เมชตามลำดับ
2. ชั่งตัวอย่างโดโลไมท์ที่มีขนาดต่างๆกัน 4 ขนาด จำนวนอย่างละ 100.00 กรัมลงในถ้วยกระเบื้องทนไฟ บันทึกน้ำหนักรวมของโดโลไมท์กับถ้วยกระเบื้องก่อนเผา
3. นำตัวอย่างโดโลไมท์ไปเผาโดยใช้เตาเผาความร้อนสูง (electric muffle) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำตัวอย่างโดโลไมท์ไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักรวมของโดโลไมท์กับถ้วยกระเบื้องหลังเผา
5. คำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations) จากสมการที่ 3.1

$$X = \frac{M_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} W_0 - W(t)}{2M_{\text{CO}_2} W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

- เมื่อ  $X$  คือ ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations)  
 $M_i$  คือ มวลโมลกุลของสาร (molecular weight)  
 $W_0$  คือ น้ำหนักของก่อนเผา  
 $W_{(t)}$  คือ น้ำหนักของหลังเผา

6. นำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวอย่างโดโลไมท์หลังเผา (calcine dolomite) โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF)

### 3.4 การตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากตัวอย่างน้ำขมโดยใช้แคลไซต์โดโลไมท์

- เตรียมแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของแคลไซต์ต่อแมกนีเซียม (wt%) ต่างๆกันดังนี้ 1:1, 1:2 และ 2:1
- นำตัวอย่างน้ำขมมาทำปฏิกิริยากับโดโลไมท์ที่ได้ทำการศึกษานาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นปั่นจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วจึงนำไปกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- ทำให้ตะกอนแห้งโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- ทำการทดลองเหมือนเดิมอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากตัวอย่างน้ำขมเป็นแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ (Synthetic  $MgCl_2$ ) โดยใช้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของแคลไซต์ต่อแมกนีเซียม (wt%) ต่างๆกันเหมือนเดิม คือ 1:1, 1:2 และ 2:1
- วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบรูปร่างลักษณะและปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD), เครื่อง X-ray fluorescence (XRF), เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) และเครื่อง Laser particle size analyzer



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำนม

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำนมด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Atomic พบว่าตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำนมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทร 1 ครั้ง มีค่าความเค็มเท่ากับ 28 ppt และตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำนมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทร 3 ครั้ง มีค่าความเค็มเท่ากับ 38 ppt พบว่า ตัวอย่างที่ 2 มีปริมาณแมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ ) สูงกว่าและมีปริมาณโซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ต่ำกว่าตัวอย่างที่ 1 เนื่องจากตัวอย่างที่ 2 ได้ถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นของการผลิตเกลือสมุทรซ้ำ 3 ครั้ง ปริมาณโซเดียมไอออนจึงตกตะกอนเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) ได้มากกว่าและเหลือเป็นแมกนีเซียมไอออนสูงกว่า ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างน้ำนมทั้ง 2 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างไอออนในตัวอย่างน้ำนมที่ 1 และตัวอย่างน้ำนมที่ 2

ชนิดของไอออน	ตัวอย่างน้ำนมที่ 1 Concentration (g/l)	ตัวอย่างน้ำนมที่ 2 Concentration (g/l)
$Na^+$	59.10	48.70
$Mg^{2+}$	19.89	36.35
$Cl^-$	5.85	0.94
$Ca^{2+}$	3.50	1.12
$SO_4^{2-}$	1.52	0.95
$K^+$	1.45	0.78

ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกนำตัวอย่างน้ำนมที่ 2 มาทำการทดลองเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

## 4.2 ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัว

### 4.2.1 ผลการศึกษาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations)

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าผลการคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

#### ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations)

ตัวอย่างเช่น โดโลไมท์ขนาด 50 เมช สามารถคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักได้ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad X = \frac{M_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2} W_0 - W_{(t)}}{2M_{\text{CO}_2} W_0} \times 100$$

เมื่อ X คือ ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss on calcinations)

$M_i$  คือ มวลโมเลกุลของสาร (molecular weight)

$W_0$  คือ น้ำหนักสารก่อนเผา

$W_{(t)}$  คือ น้ำหนักสารหลังเผา

$$X = \frac{184.4008}{44.0095} \times \left( \frac{100.00 - 79.00}{100.00} \right) \times 100$$

$$X = 2.095011 \times 0.21 \times 100$$

$$\mathbf{X = 44.00}$$

ดังนั้นโดโลไมท์ขนาด 50 เมช เมื่อนำไปเผาจะมีการสูญเสียน้ำหนักไปเท่ากับร้อยละ 44.00

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของโดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ กัน

ขนาดอนุภาค ของโดโลไมท์	ครั้งที่	ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss on calcinations)	ค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)
50 เมช	1	44.00	44.83
	2	46.09	
	3	44.41	
100 เมช	1	43.58	45.60
	2	46.30	
	3	46.93	
200 เมช	1	44.41	46.23
	2	47.98	
	3	46.30	
325 เมช	1	45.04	45.81
	2	46.09	
	3	46.30	

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคของโดโลไมท์มีขนาดลดลง ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 การเผาแร่โดโลไมท์ (calcine dolomite) นั้น จะเกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลายตัวออกจากโมเลกุลของแร่ได้หมด โดยมีค่า %Weight loss on calcinations ตามทฤษฎีเท่ากับร้อยละ 47.72 ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ขนาด 200 เมช มาทำการทดลองตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องมาจากการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในโมเลกุลของแร่โดโลไมท์ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า %Weight loss on calcinations ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 46.23 อีกทั้งถ้าทำการบดอนุภาคของแร่โดโลไมท์ให้ละเอียดเพิ่มขึ้นต้นทุนในการบดจะสูงขึ้นโดยไม่จำเป็นเพราะฉะนั้นจึงเลือกแคลไซต์โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาค 200 เมช มาทำปฏิกิริยากับตัวอย่างน้ำขมและแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแคลไซต์โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาค 200 เมช

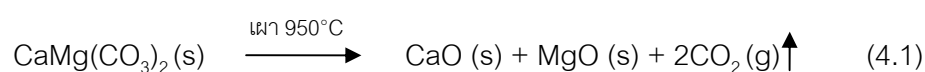
จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวอย่างโดโลไมท์ก่อนเผาและโดโลไมท์หลังเผา (calcine dolomite) ที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 200 เมช โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แสดงการเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบของโดโลไมท์และแคลไซต์โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาค 200 เมช

องค์ประกอบธาตุ	Dolomite (wt%)	Calcined dolomite (wt%)
Mg	10.54	20.35
Ca	25.32	35.24
Al	<0.01	0.02
Si	0.05	0.08
S	0.01	0.02
Fe	0.04	0.12
%weight loss on calcination	-	46.23%

\* ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculation"

จากตาราง การเผาโดยใช้ความร้อนสูงจะส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สลายตัวออกจากโมเลกุลของแร่โดโลไมท์เหลือเป็นแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์อิสระ ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกใช้แคลไซต์โดโลไมท์มาทดลองทำปฏิกิริยากับตัวอย่างน้ำขมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทรเพื่อเปรียบเทียบกับแคลไซต์โดโลไมท์ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น สมการแสดงปฏิกิริยาเคมีของการแคลไซต์โดโลไมท์ แสดงดังสมการที่ 4.1



### 4.3 ผลการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษาการเกิดตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในรูปแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นอาจแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ในส่วนแรกจะทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคลเซียมต่อแมกนีเซียม (Ca:Mg) ในการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (%Recovery of magnesium hydroxide) และในส่วนที่สองจะทำการศึกษาลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซน์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมโดยเปรียบเทียบกับลักษณะของตะกอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซน์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca:Mg) โดยรายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (%Recovery of magnesium hydroxide)

- ก. ผลการศึกษาร้อยละของการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมและแคลไซน์โดโลไมท์เปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์

การคำนวณหาร้อยละของการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (%Recovery of magnesium hydroxide) จากน้ำขมและแคลไซน์โดโลไมท์สามารถคำนวณหา %Recovery ได้จากสมการที่ 4.2

$$\% \text{Recovery of } \text{Mg}(\text{OH})_2 \text{ from brine and calcine dolomite} = \frac{\text{Mg precipitate}}{\text{Total Mg}} \times 100 \quad (4.2)$$

ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** แสดงปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และร้อยละของการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมจากน้ำขมและแคลไซต์โดโลไมท์เปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์

สาร	อัตราส่วน Ca : Mg	Total Mg (wt%)	Mg precipitate (wt%)	Recovery of Mg from brine + calcined dolomite
น้ำขม	1 : 1	35.24	32.43	92%
	1 : 2	70.48	30.20	43%
	2 : 1	35.24	31.24	89%
MgCl <sub>2</sub>	1 : 1	35.24	31.56	90%
	1 : 2	70.48	29.80	42%
	2 : 1	35.24	30.97	88%

ข. ผลการศึกษาร้อยละของการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำขมเปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์

การคำนวณหาร้อยละของการเก็บกลับคืนตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (%Recovery of magnesium hydroxide) จากน้ำขมสามารถคำนวณหา %Recovery ได้จากสมการที่ 4.3

$$\% \text{Recovery of Mg(OH)}_2 \text{ from brine} = \frac{Mg_{\text{เริ่มต้น}} - Mg_{\text{ที่เหลือ}}}{Mg_{\text{เริ่มต้น}}} \times 100 \quad (4.3)$$

ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

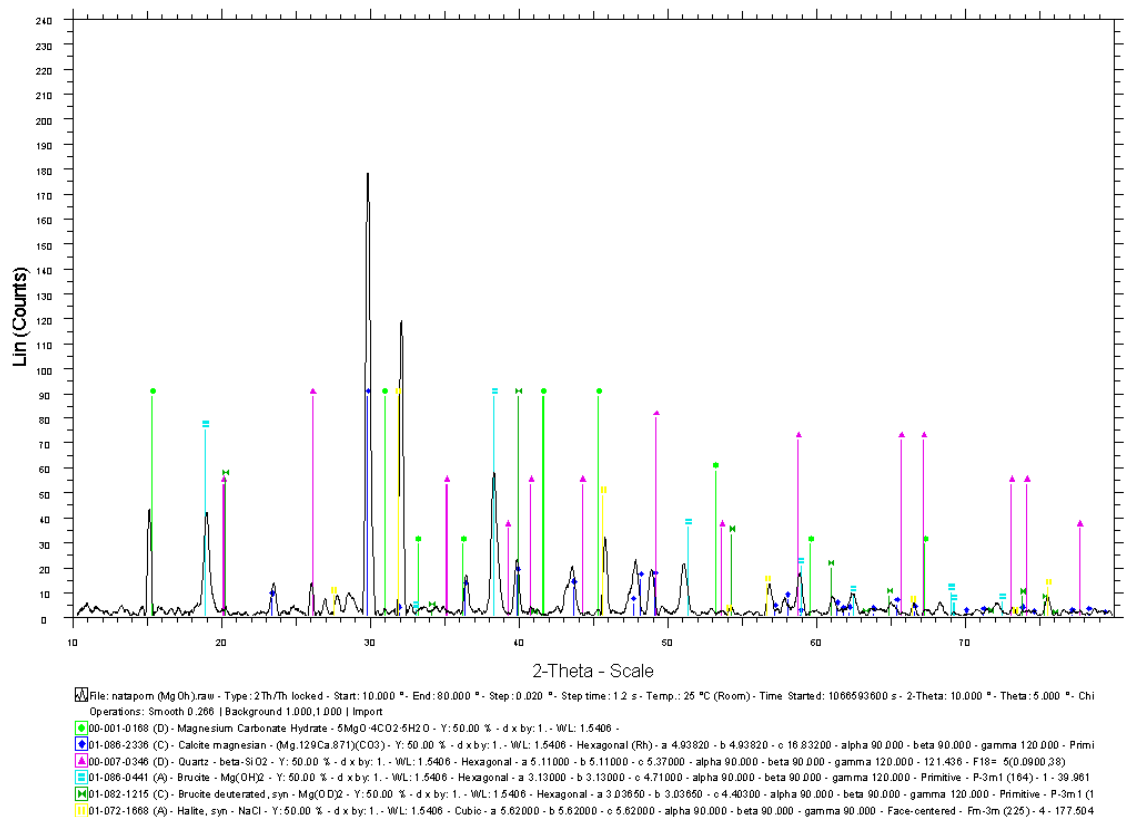
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และร้อยละของการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมจากน้ำขมเปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์

สาร	อัตราส่วน Ca : Mg	Mg เริ่มต้น (wt%)	Mg ที่เหลือในน้ำ (wt%)	Recovery of Mg from brine
น้ำขม	1 : 1	14.89	2.02	86%
	1 : 2	50.13	21.06	58%
	2 : 1	1.00	0.19	81%
MgCl <sub>2</sub>	1 : 1	14.89	2.43	84%
	1 : 2	50.13	22.05	56%
	2 : 1	1.00	0.20	80%

4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมโดยเปรียบเทียบกับลักษณะของตะกอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1

#### 4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขม โดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction (XRD) พบว่า ในตะกอนมีองค์ประกอบหลักของแร่เป็นแคลไซต์แมกนีเซียม (calcite magnesium), แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรต (magnesium carbonate hydrate) และแร่รูไซต์หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)<sub>2</sub>) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

