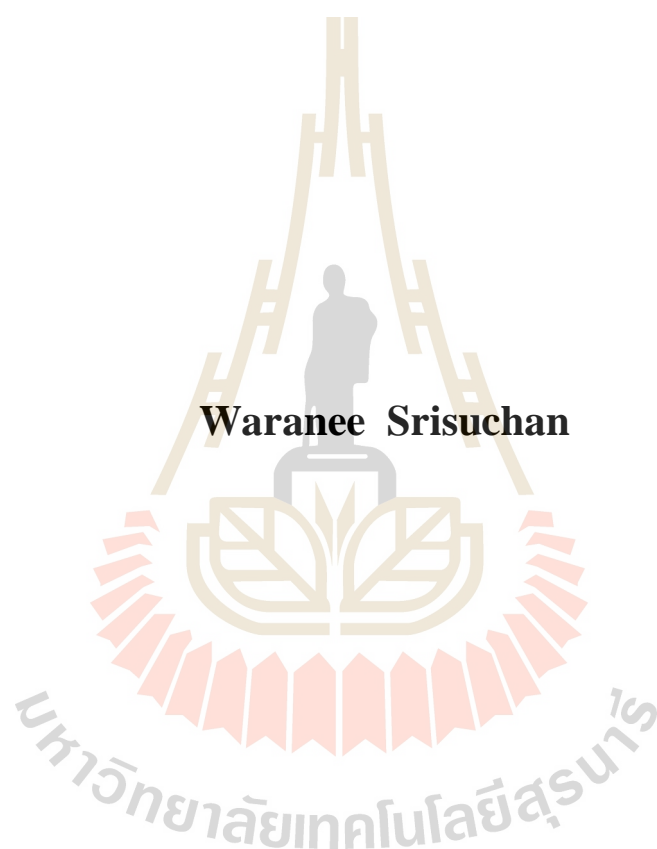


การป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือ
ด้วยหม้อเคี่ยวระบบสุญญากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**SCALE PREVENTION IN SALT PRODUCTION
PROCESS USING VACUUM PAN**



Waranee Srisuchan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคี่ยวระบบสูญญากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อดิชาติ วงศ์กอบลาภ)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ธีระสุด สุขกำเนิด)

กรรมการ

(ผศ. ดร.อรรณพ มณีแดง)

กรรมการ

(อ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วารณี ศรีสุจันทร์ : การป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (SCALE PREVENTION IN SALT PRODUCTION PROCESS USING VACUUM PAN) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์, 175 หน้า

หม้อเคี้ยวถือเป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ เมื่อมีตะกรันเกิดขึ้นในหม้อเคี้ยวจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนลดลงและสิ้นเปลืองพลังงานรวมถึงทำให้กำลังการผลิตเกลือลดลง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมุ่งศึกษาแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรัน พร้อมเสนอแนวทางที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง การศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 8 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบ ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันด้วยเทคนิค XRD FTIR XRF และ STA ส่วนที่ 3 การศึกษาผลของปริมาณสารเคมีและลำดับการเติมที่มีต่อการกำจัดไอออนเจือปน และผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการป้องกันการเกิดตะกรัน ส่วนที่ 4 การศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่ตกค้างในน้ำเกลือ ส่วนที่ 5 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันและการป้องกัน ส่วนที่ 6 การเสนอวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน ส่วนที่ 7 การศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า และส่วนที่ 8 การประเมินต้นทุนการผลิตเกลือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน

จากผลการศึกษาพบว่า น้ำเกลือดิบประกอบด้วยไอออนโซเดียมและคลอไรด์เป็นหลัก มีไอออนแคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟตเป็นไอออนเจือปน และผลการวิเคราะห์ตะกรันพบว่ามีสารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อศึกษาผลของปริมาณสารเคมีและลำดับการเติมสารต่อการกำจัดไอออนพบว่า การเพิ่มปริมาณสารเคมีจะกำจัดไอออนได้มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณการทำปฏิกิริยา เพื่อให้แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น แต่ลำดับการเติมสารไม่มีผลต่อการกำจัดไอออน สำหรับการศึกษาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำเกลือ จะช่วยลดโอกาสในการเกิดตะกรัน เนื่องจากการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดไบคาร์บอเนตมากขึ้น ส่งผลให้น้ำเกลือมีค่าความเป็นด่างลดลง ซึ่งทำให้ค่า pH ในน้ำเกลือไม่เหมาะต่อการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับผลการศึกษาการแยกตะกอนที่เกิดจากระบวนการกำจัดไอออนด้วยการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียง พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้ สำหรับการแยกตะกอนที่ตกค้างในน้ำเกลือด้วยการอุ่นร้อนพบว่า ตะกอนที่ตกค้างมีความสามารถในการละลายที่ต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้การอุ่นร้อนสามารถแยกตะกอนตกค้างได้ แต่การเติมตัวล่อผลึกไม่มีผลต่อการตกตะกอนของ

ตะกอนตกค้างในน้ำเกลือบำบัด จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันพบว่า เมื่อน้ำเกลือได้รับความร้อน จะมีการเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่ผิวท่อเนื่องจากมีการระเหยของน้ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนในน้ำเกลือสูงกว่าค่าการละลายได้ จึงเกิดการตกผลึกออกมาเป็นของแข็ง โดยของแข็งที่เกิดขึ้นจะก่อตัวเป็นตะกรันเกาะอยู่ที่ผิวท่อ ในการป้องกันการเกิดตะกรัน โดยใช้สาร Anti-scaling พบว่า สามารถป้องกันการก่อตัวของตะกรันที่ผิวท่อได้ แต่อาจส่งผลต่อคุณภาพของเกลือ ดังนั้นข้อเสนอแนะทางในการป้องกันการเกิดตะกรันคือ การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน จะเป็นแนวทางที่ดำเนินการได้ง่ายและเป็นการแก้ไขปัญหาที่ต้นเหตุ โดยวิธีการที่เสนอให้มีการนำไปประยุกต์ใช้นี้ จะมีการเพิ่มต้นทุนในการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มหน่วยแยกตะกอน เพื่อลดการสูญเสียน้ำเกลือและเพื่อให้ง่ายต่อการนำกากตะกอนไปเพิ่มมูลค่าแทนการปล่อยทิ้ง โดยแนวทางที่ศึกษาสำหรับนำกากตะกอนไปเพิ่มมูลค่าคือการสังเคราะห์เป็น CaO เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า กากตะกอนสามารถสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ แต่ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเพิ่มความสามารถการทำปฏิกิริยา จากแนวทางที่ได้เสนอเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันแล้ว ในส่วนสุดท้ายของการศึกษา ได้ทำการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน ผลจากการประเมินพบว่าต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเกลือเพิ่มขึ้น แต่บริษัทยังคงมีรายได้สุทธิเป็นบวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

WARANEE SRISUCHAN : SCALE PREVENTION IN SALT
PRODUCTION PROCESS USING VACUUM PAN. THESIS ADVISOR :
SUPUNNEE JUNPIROM, Ph.D., 175 PP.

BRINE/MAGNESIUM HYDROXIDE/SALT PRODUCTION/SCALE
PREVENTION/VACUUM PAN

One of the most important units in vacuum pan salt production process is the evaporators. The scale forming in evaporators reduces the heat transfer efficiency and increases energy requirement as well as reduces the production capacity. Therefore, the main objectives of this study are to investigate the causes of scaling and to propose the method to prevent it. This study was divided into 8 sections. First, the composition of raw brine was analyzed. Then, the scale was characterized by using the techniques of XRD, FTIR, XRF and STA. In the third part, the amount of chemicals, the order of adding the chemicals and the addition of CO₂ were studied to investigate their effect on scaling prevention. In the fourth section, ways of separating the precipitates remained in the treated brine were investigated. In order to understand scaling better, the scaling behavior and its prevention was studied in the fifth part. The feasible methods to reduce the scaling are then proposed in the sixth section. Next, the feasibility of using solid waste from chemical treatment as a catalyst of biodiesel production was evaluated. Finally, the cost estimation of salt production with the proposed process is conducted.

From experimental results, it was found that the main compositions of raw brine were Na⁺ and Cl⁻ with Ca²⁺, Mg²⁺ and SO₄²⁻ as the impurities and Mg(OH)₂ was

the main component of scale. From experiments on chemical addition, it was concluded that adding more chemicals yielded the better ion removal but the order of addition did not have any effect. For the investigation on the effect of CO₂, it was observed that soluble CO₂ decreased scaling since soluble CO₂ would lower the pH and shift the reversible reaction to bicarbonate. Based on the experimental result on an inclined surface and using flocculant, it was observed that both methods can be applied to reduce the precipitation time. By using pre-heat treatment, it was found that the solubility of precipitates decreased when temperature increased. However, no effect of seeding on enhancing precipitate removal was observed. From the study on scale behavior, it was found that the scale was formed on the surface of the tube because of the evaporation of water on the surface and anti-scaling could prevent scale formation. Based on all studies, the best way of scale prevention is increasing the amount of chemical added. From the study of utilizing solid waste from chemical treatment, it was found that this solid waste could be synthesized and used as a catalyst for biodiesel production. Based on the analysis of cost estimation, it was found that the average cost per kilogram would be increased; however, the net revenue was still positive.