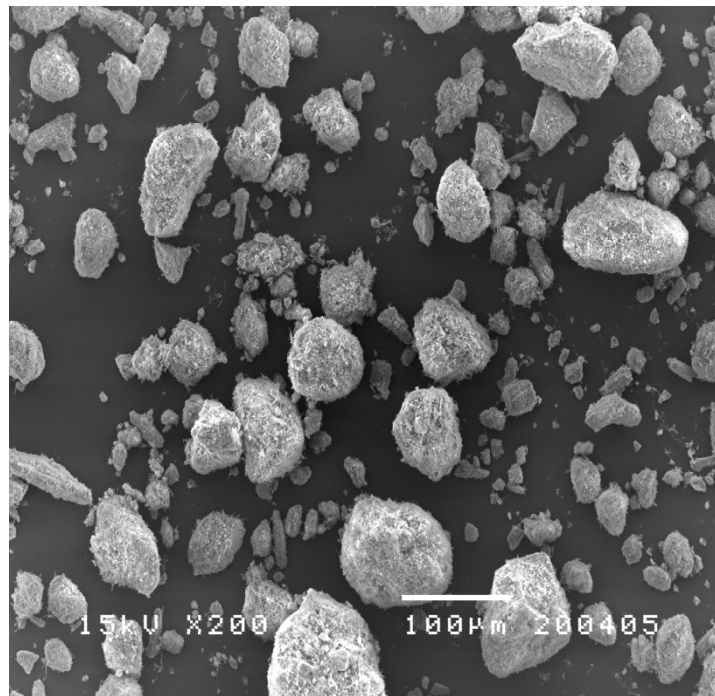


ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction

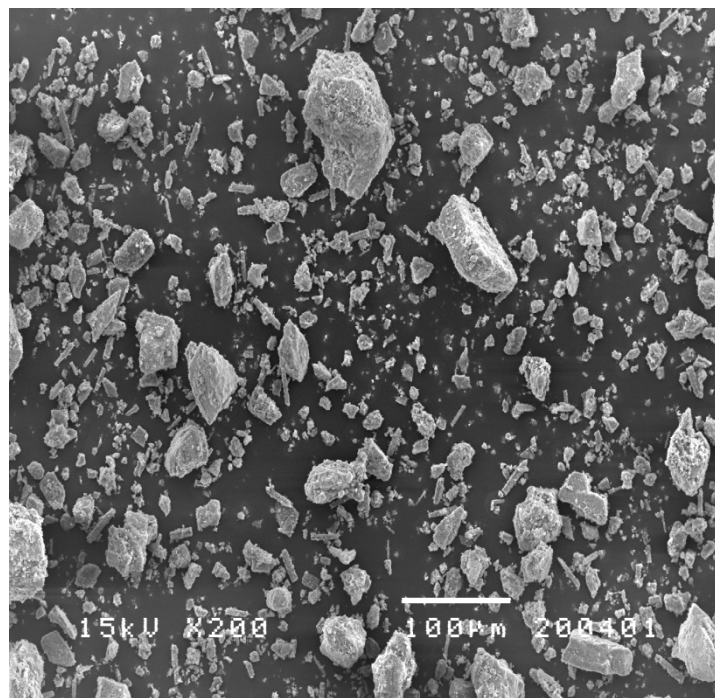
#### 4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

จากการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (scanning electron microscope) หรือ SEM พบว่า ลักษณะของตะกอนตะกอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมมีรูปร่างไม่แน่นอน (amorphous) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นและเส้นใยอยู่รวมกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของตะกอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ พบว่า มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombohedron) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นเรียงตัวรวมตัวกัน เรียกลักษณะของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แบบนี้ว่า ผลึกแบบปฐมภูมิ (primary crystal) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ (hexagonal thin plate) หรือที่เรียกว่า บรูไซต์ (brucite) แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

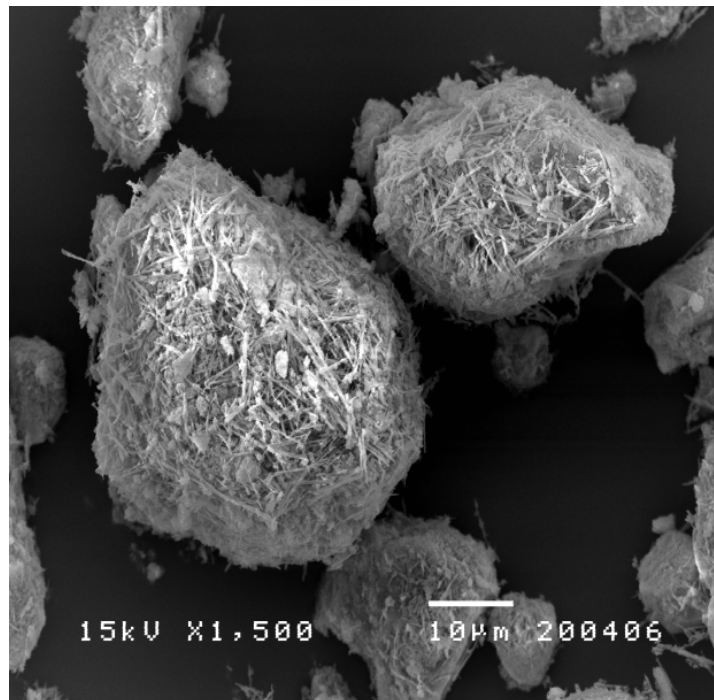




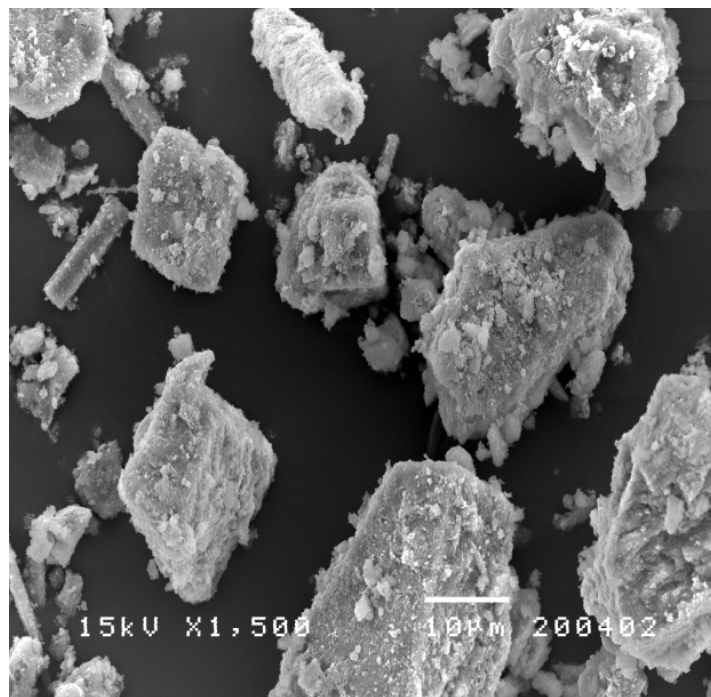
ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 200 เท่า



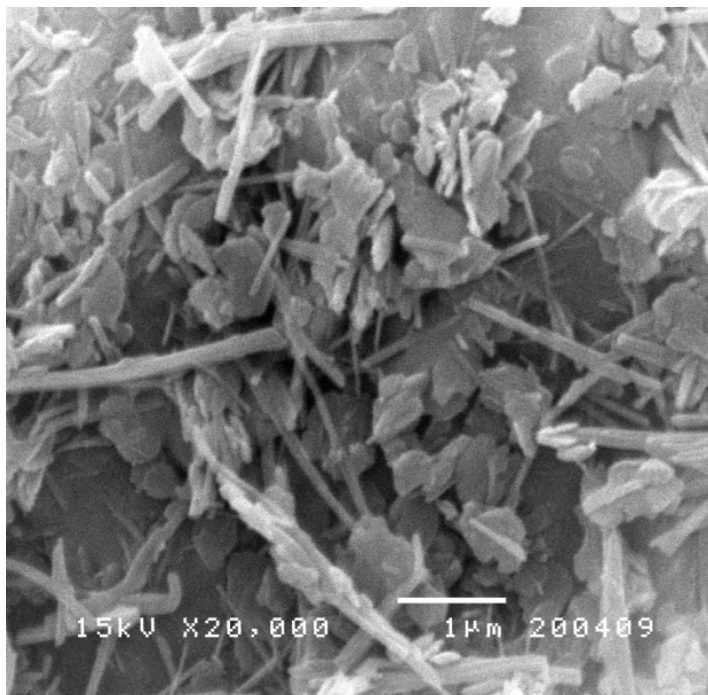
ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 200 เท่า



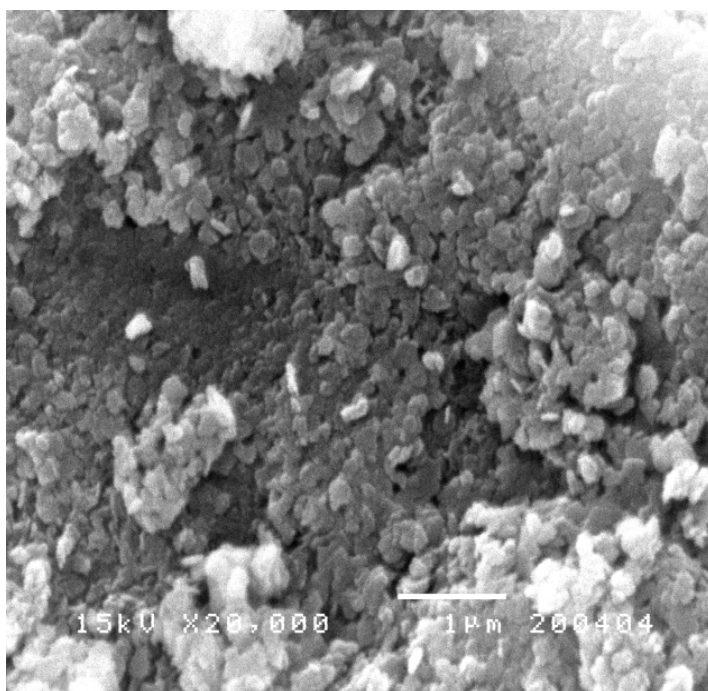
ภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



ภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำขมที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



ภาพที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 อภิปรายสรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการศึกษาพฤติกรรมการแยกสกัดและเก็บกลับคืน  
โดยเก็บตัวอย่าง  
น้ำขมเหลือทิ้งจากการผลิตเกลือสมุทร ซึ่งจะขอสรุปผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง ผลของขนาดอนุภาคแร่โดโลไมท์ที่มีผลต่อการสลายตัวของอุณหภูมิ 950 องศา พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของโดโลไมท์มีขนาดลดลง ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (%weight loss on calcinations) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากทฤษฎี การเผาแร่โดโลไมท์ (calcine dolomite) จะเกิดการเผาได้สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลายตัวออกจากโมเลกุลของแร่ได้หมด โดยค่า %Weight loss on calcinations ตามทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 47.72% ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคของโดโลไมท์ที่ 200 เมชหรือ 74 ไมครอน เหมาะสมที่สุดต่อการสลายตัวของแร่โดโลไมท์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากมีค่า %weight loss on calcinations เท่ากับร้อยละ 46.23 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎีมากที่สุดและถ้าทำการอบให้ละเอียดไปกว่านี้จะเป็นการเพิ่มต้นทุนโดยไม่จำเป็นเพราะฉะนั้นจึงเลือกแคลไซต์โดโลไมท์ที่ขนาดอนุภาคดังกล่าว มาทำปฏิกิริยากับตัวอย่างน้ำขมและแมกนีเซียมคลอไรด์สังเคราะห์เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ส่วนที่สองอัตราส่วน Ca:Mg ที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 2:1 เหมาะสมที่สุดในการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมจากแคลไซต์โดโลไมท์และน้ำขม โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์พบว่าการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมได้มากกว่า ซึ่งทั้งนี้ปริมาณแมกนีเซียมจากตะกอนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลไซต์โดโลไมท์ และพบว่า ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1 สามารถเก็บกลับคืนแมกนีเซียมจากน้ำขมได้มากที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์พบว่าการเก็บกลับคืนแมกนีเซียมได้มากกว่า

ส่วนที่สามลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่า ตะกอน  
กับแคลไซต์โดโลไมท์มีลักษณะ  
ของการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐมภูมิ (Primary crystal) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการนำผลการศึกษาวิจัยไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมโดยการนำเครื่องมือและอุปกรณ์ไปติดตั้งในนาเกลือเพื่อทำการรีไซเคิลแร่ธาตุที่มีประโยชน์ออกมาจากน้ำขมเหลือทิ้งนั้น ควรมีการพิจารณาตัวแปรต่างๆอย่างละเอียด เช่น เวลาในการตกตะกอน คุณภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเร็วรอบในการปั่นกววน เป็นต้น เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเชิงระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงควรปรับตัวแปรต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์. 2553. การเก็บกลับคืนทรัพยากรและการนำกลับมาใช้ใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยนันต์ แห่งทอง. การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญา. วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ภิญโญ มีชำนะ. 2550. เอกสารประกอบการเรียน รายวิชา Mineral and Processing Engineering. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนูดี หังสพฤกษ์. สมุทรศาสตร์เคมี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
- รณพีร์ ยอดสุวรรณ. การเร่งระเหยของน้ำเกลือในการทำนาเกลือด้วยหัวฉีดแบบสเปรย์. วิทยานิพนธ์ปริญญา. วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

## ภาษาอังกฤษ

- Alamdari, A., Rahimpour, M.R., Esfandiari, N. and Nourafkan, E. 2008. Kinetics of magnesium hydroxide precipitation from sea bittern. Chemical Engineering and Processing 47: 215–221.
- Al-Mutaz, I.S. and Wagialia, K.M. 1990. Production of magnesium from desalination brine. Resources Conservation and Recycling 3: 231-239.
- Carson, R.C. and Simandl, J. 1993. Technical note Kinetics of magnesium hydroxide precipitation from seawater using slaked dolomite. Minerals Engineering 7: 511-517.
- Epstein, J.A., Altaras, D., Feist, E.M. and Rosenzweig, J. 1975. The recovery of potassium chloride from dead sea brines by precipitation and solvent extraction. Hydrometallurgy 1: 39-50.
- Halmann, H., Frei, A. and Steinfeld, A. 2008. Magnesium Production by the Pidgeon Process Involving Dolomite Calcination and MgO Silicothermic Reduction: Thermodynamic and Environmental Analyses. Industry Engineering Chemical and Resource 20: 2147-2154.
- Kilic, O. and Kilic, A.M. 2005. Recovery of salt co productions during the salt production from brine. Desalination 186: 11-19.
- Lartey, R.B. Recovery of applied science and technology. Journal of Applied and Technology 2: 77-84.
- Shorter Communication. 1996. Prediction the rate of thermal decomposition of dolomite. Chemical Engineering Science 51: 5229-5232.
- Wiedmann, H.G. and Bayer, G. 1987. Note of the thermal decomposition of dolomite. Thermochimica Acta 7: 479 – 485.
- Wilson T.R.S. 1975. The major constituents of seawater. Chemical Oceanography 2: 365-413.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ก.1. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำขมด้วยเครื่อง ICP Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพฯ 10330	เลขที่รายงาน : C0115/12 วันที่รายงาน : 23 กุมภาพันธ์ 2555 รหัสตัวอย่าง : I20320C-1 หน้าที่.....1.....ของจำนวน.....1.....หน้า
---	---

----- เริ่มรายงาน -----

### รายงานการทดสอบ

ชื่อผู้ขอรับบริการ : นางสาวณัฐพร สุขพลอย  
 ที่อยู่ผู้ขอรับบริการ : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

ชื่อตัวอย่าง: Sample 1 น้ำขม บรจุในขวดพลาสติกปิดสนิท

ผู้ส่งตัวอย่าง: ผู้ส่งตัวอย่างเป็นผู้ส่งตัวอย่าง  
 วันที่รับตัวอย่าง: 17 กุมภาพันธ์ 2555  
 วันที่เริ่มทดสอบ: 21 กุมภาพันธ์ 2555

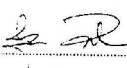
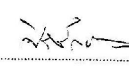
#### ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผล (หน่วย)	วิธีทดสอบ
โซเดียม (Na)	98,700.00 mg/L	APHA, AWWA, WEF:2005, 3120B, 3030F
แมกนีเซียม (Mg)	16,350.00 mg/L	
คลอไรด์ (Cl)	94.28 mg/L	Mohr's Method
ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	95.87 mg/L	Turbidmetric Method

หมายเหตุ :-

----- สิ้นสุดรายงาน -----

อนุมัติ โดย

ลงชื่อ ..... กจ. กัท ..... (นางสาวกานติกา สิทธิเหล่าถาวร) ผู้จัดการด้านวิชาการ ห้องปฏิบัติการเคมี	ลงชื่อ  (รองศาสตราจารย์ ดร.ดูเมจ ตันตระเชียร) รองผู้อำนวยการ	ลงชื่อ  (รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ก๊กผล) ผู้อำนวยการ
--	---	--

ผลการทดสอบนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น  
 ห้ามนำรายงานการทดสอบนี้ไปประกาศโฆษณาและต้องไม่ถูกทำสำเนา (ยกเว้นทำทั้งฉบับ)  
 โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

F-QM-0031/R01

ก.2. ผลการวิเคราะห์โดโลไมท์และแคลไซต์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง : ผงสีเทา  
 เจ้าของตัวอย่าง : คุณณัฐพร สุขพลอย  
 ภาควิชาเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ  
 วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry  
 เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometer, Philips model PW2400  
 ผู้วิเคราะห์ : นายสมบูรณ์ เจริญภูมิการกิจ  
 วันที่วิเคราะห์ : 10 กุมภาพันธ์ 2555  
 ผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)*					
	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
Dolomite	10.54	<0.01	0.05	0.01	25.32	0.04
Calcined Dolomite 950°C	18.35	0.09	0.08	0.02	49.24	0.12

\* ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculations"

ก.3. ผลการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

ก.3.1 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1

3/27/12 09:58		Page1			
Chulalongkorn University					
Quantified peaks in c:\superq\data\55089201.pks					
<b>Summary of results</b>					
Sample:	55089201	No. 1			
Measured:	3/8/12 14:11				
Quantified:	3/27/12 09:57				
Sum:	100.0%				
RMS:	0.000				
Used lines:	8				
Traces:	P Sr				
Qual. Program:	SemiQ2004				
<b>Concentrations</b>					
Analyte	Type	Calibration Status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH)2	32.434	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	0.046	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.158	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO3	0.025	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	3.298	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	35.994	Calibrated
Na	Sample	Calibrated	Na2O	8.031	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.076	Calibrated
<b>Sample preparation</b>					
Sample type:	pressed powder				
Area ratio:	1.11				
Additive/sample:	0				
Film:	None				
Normalise:	to 100.0%				
X-ray path:	Vacuum				
<b>Quantify parameters</b>					
Recipe:	c:\superq\data\new.req				
Spectrometer resp.file:	c:\superq\data\semiq.sti				
Use compound list:	c:\superq\example\semiq.cpl				
Apply drift corr:	No				
Disall. elem.set:	None				
Disall. lines set:	None				
Error weighting:	Root				
Max. Flow detector intensity:	2000 keps				
Max. Sealed detector intensity:	1000 keps				
Max. Scint detector intensity:	1000 keps				
Max. Duplex detector intensity:	3000 keps				
<b>Disallowed elements</b>					
No elements disallowed					
<b>Disallowed lines</b>					
No lines disallowed					

ก.3.2 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:2

Analyte	Type	Calibration Status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH) <sub>2</sub>	30.204	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.023	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO <sub>2</sub>	0.758	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO <sub>3</sub>	0.013	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	4.988	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	33.514	Calibrated
Na	Sample	Calibrated	Na <sub>2</sub> O	7.121	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.020	Calibrated

3/27/12 09:58 Page1

Chulalongkorn University  
Quantified peaks in c:\superq\data\55089202.pls

**Summary of results**  
**Sample:** 55089202 No.2  
**Measured:** 3/8/12 14:33  
**Quantified:** 3/27/12 09:58  
**Sum:** 100.0%  
**RMS:** 0.000  
**Used lines:** 9  
**Traces:** P Sr Cu Zn  
**Qual. Program:** SemiQ2004

**Concentrations**

**Sample preparation**  
**Sample type:** pressed powder  
**Area ratio:** 1.10  
**Additive/sample:** 0  
**Film:** None  
**Normalise:** to 100.0%  
**X-ray path:** Vacuum

**Quantify parameters**  
**Recipe:** c:\superq\data\new.req  
**Spectrometer resp.file:** c:\superq\data\semiq.sti  
**Use compound list:** c:\superq\example\semiq.cpl  
**Apply drift corr:** No  
**Disall. elem.set:** None  
**Disall. lines set:** None  
**Error weighting:** Root  
**Max. Flow detector intensity:** 2000 keps  
**Max. Sealed detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Scint detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Duplex detector intensity:** 3000 keps

**Disallowed elements**  
No elements disallowed

**Disallowed lines**  
No lines disallowed

ก.3.3 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 2:1

3/27/12 09:58		Page1			
Chulalongkorn University					
Quantified peaks in c:\superq\data\55089203.pks					
Summary of results					
Sample:	55089203	No.3			
Measured:	3/8/12 15:03				
Quantified:	3/27/12 09:59				
Sum:	100.0%				
RMS:	0.000				
Used lines:	10				
Traces:	Zn				
Qual. Program:	SemiQ2004				
Concentrations					
Analyte	Type	Calibration Status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH)2	31.242	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	0.101	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.204	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO3	0.011	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	5.870	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	34.454	Calibrated
Na	Sample	Calibrated	Na2O	8.031	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.090	Calibrated
Sample preparation					
Sample type:	pressed powder				
Area ratio:	0.98				
Additive/sample:	0				
Film:	None				
Normalise:	to 100.0%				
X-ray path:	Vacuum				
Quantify parameters					
Recipe:	c:\superq\data\new.req				
Spectrometer resp.file:	c:\superq\data\semi.q.sti				
Use compound list:	c:\superq\example\semi.q.cpl				
Apply drift corr:	No				
Disall. elem.set:	None				
Disall. lines set:	None				
Error weighting:	Root				
Max. Flow detector intensity:	2000 keps				
Max. Scaled detector intensity:	1000 keps				
Max. Scint detector intensity:	1000 keps				
Max. Duplex detector intensity:	3000 keps				
Disallowed elements					
No elements disallowed					
Disallowed lines					

ก.3.4 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1

Analyte	Type	Calibration Status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH)2	31.562	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	0.033	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.214	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO3	0.025	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	5.751	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	33.002	Calibrated
Mn	Sample	Calibrated	MnO2	0.048	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.012	Calibrated

3/27/12 09:58 Page 1

Chulalongkorn University  
Quantified peaks in c:\superq\data\55089204.pks

**Summary of results**  
**Sample:** 55089204 No.4  
**Measured:** 3/8/12 15:23  
**Quantified:** 3/27/12 10:00  
**Sum:** 100.0%  
**RMS:** 0.000  
**Used lines:** 11  
**Traces:** P Sr  
**Qual. Program:** SemiQ2004

**Concentrations**

**Sample preparation**  
**Sample type:** pressed powder  
**Area ratio:** 1.13  
**Additive/sample:** 0  
**Film:** None  
**Normalise:** to 100.0%  
**X-ray path:** Vacuum

**Quantify parameters**  
**Recipe:** c:\superq\data\new.req  
**Spectrometer resp.file:** c:\superq\data\semiq.sti  
**Use compound list:** c:\superq\example\semiq.cpl  
**Apply drift corr:** No  
**Disall. elem.set:** None  
**Disall. lines set:** None  
**Error weighting:** Root  
**Max. Flow detector intensity:** 2000 keps  
**Max. Sealed detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Scint detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Duplex detector intensity:** 3000 keps

**Disallowed elements**  
No elements disallowed

**Disallowed lines**  
No lines disallowed

ก.3.5 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:2

Analyte	Type	Calibration Status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH) <sub>2</sub>	29.801	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.021	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO <sub>2</sub>	0.459	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO <sub>3</sub>	0.048	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	4.590	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	30.987	Calibrated
Mn	Sample	Calibrated	MnO <sub>2</sub>	0.059	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.019	Calibrated

3/27/12 09:58 Page1

Chulalongkorn University  
Quantified peaks in c:\superq\data\55089205.pls

**Summary of results**  
**Sample:** 55089205 No.5  
**Measured:** 3/8/12 15:45  
**Quantified:** 3/27/12 10:01  
**Sum:** 100.0%  
**RMS:** 0.000  
**Used lines:** 12  
**Traces:** Zn  
**Qual. Program:** SemiQ2004

**Concentrations**

**Sample preparation**  
**Sample type:** pressed powder  
**Area ratio:** 0.97  
**Additive/sample:** 0  
**Film:** None  
**Normalise:** to 100.0%  
**X-ray path:** Vacuum

**Quantify parameters**  
**Recipe:** c:\superq\data\new.req  
**Spectrometer resp.file:** c:\superq\data\semiq.sti  
**Use compound list:** c:\superq\example\semiq.cpl  
**Apply drift corr:** No  
**Disall. elem.set:** None  
**Disall. lines set:** None  
**Error weighting:** Root  
**Max. Flow detector intensity:** 2000 keps  
**Max. Sealed detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Scint detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Duplex detector intensity:** 3000 keps

**Disallowed elements**  
No elements disallowed

**Disallowed lines**  
No lines disallowed



ก.3.6 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 2:1

3/27/12 09:58

Page1

Chulalongkorn University  
Quantified peaks in c:\superq\data\55089206.pks

## Summary of results

**Sample:** 55089206 No.6  
**Measured:** 3/8/12 16:05  
**Quantified:** 3/27/12 10:02  
**Sum:** 100.0%  
**RMS:** 0.000  
**Used lines:** 13  
**Traces:** P Sr Cu Zn  
**Qual. Program:** SemiQ2004

Analyte	Type	Concentrations		Concentration (%)	Calculation method
		Calibration Status	Compound		
Mg	Sample	Calibrated	Mg(OH)2	30.974	Calibrated
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	0.056	Calibrated
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.312	Calibrated
S	Sample	Calibrated	SO3	0.032	Calibrated
Cl	Sample	Calibrated	Cl	5.743	Calibrated
Ca	Sample	Calibrated	CaO	31.396	Calibrated
Mn	Sample	Calibrated	MnO2	0.049	Calibrated
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.028	Calibrated