School of Chemical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ดังนี้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ธีระสุด สุขกำเนิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้มอบโอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและคอยให้การอบรม สั่งสอน ส่งเสริม และชี้แนะแนวทางในการศึกษาและการวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจสอบ วิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย จาก โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาค การผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.- อุตสาหกรรม และบริษัท สยามทรัพย์มณี จำกัด ที่ให้การสนับสนุน ทุนในการวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการจัดส่งน้ำเกลือดิบและวัตถุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาและคำชี้แนะที่ดีตลอดมาในระหว่างที่ดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิชาติ วงศ์กอบลาภ ที่สละเวลามาเป็นประธาน กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้ จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ รัตนพานิ ที่ได้สละเวลามา เป็นประธานในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่าง ๆ ในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล มณีแดง และ อาจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านใน สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้กรุณาอบรม สั่งสอน ประสาทความรู้ และให้คำปรึกษาทั้งในด้านการเรียนและการวิจัย สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้การ อบรม สั่งสอน เลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนเป็นผู้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในด้านต่าง ๆ และ คอยให้กำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง

วารณี ศรีสุจันทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 เกลือ.....	6
2.1.1 แหล่งที่มาของเกลือและวิธีการนำเกลือมาใช้ประโยชน์.....	7
2.1.2 การผลิตเกลือในประเทศไทย.....	8
2.1.3 สมบัติของเกลือ.....	10
2.1.4 การใช้ประโยชน์จากเกลือโซเดียมคลอไรด์.....	12
2.2 กระบวนการผลิตเกลือในระดับอุตสาหกรรม.....	15
2.2.1 แหล่งน้ำเกลือดิบ.....	16
2.2.2 กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ.....	17
2.2.3 การต้มระเหยและการตกผลึก.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4	การปั่นเหวี่ยงและการอบแห้ง.....	32
2.3	การเกิดตะกรันในหม้อเคียวสุญญากาศ.....	32
2.3.1	หลักการเกิดตะกรัน.....	32
2.3.2	การเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต.....	33
2.3.3	การเกิดตะกรันแมกนีเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	34
2.3.4	สารประกอบที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรัน.....	34
2.3.5	ผลเสียที่เกิดจากตะกรัน.....	39
2.4	การป้องกันการเกิดตะกรัน.....	39
2.5	การประเมินราคาของวิธีการสำหรับป้องกันการเกิดตะกรัน.....	42
2.6	ปริทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
2.6.1	การทำบริสุทธิ์น้ำเกลือสำหรับการผลิตเกลือบริสุทธิ์เพื่อบริโภค.....	44
2.6.2	การนำเอาสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมมาใช้ประโยชน์.....	44
2.6.3	สาเหตุและแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรัน.....	45
2.6.4	การศึกษาพฤติกรรมของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	46
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1	บทนำ.....	47
3.2	สารเคมีและเครื่องมือ.....	47
3.2.1	วัสดุและสารเคมี.....	47
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2.3	เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	48
3.3	วิธีการทดลอง.....	48
3.3.1	การศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำเกลือดิบ.....	51
3.3.2	การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน.....	53
3.3.3	การศึกษาวิธีการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4	การศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	60
3.3.5	การศึกษาพฤติกรรมกรเกิดและการป้องกันการเกิดตะก้น.....	65
3.3.6	การเสนอวิธีการป้องกันการเกิดตะก้น.....	67
3.3.7	การศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า.....	68
3.3.8	การประเมินราคาของวิธีการป้องกันการเกิดตะก้น.....	69
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	70
4.1	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ประกอบของน้ำเกลือดิบ.....	70
4.2	ผลการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะก้น.....	72
4.2.1	X-ray diffraction (XRD).....	73
4.2.2	Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	73
4.2.3	X-ray fluorescence (XRF).....	74
4.2.4	ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตะก้น.....	75
4.3	ผลการศึกษาวิธีการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	76
4.3.1	ผลการศึกษาปริมาณและลำดับการเติมสารเคมีที่ใช้ ในการบำบัดน้ำเกลือ.....	77
4.3.2	ผลกระทบของ CO ₂ ที่มีต่อการเกิดตะก้นในหม้อเคียวสุญญากาศ.....	79
4.4	การศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	81
4.4.1	ผลการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียง.....	81
4.4.2	ผลของการอุ่นร้อนน้ำเกลือต่อการแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ.....	83
4.4.3	ผลการศึกษาการเติมตัวล่อ (Seeding) ที่มีต่อการตกตะกอน.....	97
4.5	ผลการศึกษาพฤติกรรมกรเกิดและการป้องกันการเกิดตะก้น.....	100
4.5.1	ผลการศึกษาพฤติกรรมกรเกิดตะก้น.....	100
4.5.2	ผลการศึกษาผลของการเติมสารป้องกันการเกิดตะก้น.....	101
4.5.3	ผลการวิเคราะห์ตะก้นที่เกิดขึ้นในชุดจำลองการเกิดตะก้น.....	102

สารบัญ (ต่อ)

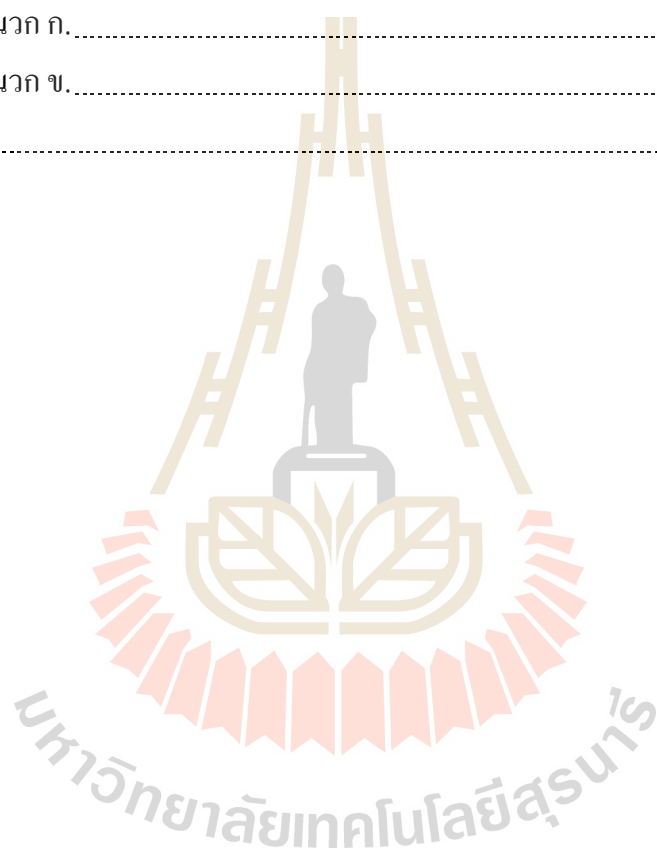
หน้า

4.5.4	กลไกการเกิดขึ้นของตะกรัน.....	104
4.6	ข้อเสนอแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรัน.....	107
4.6.1	การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน.....	107
4.6.2	การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน.....	108
4.6.3	การใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน.....	110
4.6.4	การปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน.....	113
4.6.5	การเติมตัวล่อเพื่อให้เกิดการตกตะกอน.....	114
4.6.6	การเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling).....	115
4.6.7	การใช้เทคโนโลยีคอลลอยด์-เอ-ตรอน (Colloid-a-tron).....	115
4.7	ผลการศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า.....	117
4.8	การประเมินต้นทุนการผลิตเกลือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมี ในการกำจัดไอออน.....	124
4.8.1	ข้อมูลสำหรับการประเมินต้นทุนการผลิตเกลือ.....	124
4.8.2	การสร้างแบบจำลองในการคำนวณหม้อเกลือโดยใช้โปรแกรม Excel.....	126
4.8.3	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณต้นทุนการผลิตเกลือ.....	128
4.8.4	ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ.....	128
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	136
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	136
5.1.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบ.....	136
5.1.2	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน.....	136
5.1.3	การกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือดิบ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	136
5.1.4	การแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ).....	137
5.1.5	การเสนอแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน.....	137
5.1.6	การศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรัน.....	138
5.1.7	การเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนที่เกิดจากระบวนการกำจัดไอออน.....	138
5.1.8	การประเมินต้นทุนของการผลิตเกลือ.....	139

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	148
ภาคผนวก ข.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	175



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ช่วงเลขคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบต่าง ๆ.....55
3.2	สัดส่วนของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือดิบ.....58
3.3	สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity).....60
4.1	ปริมาณไอออนองค์ประกอบในน้ำเกลือดิบที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟีและปริมาณไอออนที่พบในน้ำเกลือจากแหล่งต่าง ๆ.....71
4.2	ปริมาณไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำเกลือดิบที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรต.....71
4.3	ปริมาณคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในน้ำเกลือดิบหลังเติมก๊าซ CO ₂81
4.4	ค่าพารามิเตอร์จากสมการ โพลีโนเมียลและสมการ van't Hoff.....88
4.5	พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการละลาย Mg(OH) ₂ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 329.15 K.....91
4.6	ปริมาณตัวล่อที่เติมลงในน้ำเกลือและของแข็งที่ได้จากการแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือปริมาตร 150 mL.....97
4.7	รายละเอียดของชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอน.....108
4.8	สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในงานวิจัยนี้เทียบกับสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ของงานวิจัยอื่น ๆ.....120
4.9	ปริมาณและความแรงของหมู่เบสบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....122
4.10	องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซล.....123
4.11	สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับงานวิจัยอื่น.....123