## Sample preparation

**Sample type:** pressed powder  
**Area ratio:** 0.99  
**Additive/sample:** 0  
**Film:** None  
**Normalise:** to 100.0%  
**X-ray path:** Vacuum

## Quantify parameters

**Recipe:** c:\superq\data\new.req  
**Spectrometer resp.file:** c:\superq\data\semiq.sti  
**Use compound list:** c:\superq\example\semiq.cpl  
**Apply drift corr:** No  
**Disall. elem.set:** None  
**Disall. lines set:** None  
**Error weighting:** Root  
**Max. Flow detector intensity:** 2000 keps  
**Max. Sealed detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Scint detector intensity:** 1000 keps  
**Max. Duplex detector intensity:** 3000 keps

## Disallowed elements

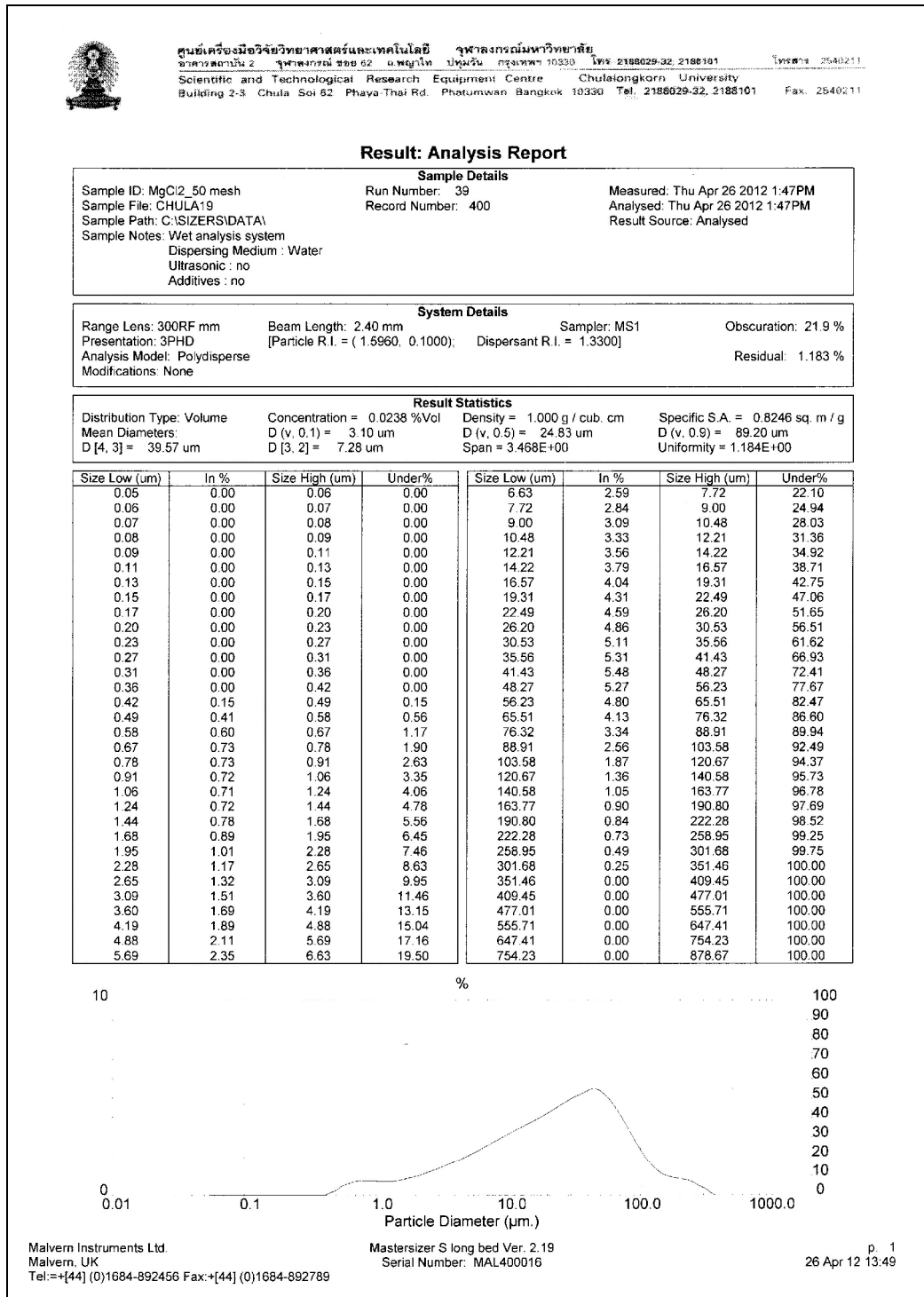
No elements disallowed

## Disallowed lines

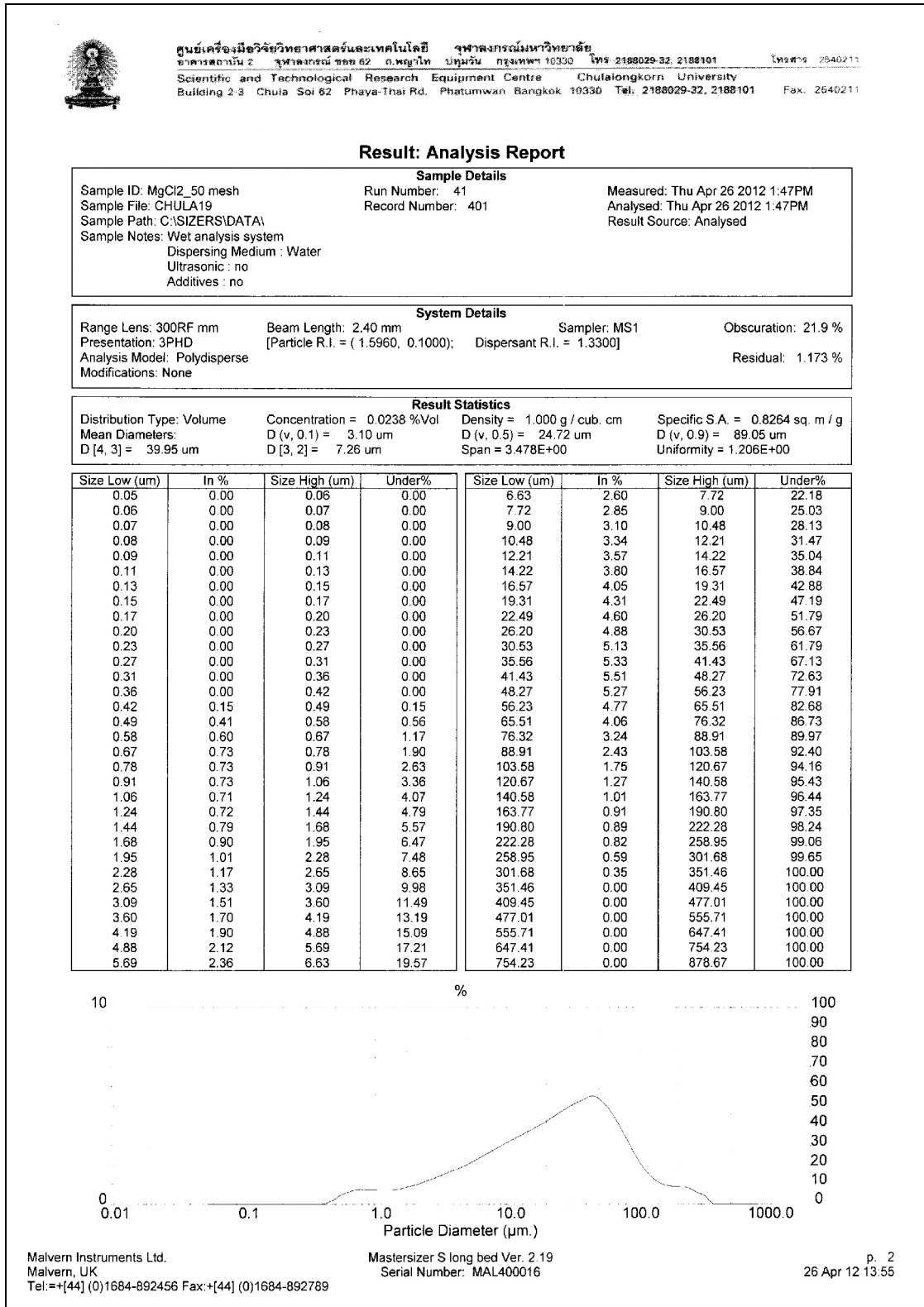
No lines disallowed

ก.4. ผลการวิเคราะห์ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง Laser particle size analyzer

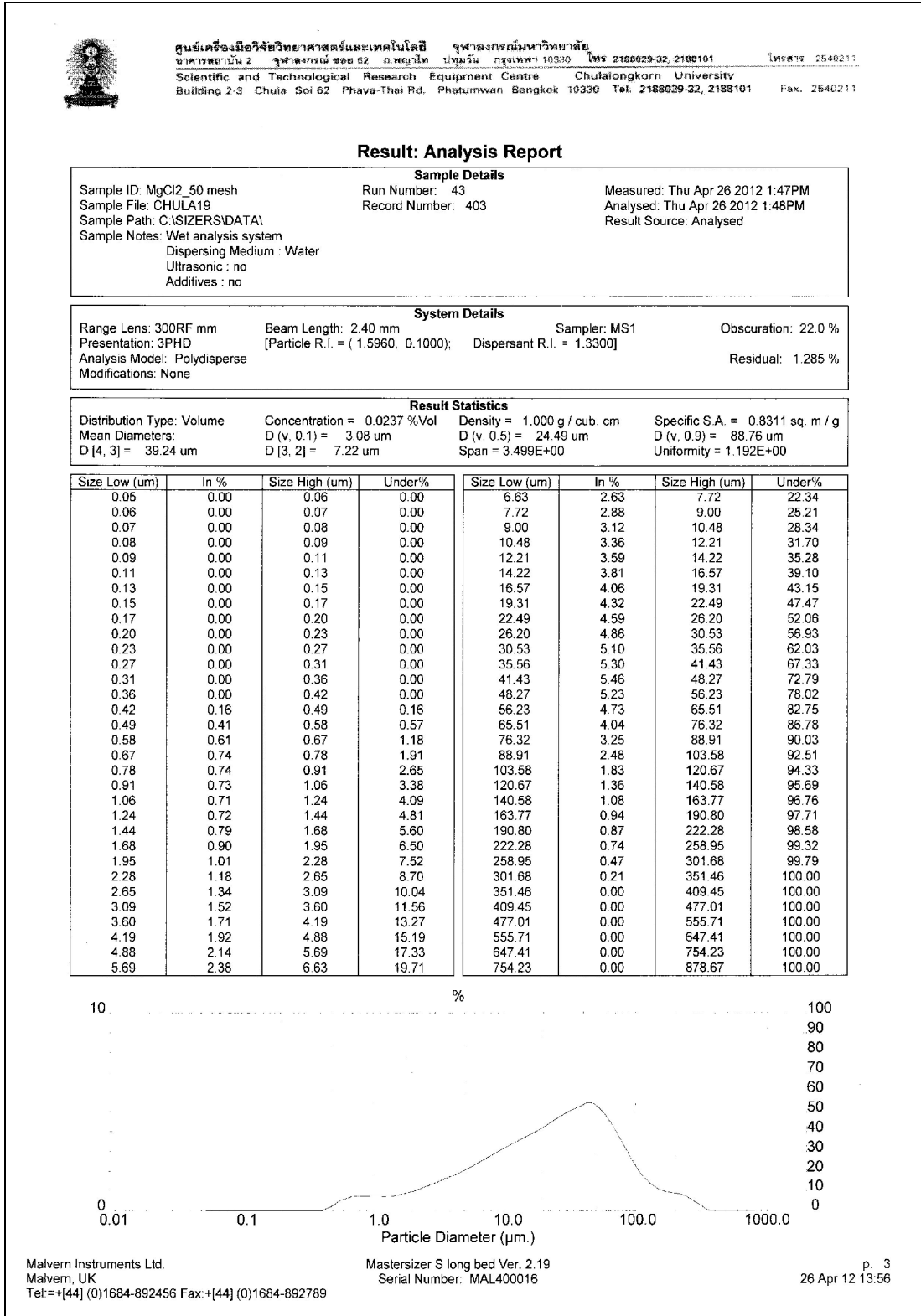
ก.4.1 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1



ก.4.2 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลาย  
แมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:2



ก.4.3 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 2:1



ก.4.4 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:1



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 อ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211  
Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University  
Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

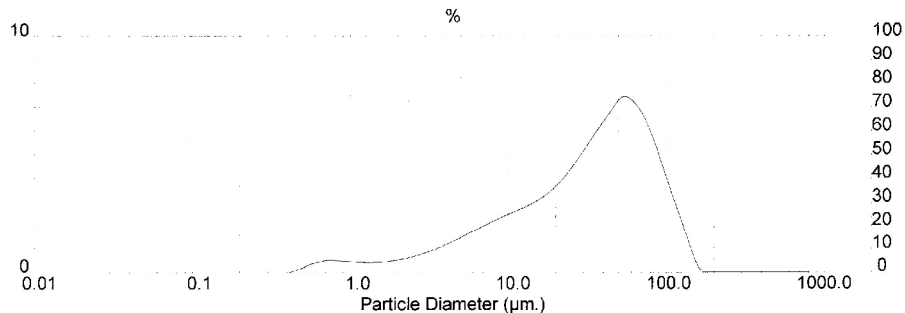
**Result: Analysis Report**

Sample Details		
Sample ID: MgCl2_100 mesh	Run Number: 8	Measured: Thu Apr 26 2012 1:53PM
Sample File: CHULA19	Record Number: 413	Analysed: Thu Apr 26 2012 1:53PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system		
Dispersing Medium : Water		
Ultrasonic : no		
Additives : no		