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลำดับชั้นหินของหมวดหินมหาสารคาม.....9
2.2	พฤติกรรมการละลายของเกลือ (NaCl) ในน้ำ.....12
2.3	พฤติกรรมการละลายของน้ำตาล (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) ในน้ำ.....12
2.4	การผลิตสารละลาย NaOH ด้วยเชื้อแลกเปลี่ยนไอออน.....13
2.5	กระบวนการผลิต Na ₂ CO ₃ ด้วยกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process).....15
2.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตเกลือ.....16
2.7	การทำริสุทธีน้ำเกลือด้วยสารละลาย Na ₂ CO ₃ และสารละลาย NaOH.....17
2.8	สูตรโครงสร้างของ Polyacrylamides.....19
2.9	การรวมตัวของฟล็อกเมื่อใส่ Polymer.....20
2.10	พฤติกรรมการตกตะกอนของอนุภาคในท่อเอียง.....22
2.11	ลักษณะของแผงท่อเอียง.....22
2.12	กลไกการกรองแบบ Deep-bed และแบบ Cake.....23
2.13	พฤติกรรมของเฟสของแข็งและของเหลวที่อธิบายด้วยสมดุลและความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์.....24
2.14	แผนภาพกลไกของการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation).....25
2.15	ชนิดของหม้อต้มระเหย (Evaporator).....28
2.16	หม้อต้มระเหยภายใต้สภาวะบรรยากาศ (Open pan evaporation).....29
2.17	ชุดหม้อต้มระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum pan evaporation).....30
2.18	หลักการทำงานของการต้มระเหยด้วย Thermal vapor recompression.....31
2.19	หลักการทำงานของการต้มระเหยด้วย Mechanical vapor recompression).....31
2.20	กลไกการเกิดตะกักรันเกาะจับที่ผนังท่อ.....33
2.21	แผนภาพสมดุลคาร์บอนเต.....34
2.22	กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตจากน้ำเกลือและโซเดียมคาร์บอเนต.....36
2.23	กระบวนการผลิตแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำเกลือและแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 กระบวนการตกตะกอน โดยการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	40
2.25 กลไกของสารยับยั้งในการป้องกันการเกิดตะกอน.....	41
3.1 แผนผังภาพรวมของการทดลอง.....	49
3.2 องค์ประกอบอย่างง่ายของเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี.....	51
3.3 องค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม.....	55
3.4 อุปกรณ์จำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกอนอย่างง่าย.....	66
4.1 ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นในหม้อเคียวระบบสุญญากาศ.....	72
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารใน (a) ตะกอน และ (b) $Mg(OH)_2$ บริสุทธิ์.....	73
4.3 โครงสร้างสารประกอบของ (a) $CaCO_3$, (b) $Mg(OH)_2$ และ (c) ตะกอน.....	74
4.4 ปริมาณร้อยละของธาตุองค์ประกอบในตะกอนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	75
4.5 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) $Mg(OH)_2$ บริสุทธิ์ และ (b) ตะกอน.....	76
4.6 ร้อยละของการกำจัดไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน.....	78
4.7 ความเข้มข้นของ ไอออนคาร์บอเนตและ ไบคาร์บอเนตในน้ำเกลือที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	80
4.8 ผลการใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนที่มีต่อการลดระยะเวลาในการตกตะกอน.....	82
4.9 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือสังเคราะห์.....	84
4.10 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่มี Mg^{2+} เท่ากับ 43.59 mg/L.....	85
4.11 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Mg^{2+} 239.15 mg/L (C200) และ 596.7 mg/L (C600).....	86
4.12 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือกำจัดที่ไอออนแล้วด้วยสภาวะ PC-PH และน้ำเกลือดิบ (ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Mg^{2+} เท่ากับ 1,440 และ 1,666.7 mg/L ตามลำดับ).....	86
4.13 สัดส่วน โมลของ $Mg(OH)_2$ ที่ละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	88
4.14 สัดส่วน โมลของ $Mg(OH)_2$ ที่ละลายได้ในน้ำเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	89
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln X_1$ และ $1/T$ จากสมการของ van't Hoff จากการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือที่มี Mg^{2+} เท่ากับ 239.15 mg/L.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ปริมาณตะกอนจากการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่ใช้สารช่วยเร่งตกตะกอน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	92
4.17 ปริมาณตะกอนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในหม้อเคี้ยวเมื่อใช้น้ำเกลือที่มีสถานะเดียวกับ การทดลองในห้องปฏิบัติการป้อนเข้าหม้อเคี้ยวด้วยอัตรา 800 m ³ /day	92
4.18 ปริมาณตะกอนที่ได้จากการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่ผ่านการตกตะกอนภายใต้ แรงโน้มถ่วงของโลกด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน	93
4.19 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณตะกอนและความหนาของตะกอนที่คาดว่าจะ จะเกิดขึ้น เมื่อป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศปริมาตร 800 m ³ /day	94
4.20 ผลของน้ำเกลือจากโรงงานต่อปริมาณตะกอนและความหนาของตะกอนที่คาดว่าจะ จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคี้ยวปริมาตร 800 m ³ /day	95
4.21 XRD pattern ของตะกอนที่เกิดขึ้นในการอุ่นร้อนน้ำเกลือ	96
4.22 ค่าความเข้มข้นของไอออนหลังการเติมตัวล่อ ปริมาณ 0.1 กรัม ต่อน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ปริมาตร 150 mL ณ เวลาต่าง ๆ	98
4.23 ค่าความเข้มข้นของไอออนหลังการเติมตัวล่อ ปริมาณ 0.2 กรัม ต่อน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ปริมาตร 150 mL ณ เวลาต่าง ๆ	99
4.24 ตะกอนที่ก่อตัวบนผิวท่อรูปตัวยูและของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ด้านล่างของ ชุดการทดลองเมื่อไม่มีการใช้สารป้องกันการเกิดตะกอน	100
4.25 ปริมาณของแข็งและตะกอนที่เกิดขึ้นจากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกอน จากน้ำเกลือที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นที่ท่อรูปตัวยู	101
4.26 การเกาะตัวของของแข็งบนผิวท่อเมื่อมีการเติมสารป้องกันการเกิดตะกอน	102
4.27 โครงสร้างผลึกของตะกอนที่เกิดในชุดจำลองเมื่อใช้น้ำเกลือดิบในการศึกษา	103
4.28 โครงสร้างผลึกของตะกอนที่เกิดในชุดจำลองเมื่อใช้น้ำเกลือที่ผ่านกระบวนการ การกำจัดไอออนด้วยสถานะ PC-PH และ SC-SH	104
4.29 การเกิด Nucleate boiling บนพื้นผิวท่อรูปตัวยูของชุดจำลองการเกิดตะกอน	105
4.30 การเกิดตะกอนบนพื้นผิวท่อรูปตัวยูของชุดจำลองการเกิดตะกอน	105
4.31 การเกิดฟองและการเกิดตะกอน	106

สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.32 กลไกการเกิดตะกอนจากชุดจำลองการศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกอน	106
4.33 แผนผังกระบวนการผลิตเกลือของบริษัทสยามทรัพย์มณี	109
4.34 ลักษณะของถังตกตะกอนแบบ Lamellar	110
4.35 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน	112
4.36 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน	114
4.37 ลักษณะของ ไอออนในน้ำก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) ผ่านคอลลอยด์-เอ-ตรอน	116
4.38 ผลการสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนจากบ่อผสม	118
4.39 โครงสร้างผลึกของกากตะกอน (a) ก่อนเผา และ (b) หลังเผา	119
4.40 ลักษณะผลึกของ (a) กากตะกอนที่อบแห้งแล้ว กับ (b) ตัวเร่งปฏิกิริยา	119
4.41 การคายซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ -TPD) บนตัวเร่งปฏิกิริยา	121
4.42 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการเพิ่มสารเคมีในการกำจัดไอออนเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ	125
4.43 แผนผังแสดงวิธีการทำ Optimization ของแบบจำลองการคำนวณหม้อเคียวสุญญากาศ	127
4.44 การกรอกข้อมูลสำหรับคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออนตามสภาวะ SC-SH	130
4.45 การแสดงผลการคำนวณของส่วนกระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ	131
4.46 หน้าต่างแสดงผลของการคำนวณชุดหม้อเคียวของส่วนกระบวนการผลิตเม็ดเกลือ	132
4.47 การคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชุดหม้อเคียวด้วยวิธีการ Optimization ด้วยโปรแกรม Solver	133
4.48 หน้าต่างแสดงผลจากการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากsheet Production	134
4.49 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ	135
1ก แผนผังชุดหม้อเคียวสำหรับการทำสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน	156

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\lambda_{x\text{-ray}}$	=	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
θ	=	มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก
$\Delta G_{\text{Diss}}^{\circ}$	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (J/mol)
$\Delta H_{\text{Diss}}^{\circ}$	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการละลาย (J/mol)
$\Delta S_{\text{Diss}}^{\circ}$	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการละลาย (J/mol·K)
Å	=	อังสตรอม
A_a	=	ราคาของอุปกรณ์ของกำลังการผลิตที่ต้องการ C_a
A_b	=	ราคาของอุปกรณ์ของกำลังการผลิตที่ทราบค่า C_b
A, B, C	=	ค่าคงที่ของสมการ โพลีโนเมียลและสมการของ van't Hoff
BET	=	บรูน่าวัวร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer–Emmett–Teller)
C_a	=	กำลังการผลิตที่ต้องการ
C_b	=	กำลังการผลิตที่ทราบค่า
C_1	=	ราคาของอุปกรณ์ในอดีต
C_2	=	ราคาของอุปกรณ์ในปัจจุบัน
Ca^{2+}	=	ไอออนแคลเซียม
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
CaCO_3	=	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaSO_4	=	แคลเซียมซัลเฟต
Cal-red	=	แคลคอนคาร์บอกซิลิก เอซิด (Calconcarboxylic acid)
Cl^-	=	ไอออนคลอไรด์
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
CO_3^{2-}	=	ไอออนคาร์บอเนต
COM	=	ราคาต้นทุนทั้งหมดในการผลิต (บาท/หน่วยการผลิต)
$\text{CO}_2\text{-TPD}$	=	เทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 -Temperature Programmed Desorption)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