System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.3 %
Presentation: 3PHD	[Particle R.I. = ( 1.5960, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.544 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0175 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.6019 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 5.08 um	D (v, 0.5) = 35.57 um	D (v, 0.9) = 88.75 um
D [4, 3] = 41.86 um	D [3, 2] = 9.97 um	Span = 2.352E+00	Uniformity = 7.400E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	2.01	7.72	14.95
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	2.23	9.00	17.18
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	2.44	10.48	19.62
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	2.63	12.21	22.25
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	2.83	14.22	25.08
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	3.06	16.57	28.14
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.36	19.31	31.50
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	3.77	22.49	35.27
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	4.28	26.20	39.55
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	4.89	30.53	44.44
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	5.55	35.56	49.99
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	6.20	41.43	56.20
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	6.81	48.27	63.01
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	7.38	56.23	70.40
0.42	0.11	0.49	0.11	56.23	7.28	65.51	77.67
0.49	0.30	0.58	0.41	65.51	6.69	76.32	84.37
0.58	0.44	0.67	0.85	76.32	5.69	88.91	90.06
0.67	0.52	0.78	1.37	88.91	4.41	103.58	94.47
0.78	0.50	0.91	1.87	103.58	3.13	120.67	97.60
0.91	0.48	1.06	2.35	120.67	1.84	140.58	99.44
1.06	0.45	1.24	2.80	140.58	0.56	163.77	100.00
1.24	0.43	1.44	3.23	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.45	1.68	3.69	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.50	1.95	4.18	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.57	2.28	4.75	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.67	2.65	5.42	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.79	3.09	6.22	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.95	3.60	7.17	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	1.13	4.19	8.29	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	1.33	4.88	9.62	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	1.55	5.69	11.17	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	1.78	6.63	12.94	754.23	0.00	878.67	100.00



ก.4.5 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 1:2



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี    จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาน 2    จุฬาลงกรณ์ ซอย 62    ถนนพญาไท    ปทุมวัน    กรุงเทพฯ 10330    โทร 2188029-32, 2188103    โทรสาร 2540211  
Scientific and Technological Research Equipment Centre    Chulalongkorn University  
Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel: 2188029-32, 2188103    Fax: 2540211

### Result: Analysis Report

**Sample Details**

Sample ID: MgCl2_100 mesh	Run Number: 8	Measured: Thu Apr 26 2012 1:53PM
Sample File: CHULA19	Record Number: 413	Analysed: Thu Apr 26 2012 1:53PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system		
Dispersing Medium : Water		
Ultrasonic : no		
Additives : no		

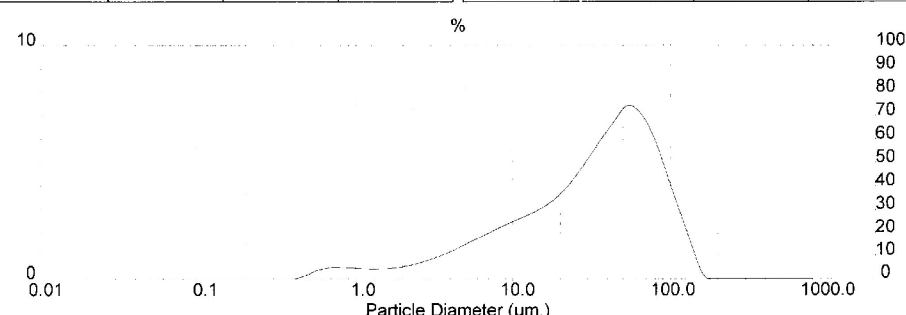
**System Details**

Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.3 %
Presentation: 3PHD	[Particle R.I. = (1.5960, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.544 %
Modifications: None			

**Result Statistics**

Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0175 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.6019 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 5.08 um	D (v, 0.5) = 35.57 um	D (v, 0.9) = 88.75 um
D [4, 3] = 41.86 um	D [3, 2] = 9.97 um	Span = 2.352E+00	Uniformity = 7.400E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	2.01	7.72	14.95
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	2.23	9.00	17.18
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	2.44	10.48	19.62
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	2.63	12.21	22.25
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	2.83	14.22	25.08
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	3.06	16.57	28.14
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.36	19.31	31.50
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	3.77	22.49	35.27
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	4.28	26.20	39.55
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	4.89	30.53	44.44
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	5.55	35.56	49.99
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	6.20	41.43	56.20
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	6.81	48.27	63.01
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	7.38	56.23	70.40
0.42	0.11	0.49	0.11	56.23	7.28	65.51	77.67
0.49	0.30	0.58	0.41	65.51	6.69	76.32	84.37
0.58	0.44	0.67	0.85	76.32	5.69	88.91	90.06
0.67	0.52	0.78	1.37	88.91	4.41	103.58	94.47
0.78	0.50	0.91	1.87	103.58	3.13	120.67	97.60
0.91	0.48	1.06	2.35	120.67	1.84	140.58	99.44
1.06	0.45	1.24	2.80	140.58	0.56	163.77	100.00
1.24	0.43	1.44	3.23	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.45	1.68	3.69	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.50	1.95	4.18	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.57	2.28	4.75	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.67	2.65	5.42	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.79	3.09	6.22	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.95	3.60	7.17	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	1.13	4.19	8.29	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	1.33	4.88	9.62	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	1.55	5.69	11.17	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	1.78	6.63	12.94	754.23	0.00	878.67	100.00




Malvern Instruments Ltd.  
Malvern, UK  
Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19  
Serial Number: MAL400016

p. 5  
26 Apr 12 13:56

ก.4.6 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลไซต์โดโลไมท์กับตัวอย่างน้ำนม  
ที่อัตราส่วน Ca:Mg เท่ากับ 2:1



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211  
Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University  
Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel: 2188029-32; 2188101 Fax: 2640211

### Result: Analysis Report

Sample Details

Sample ID: MgCl2_100 mesh	Run Number: 9	Measured: Thu Apr 26 2012 1:54PM
Sample File: CHULA19	Record Number: 414	Analysed: Thu Apr 26 2012 1:54PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system		
Dispersing Medium : Water		
Ultrasonic : no		
Additives : no		

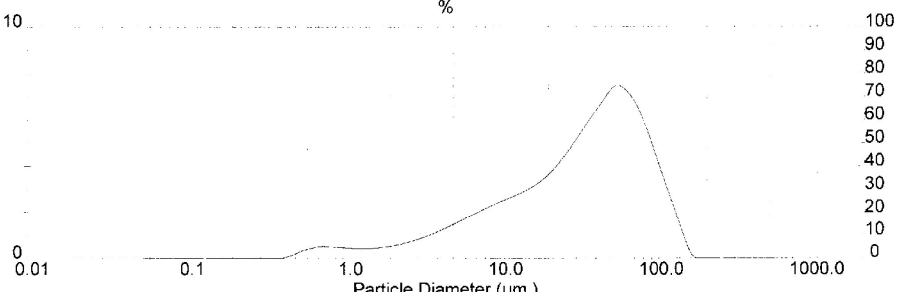
System Details

Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.2 %
Presentation: 3PHD	[Particle R.I. = ( 1.5960, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.539 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics

Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0174 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.6004 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 5.10 um	D (v, 0.5) = 35.68 um	D (v, 0.9) = 88.64 um
D [4, 3] = 41.88 um	D [3, 2] = 9.99 um	Span = 2.342E+00	Uniformity = 7.367E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	2.01	7.72	14.92
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	2.23	9.00	17.14
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	2.43	10.48	19.58
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	2.62	12.21	22.20
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	2.82	14.22	25.01
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	3.05	16.57	28.06
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.35	19.31	31.41
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	3.75	22.49	35.16
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	4.27	26.20	39.43
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	4.89	30.53	44.32
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	5.56	35.56	49.87
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	6.22	41.43	56.09
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	6.84	48.27	62.93
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	7.42	56.23	70.35
0.42	0.11	0.49	0.11	56.23	7.31	65.51	77.67
0.49	0.30	0.58	0.41	65.51	6.72	76.32	84.39
0.58	0.44	0.67	0.85	76.32	5.71	88.91	90.10
0.67	0.52	0.78	1.37	88.91	4.42	103.58	94.52
0.78	0.50	0.91	1.87	103.58	3.12	120.67	97.64
0.91	0.47	1.06	2.34	120.67	1.83	140.58	99.47
1.06	0.45	1.24	2.79	140.58	0.53	163.77	100.00
1.24	0.43	1.44	3.22	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.45	1.68	3.67	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.50	1.95	4.17	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.57	2.28	4.73	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.67	2.65	5.40	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.79	3.09	6.20	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.95	3.60	7.14	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	1.12	4.19	8.27	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	1.32	4.88	9.59	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	1.54	5.69	11.14	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	1.78	6.63	12.91	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd.  
Malvern, UK  
Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19  
Serial Number: MAL400016

p. 6  
26 Apr 12 13:56

ภาคผนวก ข

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



### ข.1. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

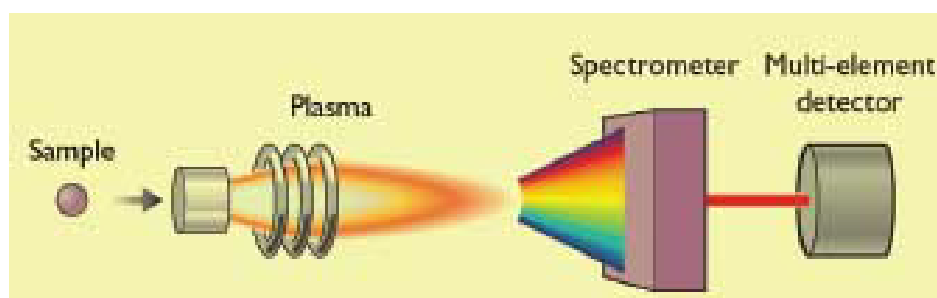
การตรวจวัดปริมาณไอออนของโลหะที่คงอยู่ในสารละลายสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง ICP-AES spectrometer ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

ICP-AES spectrometer เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุพร้อมกัน (multi-element) โดยใช้พลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียส เผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน ซึ่งจะปล่อยแสงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมา แล้ววัดความเข้มของแสงและ คำนวณเป็นความเข้มข้นของปริมาณธาตุในตัวอย่าง เทคนิคนี้สามารถวัดได้ในระดับ ppb และสามารถวิเคราะห์ธาตุประเภท refractory element ได้ทุกตัว

ICP มี 2 แบบคือ แบบ radial และแบบ axial โดยแบบ radial จะมีแหล่งกำเนิดพลาสมาอยู่ทางด้านข้างปล่อยผ่านช่องแคบ ที่อยู่ตรงกลางของพลาสมา ส่วนแบบ axial จะวางช่องนี้ในแนวนอน ซึ่งจะทำให้เพิ่ม pathlength และลดสัญญาณรบกวนได้ ผลก็คือ จะได้ detection limit ต่ำกว่าแบบ radial ถึง 5-10 เท่า ปัจจุบันมี ICP ชนิด simultaneous ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันถึง 70 ธาตุ (ในทางทฤษฎี) ได้ในตัวอย่างเดียวกัน โดยใช้เวลาเพียงไม่ถึง 1 นาที โดยไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับค่าความแม่นยำ หรือ detection limit ในขณะที่ ICP แบบ Sequential จะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ 5 ธาตุต่อนาที

#### หลักการของ ICP-AES

จากรูปที่ ข.1 แสดงแผนผังการทำงานของ ICP-AES โดยในรูปได้แสดงถึงแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ใช้เพื่อทำให้ธาตุชนิดต่างๆปล่อยแสงสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะมีสเปกโตรมิเตอร์ทำการแยกแสงเหล่านี้ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุเหล่านั้น



ภาพที่ ข.1 แสดงแผนผังการทำงานของเครื่อง ICP-AES

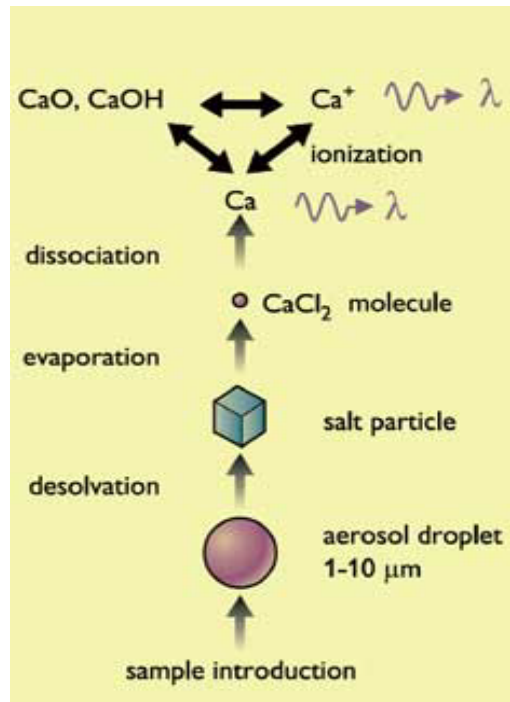
ที่มา: Bradford T. and M. Nicole Cook (2003)

### การเตรียมตัวอย่าง

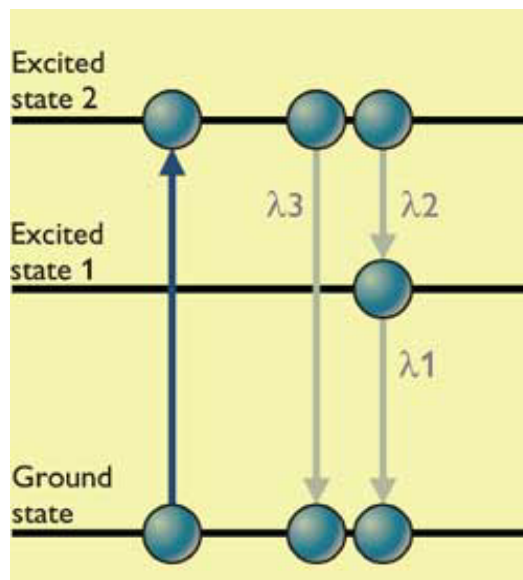
ICP-AES จะสามารถตรวจสอบได้เพียงตัวอย่างที่เป็นของเหลวเท่านั้น ดังนั้น หากตัวอย่าง เป็นของแข็งจำเป็นจะต้องนำไปละลายก่อนจากนั้นเมื่อนำตัวอย่างเข้าสู่การวิเคราะห์โดยเครื่อง ICP ตัวอย่างสารละลายจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นละอองของเหลว (aerosol) โดย nebuliser ซึ่ง ละอองขนาดใหญ่จะถูกแยกออกจากละอองขนาดเล็กใน spray-chamber โดยที่ละอองขนาดเล็ก (ประมาณ 1-10 ไมครอน) จะถูกเคลื่อนย้ายโดยก๊าซอาร์กอนและไหลเวียนเข้าสู่ใจกลางของ ICP-AES (เป็นอาร์กอนพลาสมา) ส่วนละอองขนาดใหญ่กว่า 90% จะถูกบีมออกไปเป็นของเสีย

### พลาสมา

การจะสร้างให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานอะตอมออกมาจากธาตุแต่ละชนิดนั้นจำเป็นต้อง ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟโดยปกติทั่วไป โดยอุณหภูมิที่เกิดการปลดปล่อยอะตอมที่ สูงที่สุดจะอยู่ในช่วงประมาณ 7,000-10,000 เคลวิน โดยวิธีการที่จะทำให้สามารถกำเนิดอุณหภูมิ ได้สูงขนาดนี้ทำโดยการให้กำเนิดพลาสมาของก๊าซเฉื่อย ซึ่งพลาสมาก็คือก๊าซที่มีความเข้มข้นของ อิเล็กตรอนอิสระและมีไอออนที่มีประจุมากและถือเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการ ระเหยกลายเป็นไอและการแตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออนของละอองของเหลวและเมื่อละออง ของเหลวเข้าไปสู่พื้นที่ร้อนของพลาสมาพวกมันจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเกลือโดยกระบวนการ desolvation ซึ่งอนุภาคเกลือเหล่านี้จะถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวๆซึ่งจะเกิดภายหลังจากการ แยกเป็นอะตอมหรือไอออนแล้ว ธาตุส่วนใหญ่จะถูกไอออไนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (มากกว่า 90%) โดยแทบจะไม่มีโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นปรากฏในพลาสมาเลย

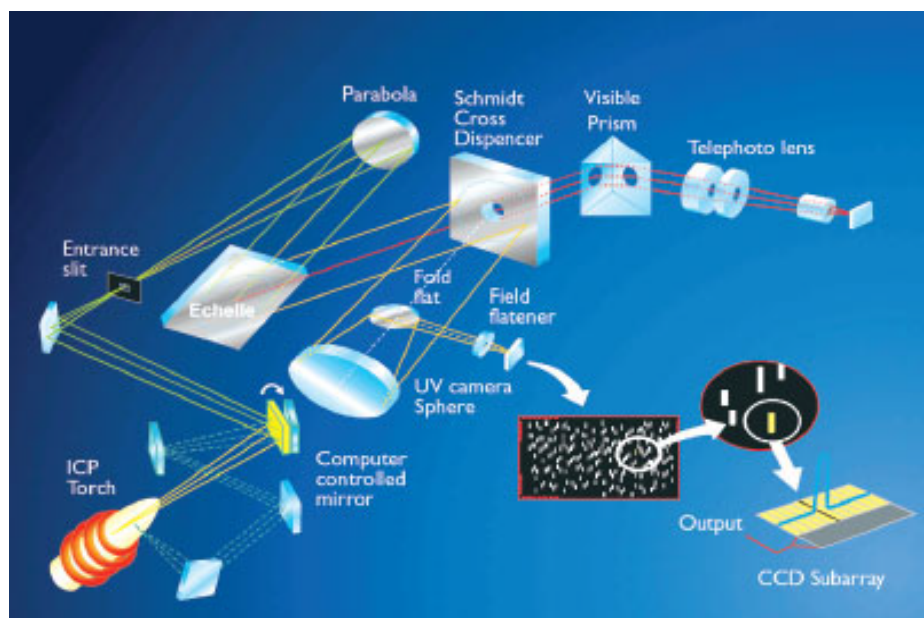


ภาพที่ ข.2 แสดงการกำเนิดพลาสมาใน ICP-AES  
ที่มา: Bradford T. and M. Nicole Cook (2003)



ภาพที่ ข.3 แสดงการปล่อยคลื่นสเปกตรัมออกมาจากอิเล็กตรอน  
ที่มา: Bradford T. and M. Nicole Cook (2003)

ในพลาสมาจะมีพลังงานที่ถูกถ่ายเทเข้าสู่อะตอมและไอออนจำนวนมาก ซึ่งเป็นการช่วยให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้สามารถเข้าสู่ช่วงระดับพลังงานสูงได้และเมื่ออะตอมและไอออนที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้กลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) หรือกลับเข้าสู่สถานะพลังงานกระตุ้นระดับต่ำกว่า พวกมันก็จะปลดปล่อยรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงสเปกตรัมของรังสีเหนือม่วงดังรูปที่ ข.3 ธาตุที่ถูกกระตุ้นแต่ละชนิดจะปล่อยสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุออกมา ความเข้มของการแผ่รังสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของธาตุ ทำให้สามารถวัดความเข้มข้นของธาตุนั้นได้ ปัจจุบันมีธาตุมาตรฐานที่ใช้กับ ICP-AES ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ธาตุในปริมาณมากได้และช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้นสเปกโตรมิเตอร์และตัวตรวจวัดสเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่มีองค์ประกอบหลายอย่าง ดังรูปที่ ข.4 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนกระจกหรือปริซึมและตัวตรวจวัด โดยกระจกหรือปริซึมจะใช้เพื่อแยกสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจออกมาและเพราะทิศทางการแผ่รังสีของอะตอมนั้นจะเป็นเส้นที่แคบมากจึงจำเป็นต้องมีตัวตรวจวัด (detector) ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้สามารถตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังต้องทำการตรวจวัดหลายๆคลื่น เพื่อให้สามารถวัดปริมาณธาตุทุกชนิดที่สนใจในเวลาเดียวกันได้ โดยตัวตรวจวัดที่นิยมใช้ในเครื่อง ICP-AES ในปัจจุบันคือตัวตรวจวัดชนิด CCD เพราะมีคุณสมบัติที่สามารถทำได้ทั้ง 2 อย่าง ทั้งมีความละเอียดสูงและตรวจวัดได้พร้อมกัน

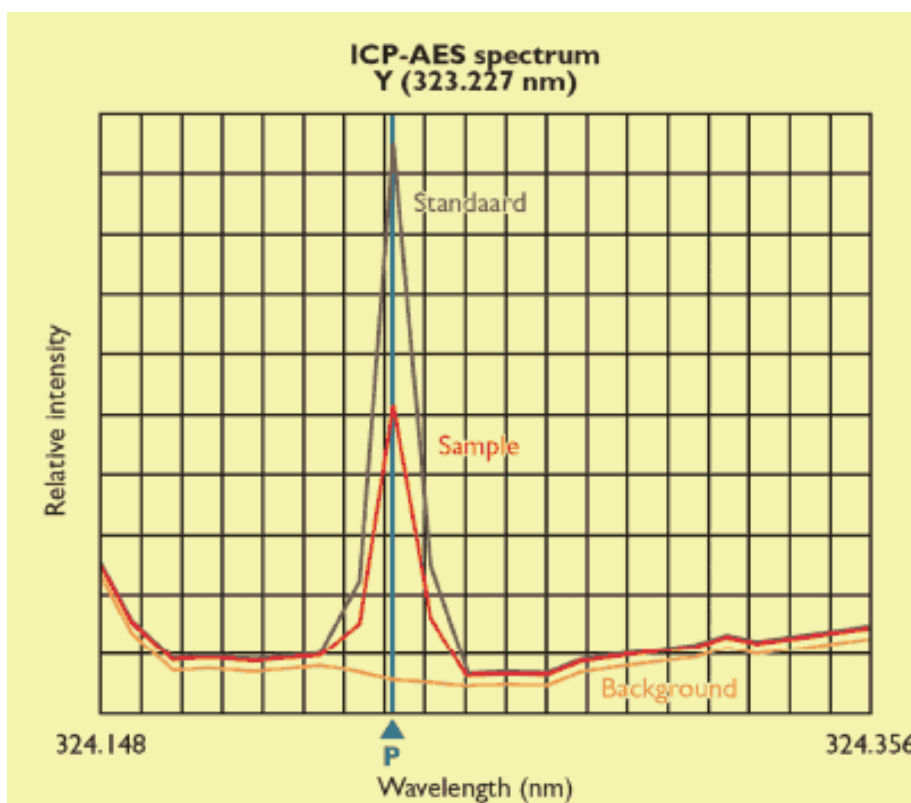


ภาพที่ ข.4 แสดงแผนผังภายในของสเปกโตรมิเตอร์ใน ICP-AES

ที่มา: Bradford T. and M. Nicole Cook (2003)

### การปลดปล่อยสเปกตรัมการปลดปล่อยสเปกตรัม

สามารถนำมาเขียนกราฟของความเข้มของการแผ่รังสี (แกน y) กับ ความยาวคลื่น (แกน x) ได้ดังรูปที่ ข.5 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า แม้สัญญาณจากพลาสมาไอออนที่ถูกสร้างขึ้นจะมีมากกว่า แต่ก็ยังคงมีอะตอมอิสระปรากฏอยู่บ้าง ซึ่งทั้งคู่จะถูกกระตุ้นและปล่อยรังสีออกมาและเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมากมายเกิดขึ้นระหว่างสภาวะกระตุ้นทั้งหลาย เช่น โซเดียมมีสภาวะกระตุ้น 6 ชั้นซึ่งจะสามารถให้กำเนิดคลื่นสเปกตรัมได้ถึง 15 ช่วงคลื่น จึงทำให้ยากในการจะตรวจวัดสเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมาว่าเป็นของธาตุชนิดใดและสเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมานี้ยังอาจมีความยาวคลื่นซ้อนทับกับสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจากธาตุอื่นได้ แต่สำหรับในธรรมชาติแล้ว สเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมาของธาตุแต่ละชนิดจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการซ้อนทับกันของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากธาตุที่แตกต่างกันจึงสามารถคาดเดาได้และใช้เก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลได้



ภาพที่ ข.5 แสดงกราฟการวัดสเปกตรัมของตัวอย่าง

ที่มา: Bradford T. and M. Nicole Cook (2003)

### การเชื่อมต่อ ICP กับ MS

ICP-MS นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบหลายธาตุ (multi-element) โดยใช้พลาสมาเผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออนเช่นเดียวกับ ICP แต่แตกต่างกันที่ตัวตรวจวัดไม่ใช่สเปกโตรมิเตอร์จึงไม่ได้ตรวจวัดด้วยปริมาณแสงหรือสเปกตรัม แต่จะตรวจวัดด้วยปริมาณไอออน โดยเมื่อเกิดไอออนของธาตุที่นำมาวิเคราะห์แล้วจะนำกลุ่มของไอออนเหล่านั้นผ่านออกมาจากช่องตรงกลางของพลาสมาแล้วเข้าไปยัง mass spectrometer จากนั้นจึงแยกไอออนออกเป็นส่วนๆ โดยอาศัยความแตกต่างของสัดส่วน มวลต่อประจุ ของไอออนแต่ละชนิดโดยใช้ quadrapole หรือ magnetic sector analyzer โดยไอออนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีค่า background ต่ำมาก จึงมี detection limit ที่ดีมากกับหลายๆธาตุ ซึ่งโดยปกติแล้วจะสามารถวัดได้ถึงระดับ ppt ภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมที่ดี



ภาพที่ ข.6 แสดงเครื่อง ICP-AES

ที่มา: Ohio Northern University (2006)