cSt	=	เซนติสโตก (Centistoke)
C14:0	=	กรดไมริสติก (Myristic acid)
C14:1	=	กรดไมริสโตเลอิก (Myristoleic acid)
C15:0	=	กรดเพนตะเดคาโนอิก (Pentadecanoic acid)
C16:0	=	กรดปาล์มิติก (Palmitic acid)
C16:1	=	กรดปาล์มิตอเลอิก (Palmitoleic acid)
C18:0	=	กรดสเตียริก (Stearic acid)
C18:1	=	กรดโอเลอิก (Oleic acid)
C18:2	=	กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid)
C200	=	น้ำเกลือที่มีค่าความเข้มข้นของไอออนแมกนีเซียม 239.15 mg/L
C600	=	น้ำเกลือที่มีค่าความเข้มข้นของไอออนแมกนีเซียม 596.7 mg/L
d	=	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
DMC	=	ราคาต้นทุนโดยตรง (บาท/หน่วย)
DSC	=	เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter)
EDTA	=	เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะเซติกแอซิด (Ethylene diamine tetra-acetic acid)
EDXRF	=	เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบอีเนอจีดีสเพอซิชฟ
Fe ₃ O ₄	=	แมกนีไทต์
FMC	=	ราคาต้นทุนคงที่ (บาท/หน่วย)
FTIR	=	เทคนิคฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy)
GE	=	ค่าใช้จ่ายทั่วไป (บาท/หน่วย)
HCO ₃ ⁻	=	ไอออนไบคาร์บอเนต
I ₁	=	ดัชนีราคาในอดีต
I ₂	=	ดัชนีราคาในปัจจุบัน
IC	=	เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatograph)
m ³	=	ลูกบาศก์เมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Mg^{2+}	=	ไอออนแมกนีเซียม
$Mg(OH)_2$	=	แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
$MgSO_4$	=	แมกนีเซียมซัลเฟต
mL	=	มิลลิลิตร
n	=	เลขจำนวนเต็ม
Na^+	=	ไอออนโซเดียม
N_{EDTA}	=	ความเข้มข้นที่แท้จริงของ EDTA (mol/L)
N_{HCl}	=	ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (mol/L)
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2CO_3	=	โซเดียมคาร์บอเนต
NH_4Cl	=	แอมโมเนียมคลอไรด์
NH_4OH	=	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
OH^-	=	ไอออนไฮดรอกไซด์
PC-PH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดไอออนในน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียมคาร์บอเนตและสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนตามโรงงาน
R^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ
S_{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาจากสมการ BET (m^2/g)
SC-SH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียมคาร์บอเนตและสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนไอออนแคลเซียมและไอออนแมกนีเซียม
SC-50%SH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียมคาร์บอเนตตามสัดส่วนไอออนแคลเซียมและใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50% ของไอออนแมกนีเซียม
SEM	=	เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscopy)
SO_4^{2-}	=	ไอออนซัลเฟต
STA	=	เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุแบบซิมูเทนเนียส (Simultaneous thermal analysis)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T	=	อุณหภูมิ (K)
T _{mean}	=	อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 305.15-353.15 K
TGA	=	เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาลิซิส (Thermogravimetric analysis)
V _{mo}	=	ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตเมื่อมีการใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์
V _p	=	ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตเมื่อมีการใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์
V _s	=	ปริมาตรของน้ำเกลือที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่า (100 mL)
wt. %	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก
110%SC-110%SH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดไอออนในน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียม-คาร์บอเนตและสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 110% ของปริมาณไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม
120%SC-120%SH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดไอออนในน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียม-คาร์บอเนตและสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 120% ของปริมาณไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม
130%SC-130%SH	=	สภาวะที่ใช้ในการกำจัดไอออนในน้ำเกลือโดยใช้สารโซเดียม-คาร์บอเนตและสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 130% ของปริมาณไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม
x	=	Cost capacity factor ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6
X ₁	=	สัดส่วนโมลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเกลือ
XRD	=	เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) (Energy dispersive x-ray fluorescence)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เกลือ (Salt) เป็นวัตถุดิบที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบพื้นฐานในการปรุงรสอาหารและการถนอมอาหาร แต่ในปัจจุบัน นอกจากการใช้เกลือเพื่อบริโภคแล้ว เกลือยังมีบทบาทที่สำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเกลือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมการเกษตร จากการเติบโตและการพัฒนาอุตสาหกรรมในการผลิตสินค้าเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและบริ โภคที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ความต้องการใช้เกลือมีเพิ่มสูงขึ้น ในอดีตเกลือมีความสำคัญมาก จนถูกใช้เป็นค่าตอบแทนให้กับนักรบในสมัยโรมัน ภาษาละตินจะเรียกค่าตอบแทนนี้ว่า “Salarium” เป็นที่มาของคำว่า “Salary” ซึ่งหมายถึงเงินเดือน โดยรากศัพท์ของ “Salarium” หรือ “Salary” มาจากคำว่า “Sal-” ที่มาจากคำเดิมคือ “Salt” และนอกจากนี้ ยังมีการใช้ก้อนเกลือแทนเงินตราในประเทศทิเบตและมองโกเลียอีกด้วย (เคอร์ตันสกี, 2552)

สืบเนื่องจากอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการพัฒนาและขยายตัวมากขึ้น การคาดการณ์แนวโน้มการใช้เกลือของโลกในปี 2561 จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 ต่อปี โดยจะมีปริมาณการใช้เกลือที่สูงถึง 325 ล้านตัน จากเดิมที่มีการใช้เกลือในช่วงปี 2551-2556 อยู่ที่ประมาณ 302 ล้านตันต่อปี โดยกลุ่มประเทศที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดคือเอเชียและแปซิฟิก ซึ่งคาดว่าความต้องการในกลุ่มนี้จะมากกว่าค่าเฉลี่ยของโลก ประเทศจีนและอินเดียจะมีการใช้มากที่สุด เนื่องจากการเติบโตและการพัฒนาของอุตสาหกรรมคลอรีน-อัลคาไล (Freedonia, www, 2014) ซึ่งอุตสาหกรรมคลอรีน-อัลคาไลเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้เกลือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซคลอรีน (Cl_2) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) โดยกระบวนการแยกน้ำเกลือด้วยกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมนี้ยังให้ผลพลอยได้คือก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ด้วย ตัวอย่างของการนำสารผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมคลอรีน-อัลคาไลไปใช้ประโยชน์มี ดังนี้ สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น การผลิตเยื่อและกระดาษ การผลิตสบู่และผลิตภัณฑ์เส้นใย เป็นต้น ส่วนก๊าซคลอรีน มีการนำไปใช้งานที่หลากหลายเช่นกัน อาทิ การผลิตกรดไฮโดรคลอริก (HCl) การผลิตพลาสติก และสารตั้งต้นสำหรับผลิตน้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น (Austin, 1984)

ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจน สามารถนำไปใช้ในการผลิตแอมโมเนีย (NH_3) ใช้ในกระบวนการไฮโดร-จิเนชั่น (Hydrogenation) และเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการต่าง ๆ ทางเคมี อีกทั้งก๊าซไฮโดรเจนยังเป็นที่น่าสนใจในด้านพลังงานทางเลือกอีกด้วย สำหรับอุตสาหกรรมเกลือในประเทศไทยนั้น มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1.2 ล้านตันต่อปี โดยครึ่งหนึ่งของเกลือทั้งหมดที่ผลิตได้นั้นเป็นเกลือที่ผลิตด้วยกระบวนการต้มระเหยภายใต้สภาวะสูญญากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตเพื่อส่งออกและใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมสารเคมี ส่วนปริมาณการใช้เกลือเพื่อการบริโภคในครัวเรือนของคนไทยจะอยู่ที่ 76,000 ตันต่อปี โดยที่คนไทยส่วนใหญ่ยังคงบริโภคเกลือจากนาเกลือหรือเกลือต้ม แต่คาดการณ์ว่าการใช้เกลือที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์จะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากรายได้ของประชาชนที่เพิ่มขึ้นและลักษณะการดำเนินชีวิตที่เปลี่ยนไป (Chidchai Muensriphu et al., 2010) จากความต้องการใช้เกลือที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เช่น ในประเทศไทยจากเดิมการผลิตเกลือใช้ดินหรือคราบเกลือบนผิวดิน ไปละลายน้ำแล้วนำมาต้มให้ได้ผลึกเกลือ ต่อมาก็เข้าสู่ยุคของการทำนาเกลือโดยการใช้น้ำเค็มจากทะเล หรือน้ำเกลือจากใต้ดินมาทำการระเหยน้ำบนลานดินหรือลานซีเมนต์ เพื่อให้ได้เกลือปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการผลิตเกลือด้วยการทำนาเกลือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น ดินเค็ม สัตว์น้ำตาย เกิดความเสียหายต่อข้าวในนา ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตเกลือไปเป็นการทำเหมืองละลายเกลือหินแทน ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตเกลือจากเหมืองละลายเกลือหินใต้ดินเติบโตมากในจังหวัดนครราชสีมา โดยมีการนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาใช้ในการผลิต เพื่อผลิตเกลือในปริมาณที่มากขึ้นและใช้ระยะเวลาสั้นลง รวมถึงได้เกลือมีคุณภาพและความบริสุทธิ์สูงด้วย ซึ่งขั้นตอนสำคัญที่ทำให้เกลือมีคุณภาพคือขั้นตอนการกำจัดสารเจือปน จำพวกไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม โดยวิธีที่นิยมใช้คือการใส่สารเคมี ซึ่งสารที่นิยมใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังที่มีการรายงานไว้โดย Moritz (1982)

ในขั้นตอนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ นอกจากจะเป็นการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือเพื่อให้ได้เกลือที่มีความบริสุทธิ์แล้ว ยังเป็นการลดสาเหตุของการเกิดตะกอนในกระบวนการผลิตเกลือได้อีกด้วย เนื่องจากการเกิดตะกอนนั้น โดยทั่วไปเกิดจากการที่มีสารต้นเหตุของการเกิดตะกอนปะปนอยู่ในสารละลายในรูปของไอออน อาทิเช่น ไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารละลาย เช่น สารละลายมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ไอออนเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายต่ำลงและแยกตัวออกมาในรูปของแข็ง อาทิ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งของแข็งที่เกิดขึ้นอาจจะแขวนลอยอยู่ในสารละลายหรือเข้าไปเกาะที่พื้นผิวของท่อจนก่อตัวเป็นตะกอน (Heitmann, 1990) การเกิดตะกอน

มักจะส่งผลเสียให้กับกระบวนการผลิต เช่น สูญเสียกำลังการผลิตเนื่องจากการสูญเสียความร้อน และมีการสิ้นเปลืองพลังงานที่มากขึ้น จากปัญหาที่ได้รับผลกระทบมาจากการเกิดตะกรัน จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการเกิดตะกรันและแนวทางในการป้องกัน เช่น Amjad (2004) ได้ศึกษาการเกิดตะกรันของยิปซัมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากทองเหลือง และศึกษาอิทธิพลของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ ที่มีผลต่อการยับยั้งการเกิดตะกรัน ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์สามารถยับยั้งการเกิดตะกรันของยิปซัมได้ และยังทำให้โครงสร้างของยิปซัมเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับยิปซัมที่เกิดขึ้นในสารละลายที่ไม่มีการเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ Kazi et al. (2015) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันของ CaCO_3 บนพื้นผิวท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและศึกษาวิธีลดตะกรันโดยใช้กัมอารบิก (Gum Arabic) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ โดยพบว่าปริมาณการก่อตัวของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 บนพื้นผิวท่อที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกันมีปริมาณดังนี้ อะลูมิเนียม > ทองเหลือง > เหล็กกล้าไร้สนิม 316 และการเติมกัมอารบิกลงไป ในสารละลายจะช่วยหน่วงการเติบโตของผลึก CaCO_3 ส่งผลให้ตะกรันที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง

นอกจากความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และแมกนีเซียม Mg^{2+} ที่สูง จะเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันแล้ว การแยกตะกอนหลังการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการใช้สารละลาย Na_2CO_3 และ NaOH จะกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ออกมาในรูปตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากน้ำเกลือด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การตกตะกอน การกรอง การใช้เทคนิคการอุ่นร้อน และการใช้แม่เหล็ก (Lehmann et al., 2014) เพราะตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเกลือที่ผลิตได้ และเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันในหม้อต้มได้ อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือหรือแม้แต่ตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หากมีกระบวนการที่สามารถแยกสารแต่ละชนิดให้มีความบริสุทธิ์ได้ เช่น Lehmann et al. (2014) ได้ศึกษาการนำเอาสารละลายแมกนีเซียม (Mg) จากน้ำเกลือที่ออกจากหน่วย Reverse Osmosis (RO) กลับมาใช้ โดยใช้วิธีการตกตะกอน Mg ออกมาในรูปของสาร Mg(OH)_2 จากนั้นใช้แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) สำหรับดูดซับตะกอนของ Mg(OH)_2 และใช้แม่เหล็กในการแยกของแข็งออกจากสารละลาย จากนั้นใช้กรด HCl จะสารละลาย Mg ออกจาก Fe_3O_4 ก่อนจะกรองแยกซ้ำเพื่อแยก Fe_3O_4 และนำกลับไปใช้อีกครั้ง ซึ่งตลาดของ Mg(OH)_2 คาดการณ์ว่าในปี 2013-2018 จะเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการนำไปใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟ (ISH Markt, www, 2014) นอกจากนี้ Mg(OH)_2 ยังสามารถนำไปใช้ในการเกษตร นำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงใช้ Mg(OH)_2 เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะ Mg ที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากเป็นโลหะมีน้ำหนักเบา (Kramer, www, 2001) และสำหรับตะกอน CaCO_3 ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยมีการคาดการณ์ว่าในปี 2020

ความต้องการในการใช้ CaCO_3 ในตลาดโลกจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 98.7 ล้านตัน โดยอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตพลาสติกและอุตสาหกรรมผลิตสี เป็นตัวขับเคลื่อนตลาดของ CaCO_3 (Global Industry Analysts, www, 2015)

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาหาสาเหตุของการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ โดยจะศึกษาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเกลือดิบและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันที่เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำจากนั้นทำการศึกษาและเสนอแนะแนวทางสำหรับป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ และแนวทางสำหรับเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอน พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำแนวทางที่เสนอแนะไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน โดยจะทำการประเมินต้นทุนการผลิตเกลือเบื้องต้นสำหรับการนำแนวทางป้องกันการเกิดตะกรันไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางในการกำจัดสารเจือปนในน้ำเกลือที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อไอน้ำระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อเสนอแนะวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพและประเมินต้นทุน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือด้วยการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 1.3.2 ศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือโดยการเติมสารเร่งตกตะกอนชนิด โพลีอะคริลาไมด์ การแยกตะกอนด้วยการอุ่นร้อน และการเติมตัวล่อผลึกเพื่อเหนี่ยวนำการตกตะกอน
- 1.3.3 ศึกษาการป้องกันการเกิดตะกรันโดยการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน
- 1.3.4 เสนอแนะวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน หาประสิทธิภาพ และประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อไอน้ำระบบสุญญากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.4.1 องค์ความรู้เกี่ยวกับสาเหตุและหลักการของการเกิดตะกรัน พร้อมทั้งแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อเคี้ยวของกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ
- 1.4.2 ได้กระบวนการป้องกันการเกิดตะกรันที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานจริง พร้อมผลการวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมเกลือเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีความน่าสนใจและมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในการทำความเข้าใจถึงองค์ความรู้และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเกลือ จะช่วยให้มีการเรียนรู้และการพัฒนาเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น เนื้อหาในบทที่ 2 จะแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเกลือ ความเป็นมาของเกลือ เศรษฐกิจของอุตสาหกรรมเกลือในอดีตจนถึงปัจจุบัน กระบวนการผลิตเกลือ การนำไปใช้งานต่าง ๆ รวมไปถึงรายละเอียดของสารที่เป็นต้นเหตุของการเกิดตะกรัน ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ตลอดจนแสดงข้อมูลที่อธิบายถึงปัญหาของการเกิดตะกรันและวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน

2.1 เกลือ

เกลือเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่มีความสำคัญ เพราะนอกจากจะใช้เป็นเครื่องปรุงรสอาหาร ใช้ในการถนอมอาหาร และใช้เป็นสารเคมีตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในปัจจุบันแล้ว ในอดีตเกลือยังมีค่าเทียบเท่ากับเงินตรา จนเป็นชนวนที่ทำให้เกิดสงครามในยุคล่าอาณานิคม สำหรับคำจำกัดความของเกลือที่ใช้มาจนถึงปัจจุบัน ถูกนิยามขึ้นในปี ค.ศ. 1744 โดยกิลโลเม ฟรองซัวส์ รูเอล (Guillaume François Rouelle) ซึ่งนิยามว่า “เกลือคือสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับด่าง” ต่อมานักวิทยาศาสตร์ต่างเกิดคำถามถึงต้นกำเนิดของเกลือจึงทำให้เกิดข้อสันนิษฐานต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) ได้สรุปว่าเกลือมาจากอากาศ ในขณะที่บางคนกล่าวว่าเกลือมาจากอัลคาไล นอกจากนี้ การค้นหาต้นกำเนิดของเกลือยังนำมาสู่การโต้แย้งทางธรณีวิทยา ซึ่งลัทธินีเปจูนเชื่อว่าเกลือมาจากทะเล เนื่องจากทะเลโบราณทั่วไปเป็นแหล่งที่มาของชั้นหินทั้งหมด ในขณะที่ลัทธินิวโตกลับเชื่อว่าเกลือมาจากภูเขาไฟ เนื่องจากหินเกิดจากการแข็งตัวของมวลหินที่หลอมละลาย และถึงแม้ว่ายังไม่มียุติเกี่ยวกับการก่อตัวของตะกอนเกลือ แต่คนส่วนใหญ่มีความเชื่อว่าเกลือมีต้นกำเนิดมาจากน้ำทะเล (เคอร์สันสกี, 2552) รวมถึงแหล่งของชั้นเกลือในประเทศไทยด้วย

2.1.1 แหล่งที่มาของเกลือและวิธีการนำเกลือมาใช้ประโยชน์ (Kaufmann, 1960)

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เกลือสามารถผลิตได้จากแหล่งที่มาและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน แม้ว่าในปัจจุบันแหล่งของน้ำเกลือและกระบวนการผลิตบางกระบวนการได้มีการเลิกใช้กันไปแล้ว แต่เพื่อให้ทราบถึงแหล่งกำเนิดของเกลือ จึงยกตัวอย่างแหล่งที่มาของเกลือที่สำคัญ ดังนี้

- 1) น้ำเค็ม (Brine) ได้แก่ น้ำทะเล น้ำเค็มจากทะเลสาบ น้ำเกลือธรรมชาติ
- 2) แร่เกลือหิน (Rock salt deposits) ได้แก่ บ่อละลายใต้ดิน เหมือนใต้ดิน และเหมืองบนดิน

- 3) เกลือที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมี
- 4) เกลือที่ได้จากพืช
- 5) เกลือที่แทรกตัวอยู่ตามถ้ำหินหรือโคลน

ซึ่งแต่ละแหล่งที่มาของเกลือ นั้น จะมีวิธีในการนำเอาเกลือมาใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ที่เคยใช้งานและบางวิธีการยังคงมีการใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน มีดังนี้

- 1) การระเหยน้ำเค็มด้วยแสงอาทิตย์
- 2) การทำเหมืองเกลือบนดิน
- 3) การทำเหมืองใต้ดิน
- 4) การเผาพืชที่มีเกลือ
- 5) การต้มระเหยน้ำเค็มโดยใช้ไฟ
- 6) การระเหยน้ำเค็มในถัง (Vessel)
- 7) การชะเกลือออกจากถ้ำหินหรือโคลน จากนั้นนำไปทำการระเหย
- 8) การระเหิด
- 9) การนำเอาเกลือที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีมาใช้

จากข้อมูลของแหล่งที่มาและกระบวนการผลิตเกลือ จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มาของเกลือที่ยังมีการใช้งานอยู่ ประกอบด้วย น้ำเค็มจากทะเลหรือน้ำเค็มจากแหล่งธรรมชาติและแหล่งแร่เกลือหิน ซึ่งวิธีการผลิตที่มีให้เห็นในปัจจุบันนั้น หากเป็นน้ำเค็มที่ได้จากทะเลจะใช้วิธีการระเหยน้ำด้วยแสงอาทิตย์หรือเรียกว่าการทำนาเกลือ ส่วนน้ำเค็มที่ได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติก็มีทั้งการระเหยด้วยแสงอาทิตย์และการต้มระเหย ในขณะที่การผลิตเกลือจากแร่เกลือหินนั้นจะต้องมีกระบวนการละลายก่อนจากนั้นจึงจะทำการต้มระเหย โดยส่วนใหญ่แล้วการผลิตเกลือในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะใช้การต้มระเหยภายในถังและมีกระบวนการที่ควบคุมคุณภาพการผลิตเกลือเป็นอย่างดี