## ข.2. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)

Sieve Analysis คือ วิธีการวิเคราะห์หขนาดหรือคัดขนาดของอนุภาคของแข็งโดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ (test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่าง ๆ กันโดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ช่องบนตะแกรงเกิดจากการนำลวดขนาดต่าง ๆ กัน มาสานเป็นช่องและบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (mesh) ซึ่งหมายถึงจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น เมชขนาดเดียวกัน อาจแตกต่างกันถ้าทำจากเส้นลวดที่ต่างกัน จึงต้องบอกขนาดช่องหรือ aperture size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่ ตะแกรงแบบอังกฤษ (british standard) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (tyler standard) และตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM) เป็นต้น โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงมาตรฐานแต่ละแบบอาจจะมีขนาดของช่อง (aperture size) ที่ต่างกันก็ได้ ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาดเมช 100 แบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 ม.ม. แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 ม.ม. และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 ม.ม. ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียดทั้งขนาดเมชและขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรง การวิเคราะห์ขนาดทำได้ 2 วิธี คือ แบบแห้ง (dry) และแบบใช้น้ำช่วย (wet) ซึ่งวิธีหลังนี้จะเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยให้ของแข็งที่มีขนาดเล็กลอดผ่านช่องตะแกรงได้ดีกว่าแบบแห้ง ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด (undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้นและในเวลาที่น้อยลง แต่จะต้องไม่ใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่ง ๆ เพราะจะทำให้ของแข็งไปอุดตามช่องหรืออาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตย์และของแข็งรวมตัวเป็นก้อนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไปและความชื้นในของแข็งต้องทำให้มีน้อยที่สุด



ภาพที่ ข.7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Sieve Analysis)



ตารางที่ ข.1 ตารางเปรียบเทียบขนาดของตะแกรงมาตรฐานต่างๆ

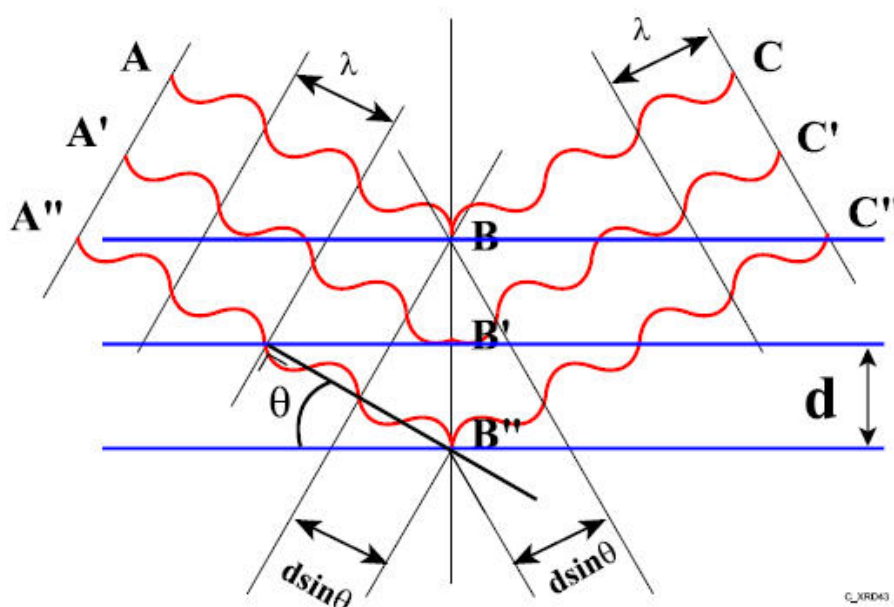
มาตรฐานอเมริกา (ASTM)			มาตรฐานอังกฤษ (BSI)			มาตรฐานกานตา			แบบไทเลอร์ (U.S.)		
ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	
	นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.
2.5	0.315	8	-	-	-	-	-	-	2.5	0.312	7.925
3	0.265	6.73	-	-	-	-	-	-	3	0.263	6.68
3.5	0.223	5.66	-	-	-	-	-	-	3.5	0.221	5.613
4	0.187	4.76	-	-	-	-	-	-	4	0.185	4.699
5	0.157	4	5	0.132	3.34	-	-	-	5	0.156	3.962
6	0.132	3.36	6	0.1107	2.81	-	-	-	6	0.131	3.327
7	0.111	2.83	7	0.0949	2.41	-	-	-	7	0.11	2.794
8	0.0937	2.38	8	0.081	2.05	-	-	-	8	0.093	2.362
10	0.0787	2	10	0.066	1.67	10	0.0787	2	9	0.078	1.981
12	0.0661	1.68	12	0.0553	1.4	-	-	-	10	0.065	1.651
14	0.0555	1.41	14	0.0474	1.2	-	-	-	12	0.055	1.397
16	0.0469	1.19	16	0.0395	1	-	-	-	14	0.046	1.168
18	0.0394	1	18	0.0336	0.85	18	0.0395	1	16	0.039	0.991
20	0.0331	0.84	22	0.0275	0.7	-	-	-	20	0.0358	0.833
25	0.028	0.71	25	0.0236	0.6	-	-	-	24	0.0276	0.701
30	0.0232	0.59	30	0.0197	0.5	-	-	-	28	0.0232	0.589
35	0.0197	0.5	36	0.0166	0.421	35	0.0197	0.5	32	0.0195	0.495
40	0.0165	0.42	-	-	-	-	-	-	35	0.0164	0.417
45	0.0138	0.35	44	0.0139	0.353	45	0.0139	0.355	42	0.0138	0.351
50	0.0117	0.297	52	0.0116	0.295	-	-	-	48	0.0116	0.295
60	0.0098	0.25	60	0.0099	0.252	60	0.0098	0.25	60	0.0097	0.246
70	0.0083	0.21	72	0.0083	0.211	-	-	-	65	0.0082	0.208
80	0.007	0.177	85	0.007	0.177	80	0.0071	0.18	80	0.0069	0.175
100	0.0059	0.149	100	0.006	0.152	100	0.0059	0.15	100	0.0058	0.147
120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	115	0.0049	0.124
140	0.0041	0.105	150	0.0041	0.105	140	0.0041	0.106	150	0.0041	0.104
170	0.0035	0.088	170	0.0035	0.088	170	0.035	0.09	170	0.0035	0.088
200	0.0029	0.074	200	0.003	0.076	200	0.003	0.075	200	0.0029	0.074
230	0.0024	0.062	240	0.0026	0.065	230	0.0024	0.063	250	0.0024	0.061
270	0.0021	0.053	300	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053
325	0.0017	0.044	-	-	-	325	0.0017	0.045	325	0.0017	0.043

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี. คู่มือการแต่งแร่. 2527.

### ข.3. X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ  $2d\sin\theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



ภาพที่ ข.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในมุมต่างๆ

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็น amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยการใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

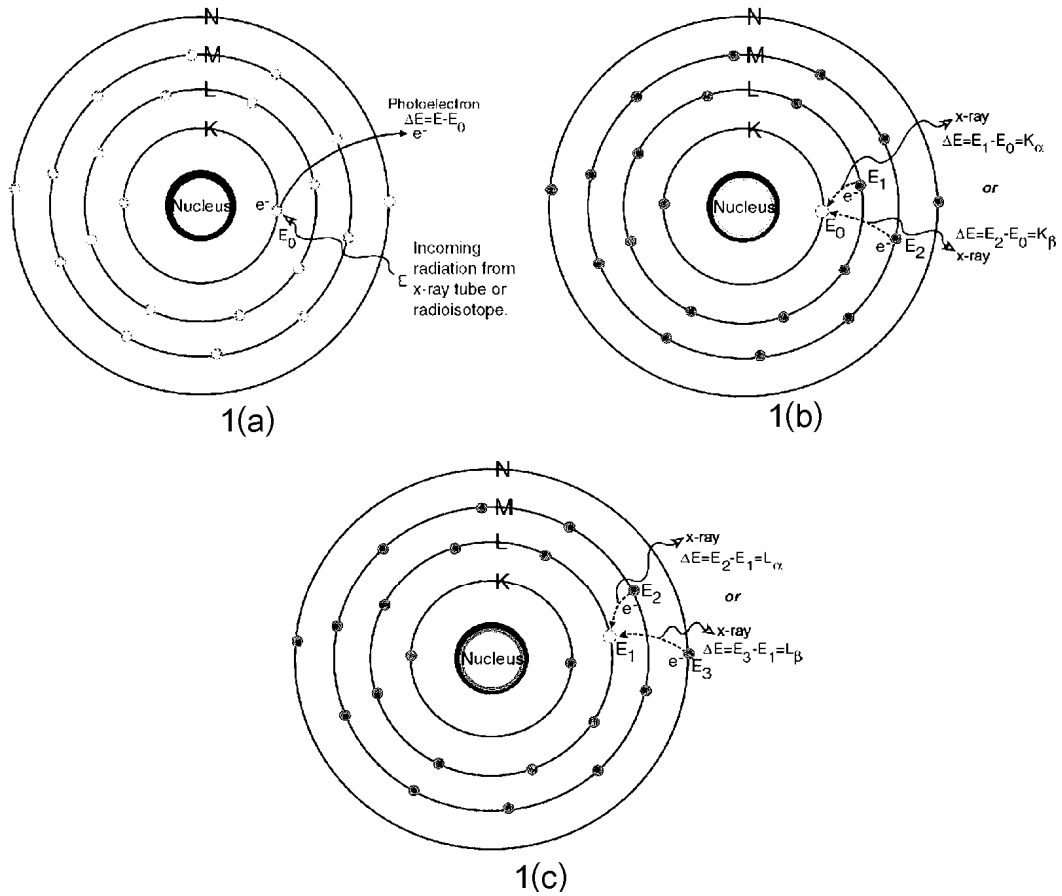
เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีความละเอียดเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งจะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม



ภาพที่ ข.9 รูปแสดงX-ray Diffractometer (XRD)

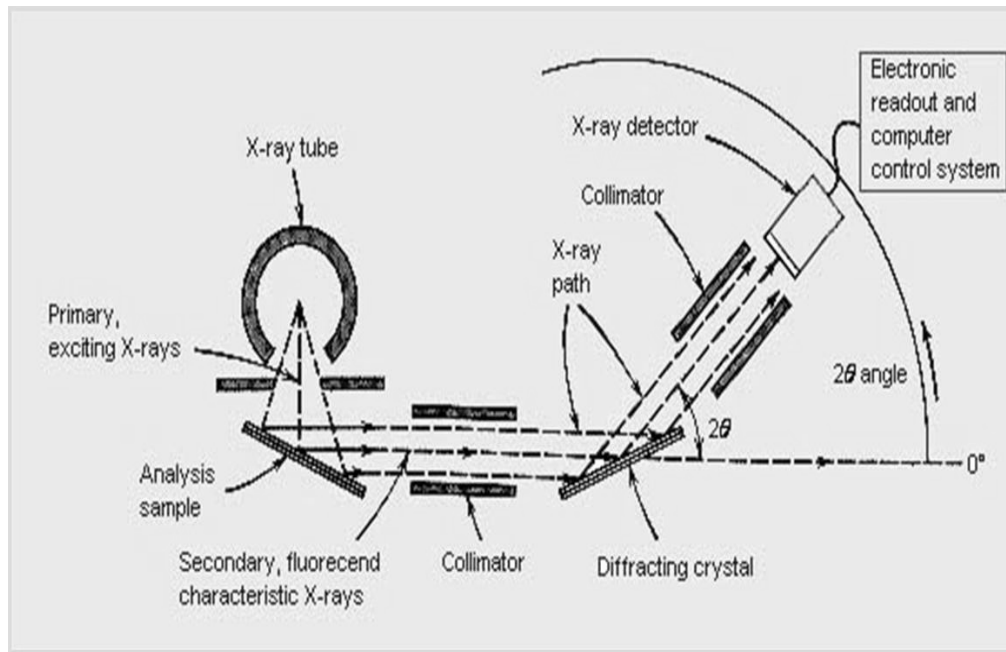
#### ข.4. X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

X-ray fluorescence spectrometry (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่างหลักการและวิธีการวิเคราะห์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโต้อิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ดังแสดงในรูปที่ 1(a) ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (secondary X-ray photon) ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) และ (c) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์”(fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 12 รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้



ภาพที่ ข.10 แสดงการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ของธาตุองค์ประกอบ

รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำรังสีขนานไปยัง Diffracting crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) ที่แน่นอนเช่น ควอทซ์ , ลิเทียม, ฟลูออไรด์, ไมกา ฯลฯ โดย Diffracting crystal จะทำให้รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ (X-ray detector) โดยปกติ Diffracting crystal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัดดังรูปที่ ข.11