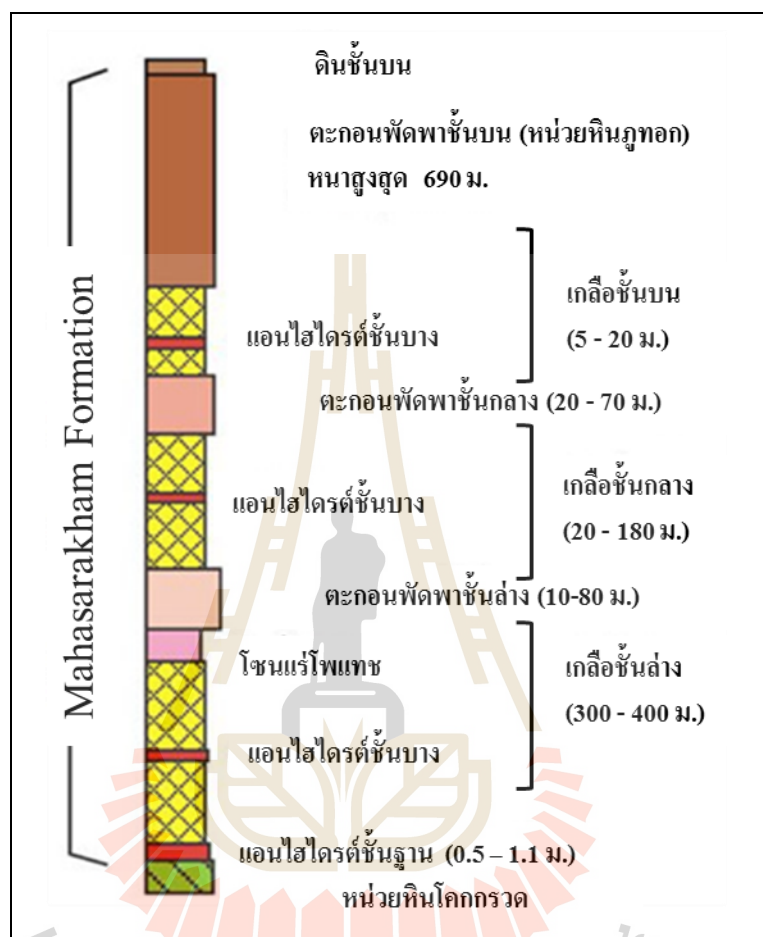
2.1.2 การผลิตเกลือในประเทศไทย

สำหรับการผลิตเกลือในประเทศไทยนั้น มีการผลิตเกลือจากแหล่งเกลือ 2 แหล่ง ได้แก่ น้ำทะเลและแร่เกลือหิน โดยจะเรียกเกลือจากน้ำทะเลว่าเกลือสมุทร และเกลือที่ได้จากแร่เกลือหินจะเรียกว่าเกลือสินเธาว์ ซึ่งรายละเอียดของการผลิตเกลือสมุทรและเกลือสินเธาว์มีดังนี้

1) **เกลือสมุทร** เป็นเกลือที่ได้จากการนำเอาน้ำทะเลขึ้นมาตากแดดเพื่อให้น้ำระเหยจนเหลือแต่ผลึกเกลือหรือที่เรียกว่า “การทำนาเกลือ” โดยบริเวณที่เหมาะสมสำหรับการทำนาเกลือต้องมีลักษณะเป็นที่ราบ สภาพดินเป็นดินเหนียว สามารถอุ้มน้ำได้ เพื่อป้องกันน้ำเค็มซึมลงใต้ดิน ซึ่งการทำนาเกลือจากน้ำทะเลนั้นมีมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันและแหล่งผลิตเกลือสมุทรที่สำคัญ ได้แก่ จังหวัดเพชรบุรี สมุทรสาคร และสมุทรสงคราม โดยฤดูกาลของการทำเกลือสมุทรคือช่วงต้นเดือนพฤศจิกายนถึงประมาณกลางเดือนพฤษภาคมของปีถัดไป สำหรับผลผลิตของเกลือสมุทรโดยเฉลี่ยทั่วประเทศมีประมาณปีละ 990,000 ตัน ซึ่งราคาของเกลือสมุทรนั้นจะเคลื่อนไหวขึ้นลงตามอุปสงค์และอุปทาน โดยเกลือสมุทรนั้นเป็นสินค้าที่มีทั้งการนำเข้าและส่งออกไปยังต่างประเทศ โดยเฉลี่ยแล้วจะมีการนำเข้าเกลือสมุทรปีละ 7,383.5 ตัน ซึ่งประเทศไทยส่งนำเข้าเกลือจากเวียดนาม ออสเตรเลียและมาเลเซีย ในขณะที่การส่งออกเกลือสมุทรของไทยมีมานานแล้ว แต่เนื่องจากมีคู่แข่งที่เพิ่มขึ้น ทำให้เฉลี่ยแล้วมีการส่งออกเกลือประมาณปีละ 1,900 ตัน โดยส่งไปยังมาเลเซียและสหรัฐอเมริกา (คณะอนุกรรมการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล, 2010) และสำหรับราคาของเกลือสมุทรในปี 2558 นั้นอยู่ที่ 3,000 บาทต่อตัน ซึ่งจากเดิมปี 2557 ราคาเกลือสมุทรจะอยู่ที่ 2,000 - 2,500 บาทต่อตัน (ประชาชาติธุรกิจออนไลน์, www, 2558)

2) **เกลือสินเธาว์** เป็นเกลือที่พบมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งการผลิตเกลือสินเธาว์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีที่มที่น่าสนใจ เนื่องจากมีหลักฐานที่แสดงถึงแหล่งของเกลือสินเธาว์ขนาดใหญ่ ซึ่งมีข้อสันนิษฐานถึงแหล่งเกลือสินเธาว์ว่าเมื่อหลายล้านปีก่อนภาคอีสานอาจเคยเป็นทะเลหรือเคยถูกน้ำทะเลไหลเข้าท่วมตลอดทั้งภาค เมื่อแผ่นดินบริเวณนี้มีการยกตัวสูงขึ้น จึงทำให้น้ำทะเลบางส่วนลดถอยลงและไหลกลับสู่ทะเล แต่ยังมีน้ำทะเลบางส่วนที่ไหลกลับไม่ได้ เนื่องจากมีการยกตัวของพื้นดินและกักน้ำทะเลไว้จนเกิดเป็นทะเลสาบน้ำเค็ม เมื่อน้ำทะเลแห้งลงจึงเกิดเป็นตะกอนของเกลือและแร่ธาตุต่าง ๆ ที่จมลงสู่ก้นทะเลสาบ และเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาจึงทำให้เกิดเป็นเทือกเขาภูพานขึ้น ซึ่งการยกตัวของเทือกเขาภูพานในตอนกลางของภาคอีสาน ทำให้เกิดการแบ่งดินแดนเป็นสองส่วนที่มีลักษณะคล้ายกับแอ่ง ได้แก่ แอ่งทางเหนือหรือที่เรียกว่า “แอ่งสกลนคร” และแอ่งทางใต้เรียกว่า “แอ่งโคราช” ซึ่งน้ำทะเลที่ถูกกักไว้บริเวณนี้ ประกอบกับสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้งและฝนตกน้อย

จึงทำให้น้ำทะเลแห้งจนตกตะกอนเป็นเกลือและแร่โพแทชสะสมบนชั้นดินและชั้นหิน สำหรับชั้นเกลือหินและโพแทชนั้นจะพบใน “หมวดหินมหาสารคาม” ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลำดับชั้นหินของหมวดหินมหาสารคาม (บัวอิน, www, 2009)

โดยชั้นเกลือหินและโพแทชจะถูกปิดกั้นด้วยชั้นหินทราย หินทรายแป้งและหินดินดานของ “หมวดหินภูทอก” ที่ช่วยป้องกันการถูกละลายด้วยน้ำบาดาล ส่วนหินที่รองรับชั้นเกลือหินและโพแทชอยู่ทางด้านล่างจะเป็นหินทรายและหินกรวดมนของ “หมวดหินโลกกรวด” ในปี พ.ศ. 2516 มีการสำรวจเกลือหินและโพแทชทั้งแอ่งเหนือและแอ่งใต้ พบว่าเกลือหินมี 3 ชั้น ได้แก่ เกลือชั้นบน เกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่าง โดยมีชั้นดินเหนียวคั่นระหว่างชั้นเกลือเอาไว้ ในปี พ.ศ. 2526 มีการสำรวจถึงปริมาณเกลือสำรองในภาคอีสานของกรมธรณีวิทยา จากการสำรวจพบว่า มีแร่เกลือหิน

อย่างน้อย 18 ล้านล้านตัน รองลงมา ได้แก่ แร่โพแทชประมาณ 4.07 แสนล้านตันและแร่แมกนีเซียมประมาณ 2 แสนล้านตัน

สำหรับการผลิตเกลือสินเธาว์ในอดีตนั้น จากร่องรอยของอารยธรรมที่มีมาอย่างต่อเนื่องกว่า 2,000 ปี ทำให้มีข้อสันนิษฐานว่า “บ่อพันขัน” ซึ่งตั้งอยู่ใจกลางทุ่งกุลารุ จังหวัดร้อยเอ็ด เคยเป็นบ่อน้ำเกลือสินเธาว์ขนาดใหญ่ในภาคอีสาน เนื่องจากเป็นแหล่งอารยธรรมชุมชนขนาดใหญ่ที่มีการต้มเกลือมาตั้งแต่พุทธศตวรรษที่ 16 เพื่อส่งขายและแลกเปลี่ยนกับชุมชนรอบ ๆ ซึ่งในอดีตนั้น การผลิตเกลือสินเธาว์จะเป็นการทำแบบพื้นบ้านเป็นภูมิปัญญาที่ซับซ้อนด้วยรายละเอียดที่สืบทอดกันมา ที่เรียกว่า “การต้มเกลือ” คือการนำน้ำเกลือหรือการนำเอาดินเค็มมาละลายน้ำแล้วนำไปต้มเพื่อให้เกลือตกผลึก แต่ในบางพื้นที่ที่มีการผลิตเกลือสินเธาว์ด้วยวิธีการทำนาเกลือสินเธาว์แต่ในปัจจุบันการผลิตเกลือด้วยวิธีนี้ลดน้อยลงไป แต่ก็ยังมีให้เห็นอยู่บ้างในปัจจุบัน เช่น การผลิตเกลือสินเธาว์ในจังหวัดน่าน ซึ่งเป็นบ่อเกลือบนภูเขาแห่งเดียวในโลก

สำหรับสถานการณ์การผลิตเกลือในประเทศไทยในปัจจุบันมีการขยายตัวมากขึ้น เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งเกลือที่สามารถผลิตเกลือได้ตามความต้องการที่มากขึ้น จากการค้าการมาถึงโอกาสของไทยกับอุตสาหกรรมเกลือในอาเซียนจากศูนย์วิจัยเศรษฐกิจและธุรกิจ รายงานว่า ในการทำเหมืองแร่โพแทชขึ้นในประเทศไทยนั้น จะทำให้ได้เกลือเป็นผลพลอยได้ ซึ่งจะส่งผลให้ไทยขึ้นเป็นผู้ส่งออกเกลือรายใหญ่ในภูมิภาคอาเซียน ในปี 2557 มีการส่งออกเกลือสูงถึง 126,543 ตัน โดยส่งออกไปยังกลุ่มประเทศอาเซียน อาทิเช่น มาเลเซีย 20% เมียนมา 18% กัมพูชา 14% และฟิลิปปินส์ 9% และถึงแม้ว่าประเทศไทยสามารถผลิตเกลือและใช้เกลือได้อย่างสมดุล แต่ก็มีการนำเข้าที่สูงขึ้น โดยในปี 2557 ประเทศไทยมีการนำเข้าเกลือจากต่างประเทศถึง 47,452 ตัน (เลิศพงศ์ ลาภชีวะสิทธิ์, www, 2015) จากความเจริญก้าวหน้าและการเติบโตของเศรษฐกิจส่งผลให้กระบวนการผลิตเกลือในประเทศไทยมีการพัฒนาขึ้น โดยปัจจุบันการผลิตเกลือจะใช้วิธีการทำเหมืองละลายเกลือหินและนำน้ำเค็มมาต้มระเหยในถังปิด ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถควบคุมคุณภาพของเกลือได้เป็นอย่างดี ในขณะที่บทบาทของการทำนาเกลือต่อการผลิตเกลืออาจจะลดลง เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม อาทิ ทำลายระบบนิเวศของสัตว์น้ำ สร้างความเสียหายแก่ต้นข้าวในนาและก่อให้เกิดปัญหาดินเค็มเป็นบริเวณกว้างขึ้น ส่วนการต้มเกลือตามวิถีชาวบ้านยังคงมีอยู่ ซึ่งเป็นการผลิตเกลือเพื่อบริโภคและค้าขายตามชุมชนขนาดเล็ก

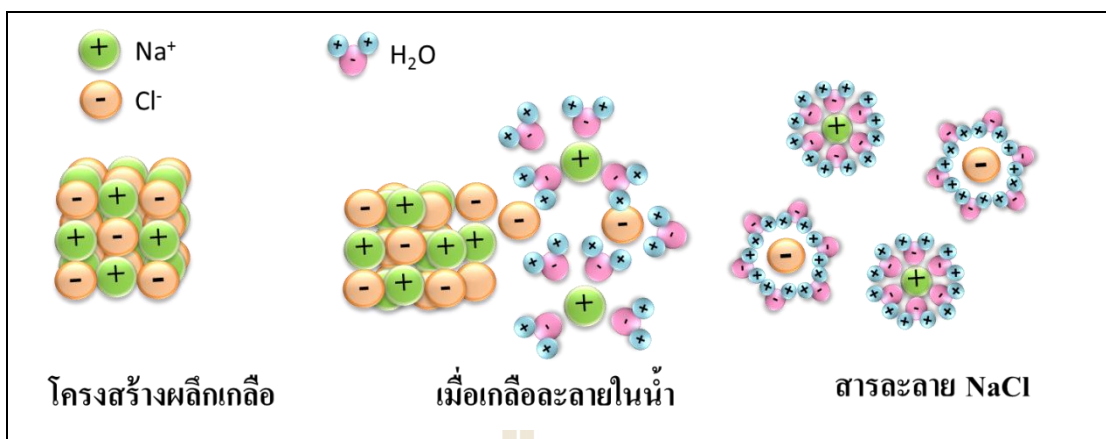
2.1.3 สมบัติของเกลือ

เกลือเป็นสารประกอบไอออนิก (Ionic compound) เมื่อถูกละลายจะแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ โดยตัวอย่างของเกลือชนิดต่าง ๆ มีดังนี้ เกลือแกงหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) โพแทชเชียมคลอไรด์ (KCl) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄)

และแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) สำหรับคำว่าเกลือในงานวิจัยนี้ หมายถึงโซเดียมคลอไรด์หรือ NaCl ที่ประกอบด้วยไอออนโซเดียม (Na^+) เป็นไอออนบวก (Cation) และไอออนคลอไรด์ (Cl^-) เป็นไอออนลบ (Anion) ซึ่งลักษณะผลึกของ NaCl เป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) โดยเกลือบริสุทธิ์จะมีสีขาว เมื่อเกลือละลายในน้ำจะกลายเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ (มหาวิทยาลัยรามคำแหง, [www](http://www.mru.ac.th), ม.ป.ป)

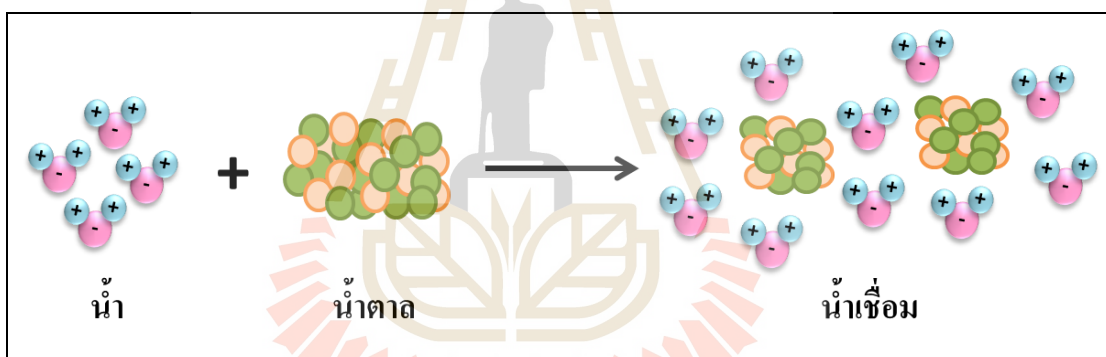
เกลือ NaCl มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 58.443 มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 800.7 และ 1,465 °C ตามลำดับ ถ้าอยู่ในสถานะสารละลาย NaCl อิ่มตัวจะมีจุดเดือดเท่ากับ 108.7 °C ซึ่งค่าความหนาแน่นของผลึกเกลือเท่ากับ 2.17 g/mL สำหรับความสามารถในการละลายของเกลือในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C จะเท่ากับ 36.0 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม แต่จะละลายได้เล็กน้อยในเอทานอล สำหรับความหนาแน่นของสารละลาย NaCl จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.965-1.149 g/mL และมีค่า pH ในช่วง 6.7-7.3 ซึ่งมีค่าเป็นกลาง (Kaufmann, 1960; PubChem, [www](http://www.ncbi.nlm.nih.gov), n.d.)

นอกจากสมบัติทั่วไปของเกลือแล้ว อีกหนึ่งสมบัติของเกลือที่น่าสนใจคือพฤติกรรมการละลายของเกลือในน้ำเทียบกับการละลายของน้ำตาล เนื่องจากเกลือเป็นสารประกอบไอออนิก เมื่อถูกละลายด้วยน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน Na^+ และ Cl^- ซึ่งแต่ละไอออนจะถูกโมเลกุลของน้ำเข้าไปล้อมไว้ โดยที่โมเลกุลของน้ำจะหันด้านบวกให้กับไอออน Cl^- ที่มีประจุลบ และหันด้านลบให้กับไอออน Na^+ ที่มีประจุบวก ซึ่งพฤติกรรมของโมเลกุลน้ำที่เข้าไปล้อมรอบไอออน Na^+ และ Cl^- เอาไว้นั้น จะเกิดเป็นชั้นของน้ำที่เรียกว่า “Hydration shell” ขึ้น ซึ่งชั้นที่สร้างขึ้นจะป้องกันการกันสร้างพันธะระหว่างโซเดียมและคลอไรด์จึงทำให้เกลือละลายในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะถูกเรียกว่า “Non-molecular solution” หมายถึงสารละลายที่โมเลกุลของสารแตกตัวเป็นไอออน ในขณะที่น้ำตาลซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ เมื่อละลายในน้ำจะไม่แตกตัวเป็นไอออน แต่จะแยกตัวออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กแทน ซึ่งสารละลายนี้มักถูกเรียกว่า “Molecular solution” โดยลักษณะการละลายของน้ำตาลในน้ำแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการละลายของเกลือ (NaCl) ในน้ำ

(Surfguppy, www, n.d.; kmacgill, www, n.d.)



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมการละลายของน้ำตาล (C₁₂H₂₂O₁₁) ในน้ำ

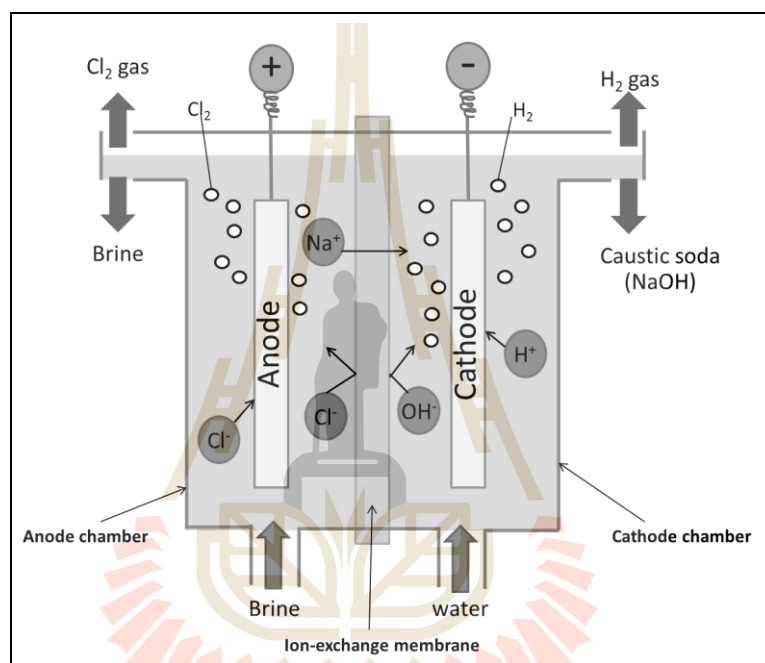
(Surfguppy, www, n.d.; kmacgill, www, n.d.)