ภาพที่ ข.11 แสดงการทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัด

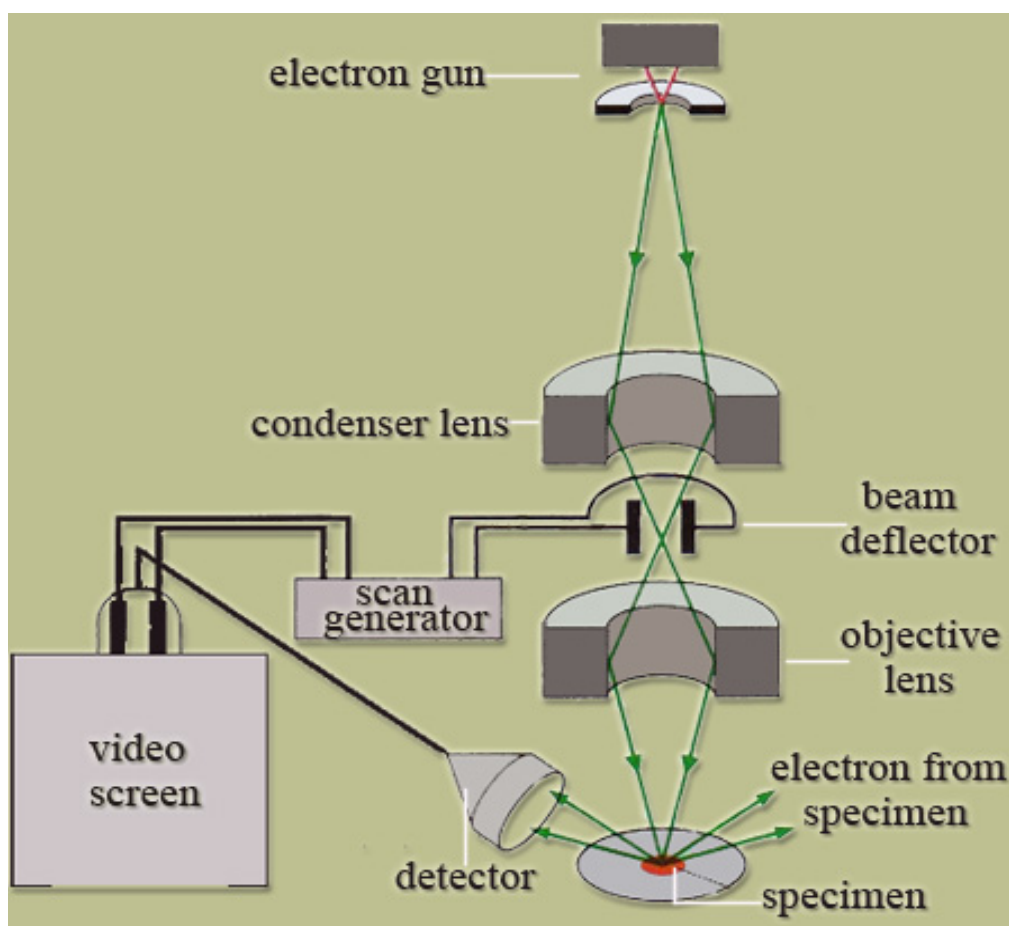
การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น (wavelength, $\lambda$ )ของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่าง จะทำได้โดยแทนค่าในสมการ Bragg's law

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้จะสามารถชี้บอกได้ว่ารังสีเอกซ์-ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้ เรียกว่า Wavelength dispersive XRF

#### ข.4. Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ ข.12 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

### ส่วนประกอบพื้นฐาน

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 volts หรือ 220 volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 Kilovolts ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่า filament และล้อมด้วยโลหะกรวย (wehnelt cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 volts จะไปเข้ามาสู่ filament ลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง electron gun ซึ่งมี filament และ wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก electron gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ electron gun อยู่ในแนวตรงได้ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electron gun ให้ได้ศูนย์กลางแล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น anode เพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของ สนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า alignment coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม alignment knobs บนแผงของ console unit เหตุที่ต้องปรับ electron gun ก็เพื่อจะให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความ



สมบูรณเป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเขวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron)

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (electron magnetic lens & scan coils) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูปร่างขนาดต่างๆกัน (50um-400um) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ aperture เหล่านั้น ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น aperture พิเศษเรียกว่า objective aperture มีไว้เพื่อกั้นกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆบนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างขึ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (crt) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometer stage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector & scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ+ขนาด30-250โวลท์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging & photographic devices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึก อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็น

แสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่ท่อแก้วสุญญากาศประเภทที่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแก้วนี้ จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไปอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (crt) ที่ติดตั้งไว้บน console unit



ภาพที่ ข.12 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope (SEM))

ข.6. เตาเผาความร้อนสูง (Electric Muffle Furnace)



ภาพที่ ข.13 แสดงเตาเผาความร้อนสูง (electric muffle furnace)

ข.7. เครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)



ภาพที่ ข.13 แสดงเครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)

ตารางที่ ข.2 การเทียบค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค็มของน้ำ (ppt) กับความหนาแน่นและอุณหภูมิของน้ำ

ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
0.9980																	
09990																	
1.0000																	
1.0010	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8
1.0020	2.0	1.8	1.9	1.6	1.6	1.0	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.6	1.6	1.9	2.0	2.1	2.3
1.0030	3.3	3.2	3.1	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4	3.0
1.0040	4.5	4.4	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.2	4.4	4.5	4.0	4.8	4.9
1.0050	5.8	5.7	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3	5.4	5.4	5.4	5.5	5.5	5.7	5.8	5.9	6.2
1.0060	7.0	6.8	6.8	6.7	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.7	6.7	6.8	6.8	7.0	7.1	7.2	7.5
1.0070	8.1	8.1	8.0	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	8.0	8.1	9.1	8.8	8.4	8.5	8.8
1.0080	9.4	9.3	9.2	8.2	8.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.3	9.3	9.4	9.0	9.7	9.6	10.0
1.0090	10.0	10.5	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.5	10.5	10.0	1.0	10.7	10.9	11.0	11.1	11.3
1.0100	11.8	11.8	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.8	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.0
1.0110	13.1	13.0	13.0	12.8	12.8	12.8	12.8	13.0	13.0	13.1	13.1	13.2	13.4	13.5	13.0	13.7	13.9

ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
1.0120	14.3	14.3	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.3	14.3	14.4	14.5	14.7	14.8	14.9	15.0	15.2
1.0130	15.0	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.0	15.7	15.5	15.8	16.0	16.2	10.3	16.5
1.0140	16.7	16.7	16.6	16.6	16.6	16.0	16.6	10.7	16.7	16.9	17.0	17.0	17.1	17.3	17.5	17.7	17.8
1.0150	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	18.0	18.0	18.2	18.8	18.4	18.6	18.8	19.0	19.1
1.0160	19.2	19.2	19.1	19.1	19.1	19.1	19.2	19.2	19.3	19.3	19.5	19.0	19.7	19.9	20.1	20.3	20.4
1.0170	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4	20.5	20.5	20.0	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.0	21.7
1.0180	21.7	21.7	21.7	21.6	21.6	21.7	21.7	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2	22.3	22.5	22.0	22.9	23.0
1.0190	22.9	22.9	22.9	22.8	22.9	22.9	23.0	23.0	23.1	23.3	23.4	23.5	23.6	23.8	23.9	24.2	24.3
1.0200	24.2	24.2	24.2	24.0	24.2	24.2	24.2	24.3	24.3	24.4	24.0	24.7	24.6	25.1	25.2	25.5	25.0
1.0210	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.5	25.5	25.0	25.0	25.7	25.8	26.0	26.1	26.4	26.5	26.6	26.9
1.0220	26.0	26.6	26.6	26.6	26.6	26.0	29.8	26.8	26.9	27.0	27.2	27.6	27.4	27.7	27.8	28.1	28.2
1.0230	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.9	28.1	28.2	28.3	28.5	28.0	28.7	28.9	29.1	29.4	26.5
1.0240	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.2	29.4	29.5	29.5	29.8	29.9	30.0	30.2	30.4	30.0	30.8
1.0250	30.3	30.3	30.3	30.3	30.4	30.4	30.6	30.0	30.7	30.8	30.8	31.1	31.3	31.5	31.7	31.9	32.1
1.0270	32.8	32.6	32.8	32.9	32.8	32.9	33.0	33.2	33.3	33.4	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5	34.7

ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
1.0280	33.8	34.1	34.1	34.1	34.1	34.2	34.9	34.5	34.5	34.7	34.5	35.0	35.1	35.4	35.0	35.8	36.0
1.0290	35.2	35.2	35.2	35.4	35.4	35.5	35.5	35.0	35.8	35.9	36.2	36.3	30.4	36.7	36.8	37.1	37.3
1.0300	30.4	36.5	36.5	36.5	36.7	36.7	36.5	30.9	37.1	37.2	37.3	37.0	37.7	38.0	38.1	33.4	38.0
1.0310	37.7	37.7	37.7	37.8	37.8	38.0	38.1	38.2	38.4	38.5	38.5	38.9	39.0	39.3	39.4	39.7	39.8

ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	15.0	16.0	17.0	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5
0.9980																	
09990										0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	
1.0000		0.0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0
1.0010	1.0	1.2	1.5	1.0	1.8	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
1.0020	2.4	2.5	2.8	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4	3.0	3.7	3.3	4.0	4.1	4.2	4.4	4.5	4.8
1.0030	3.7	3.8	4.1	4.2	4.4	4.5	4.0	4.8	4.9	5.0	5.1	5.3	5.4	5.5	5.8	5.9	6.1
1.0040	5.0	5.1	5.4	5.5	5.7	5.8	5.9	6.1	6.2	6.3	6.4	6.6	6.7	7.0	7.1	7.2	7.4
1.0050	6.3	6.6	6.7	7.0	7.1	7.1	7.2	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	8.1	8.3	8.4	8.5	8.7

ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	15.0	16.0	17.0	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5
1.0060	7.6	7.9	8.0	8.3	8.4	8.5	8.7	8.8	8.9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.6	9.7	9.8	10.1
1.0070	8.9	8.2	9.3	9.0	9.7	9.8	10.0	10.1	10.2	10.4	10.5	10.0	10.7	10.9	11.0	11.3	11.4
1.0080	10.2	10.5	10.0	10.9	11.0	11.1	11.3	11.4	11.5	11.7	11.8	11.9	12.0	12.2	12.4	12.6	12.7
1.0090	11.5	11.8	11.9	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	13.0	13.0	13.2	13.4	13.6	13.7	13.9	14.0
1.0100	12.8	13.1	13.2	13.5	13.6	13.7	13.9	14.0	14.1	14.3	14.4	14.5	14.6	14.9	15.0	15.2	15.3
1.0110	14.1	14.4	14.5	14.8	14.9	15.0	15.2	15.3	15.4	15.6	15.7	16.0	16.1	16.2	16.3	16.5	16.7
1.0120	15.4	15.7	15.8	16.1	16.2	16.3	16.5	16.60	16.7	17.0	17.1	17.3	17.4	17.5	17.7	17.9	18.0
1.0130	16.7	17.0	17.1	17.4	17.5	17.7	17.8	17.9	18.0	18.3	18.4	18.0	18.7	18.8	19.1	19.2	19.3
1.0140	18.0	18.3	18.0	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.5	19.5	19.7	19.9	20.0	20.1	20.4	20.5	20.6
1.0150	19.3	19.6	19.9	20.0	20.1	20.4	20.5	20.0	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.6	21.7	21.8	22.0
1.0160	20.0	20.9	21.2	21.3	21.4	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2	22.0	22.5	22.7	22.8	23.0	23.8	23.4
1.0170	22.0	22.2	22.5	22.7	22.9	23.0	23.1	23.3	23.4	23.5	23.0	23.8	24.0	24.2	24.3	24.0	24.7
1.0180	23.3	23.5	23.8	24.0	24.2	24.3	24.4	24.0	24.7	24.8	24.9	25.2	25.8	25.5	25.3	25.9	26.0
1.0190	24.0	24.8	25.1	25.3	25.5	25.6	25.7	25.9	26.0	26.1	26.0	26.5	26.6	26.8	27.0	27.2	27.3
1.0200	25.9	26.1	26.4	26.6	26.8	26.9	27.0	27.2	27.3	27.4	27.0	27.8	27.9	28.2	28.3	28.5	28.0



ค่าที่อ่านได้จริง	อุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวงที่มีสเกลบอกปริมาตร ( °C )																
	15.0	16.0	17.0	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5
1.0210	27.2	27.4	27.7	27.9	28.1	28.2	28.3	28.5	28.0	28.9	29.0	29.1	29.2	29.5	29.6	29.8	30.0
1.0220	28.5	28.7	29.0	29.2	29.4	29.5	29.0	29.8	30.0	30.2	30.3	30.4	30.7	30.8	30.9	31.2	31.3
1.0230	29.8	30.3	30.3	30.0	30.7	30.8	30.9	31.2	31.3	31.5	31.6	31.7	32.0	21.1	32.2	32.5	32.6
1.0240	31.1	31.3	31.0	31.9	32.0	32.1	32.2	32.5	32.0	32.8	32.9	33.2	33.3	33.4	33.7	33.8	33.9
1.0250	32.4	32.6	32.9	33.2	33.3	33.4	33.7	33.8	33.9	34.1	34.2	34.5	34.6	34.7	35.0	35.1	35.2
1.0260	33.7	33.9	34.2	34.5	34.6	34.7	35.0	35.1	35.2	35.4	35.6	35.8	.5.9	36.0	36.3	36.4	36.7
1.0270	35.0	35.2	35.5	35.8	35.9	36.2	36.3	36.4	36.5	36.7	36.9	37.1	37.2	37.5	37.0	37.8	38.0
1.0280	36.3	36.5	36.8	37.1	37.2	37.5	37.0	37.7	37.8	38.1	38.2	38.4	38.5	38.8	38.9	39.1	39.3
1.0290	37.6	37.8	38.1	38.4	38.0	38.8	38.9	38.0	39.1	39.4	39.5	39.7	39.9	40.1	40.2	40.5	40.0
1.0300	38.9	39.1	39.4	39.7	39.9	40.1	40.2	40.3	40.6	40.7	40.8	41.0	41.2	41.4	41.6	41.8	41.9
1.0310	40.2	40.5	40.7	41.0	41.2	41.4	41.5	41.8	41.9	42.0	42.1	42.3	42.5				

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐพร สุขพลอย เกิดเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน 2528 ที่ อ.เมือง จ.พิษณุโลก เมื่อปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี และในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และได้เข้าทำงานในบริษัทเบเยอร์ จำกัด ในตำแหน่งนักวิจัยและพัฒนาสีทาอาคาร หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552