2.1.4 การใช้ประโยชน์จากเกลือโซเดียมคลอไรด์

ในปัจจุบัน นอกจากจะใช้เกลือในการปรุงรสและใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว เกลือยังเข้าไปมีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตสารทำความเย็น และอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น โดยที่เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตก๊าซคลอรีน (Cl₂) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ที่เกิดจากกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า

กระบวนการคลอรั-อัลคาไล (Chlor-alkali process) รวมทั้งเกลือถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ด้วยกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process)

สำหรับกระบวนการแยกสารละลายเกลือด้วยไฟฟ้าหรือกระบวนการคลอรั-อัลคาไลแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การใช้เซลล์เยื่อแลกเปลี่ยนไอออน การใช้เซลล์โคอะเฟรม และ การใช้เซลล์ปรอท ซึ่งการใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนในการผลิตสารละลาย NaOH ด้วยกระแสไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.4

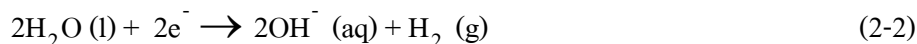


รูปที่ 2.4 การผลิตสารละลาย NaOH ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน
(Japan soda industry association, www, n.d.)

จากรูปที่ 2.4 เมื่อเติมสารละลาย NaCl อิ่มตัวและบริสุทธิ์ลงไปทางด้านแอโนด (Anode) และผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลาย จะทำให้ไอออน Na^+ เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนไปยังด้านแคโทด (Cathode) ซึ่งเยื่อไอออนแลกเปลี่ยนจะยอมให้เพียงไอออนบวกเท่านั้นที่ผ่านได้ ส่วนไอออน Cl^- จะยังอยู่ทางด้านแอโนด เมื่อเกิดการเสียอิเล็กตรอน จะเกิดเป็นก๊าซ Cl_2 ออกมา ดังสมการต่อไปนี้

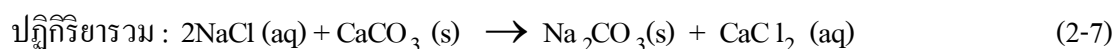
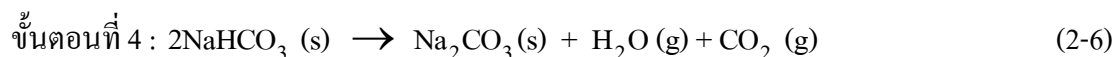
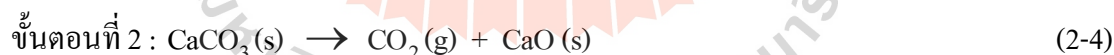


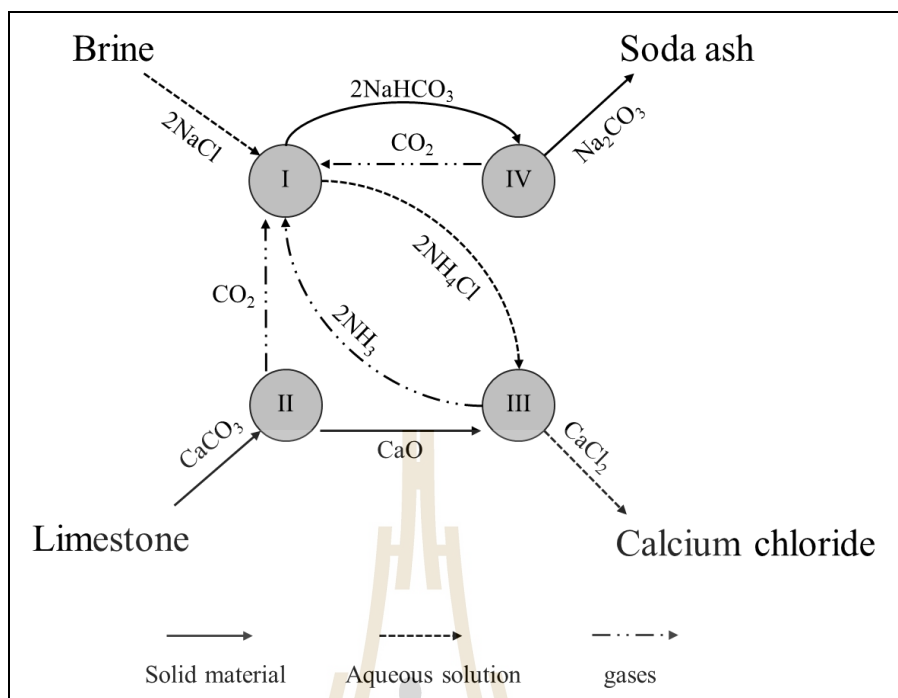
ส่วนทางด้านแคโทด น้ำจะรับอิเล็กตรอนแล้วเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ (2-2)



ซึ่งทางด้านแคโทดจะมีก๊าซ H_2 และไฮดรอกไซด์ (OH^-) เกิดขึ้น ซึ่ง OH^- ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับ Na^+ เกิดเป็นสารละลาย NaOH สำหรับก๊าซ Cl_2 ที่เกิดขึ้นทางด้านแอโนดและก๊าซ H_2 เกิดขึ้นทางด้านแคโทด จะไม่สามารถผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนได้ จึงไม่เกิดการผสมกันระหว่างก๊าซ Cl_2 และก๊าซ H_2 สำหรับสารเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการคลอรีน-อัลคาไล สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ก๊าซ Cl_2 ใช้ในการผลิตสารฆ่าเชื้อและสารทำความสะอาด ใช้ในการผลิตกรด HCl และการผลิตพลาสติก ส่วนสาร NaOH ใช้ในการผลิตสบู่ ใช้ในการกำจัดมลภาวะในน้ำ หรือใช้ในโรงงานผลิตกระดาษ สำหรับก๊าซ H_2 สามารถใช้ในการผลิตกรด HCl และใช้เป็นพลังงานทดแทนได้

สำหรับกระบวนการผลิต Na_2CO_3 ด้วยวิธีการโซลเวย์นั้น เป็นกระบวนการที่ใช้เกลือ NaCl และ CaCO_3 เป็นสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีผลพลอยได้จากกระบวนการนี้คือสารแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) กระบวนการโซลเวย์มีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนและปฏิกิริยารวมทั้งหมดของกระบวนการมีดังนี้ (Wikipedia, www, n.d.)



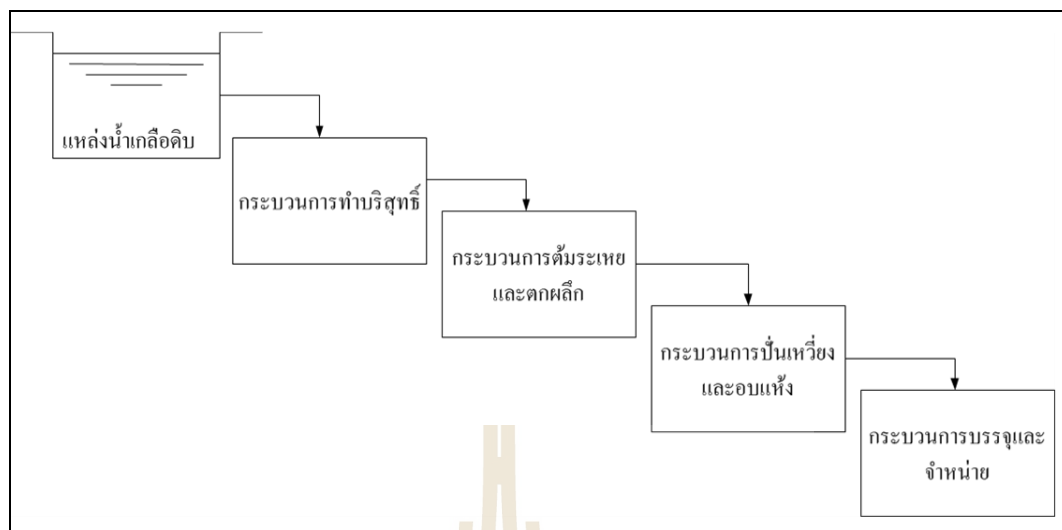


รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิต Na_2CO_3 ด้วยกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process)

(Wikipedia, www, n.d.)

2.2 กระบวนการผลิตเกลือในระดับอุตสาหกรรม

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเกลือในปัจจุบันจะมีการพัฒนาให้ทันสมัยมากขึ้น แต่ขั้นตอนและวิธีการยังคงเหมือนเดิม โดยขั้นตอนหลัก ๆ ของกระบวนการผลิตเกลือประกอบด้วย กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ กระบวนการต้มระเหยและตกผลึก กระบวนการปั่นเหวี่ยงและอบแห้ง กระบวนการบรรจุและจำหน่าย โดยกระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือเป็นกระบวนการที่กำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเกลือ ไม่ว่าจะเป็นไอออนต่าง ๆ เช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} หรือแม้กระทั่งดินที่ปนมากับน้ำเกลือ ซึ่งสิ่งเจือปนที่มากับน้ำเกลือจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเกลือ เมื่อน้ำเกลือผ่านกระบวนการทำบริสุทธิ์แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการต้มระเหยและตกผลึก จากนั้นผลึกเกลือจะถูกแยกออกจากน้ำเกลือด้วยกระบวนการปั่นเหวี่ยงและอบแห้ง เพื่อไล่ความชื้นออกจากผลึกเกลือก่อนจะเข้าสู่กระบวนการบรรจุและจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตเกลือ

2.2.1 แหล่งน้ำเกลือดิบ

ในปัจจุบัน แหล่งของน้ำเกลือดิบหรือน้ำเค็ม (Brine) ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเกลือแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ (Kaufmann, 1960)

1) น้ำเค็มที่ได้จากการละลายชั้นเกลือหินใต้ดิน เป็นน้ำเกลือที่ได้จากการอัดน้ำลงไป ที่ชั้นเกลือหินใต้ดิน เพื่อละลายเกลือให้เป็นน้ำเกลือเข้มข้นก่อนจะทำการสูบน้ำขึ้นมาเพื่อทำการผลิตเกลือต่อไป โดยการผลิตน้ำเกลือด้วยวิธีนี้ จะต้องมีการคำนวณถึงขนาดโพรงเกลือ เพราะเมื่อใช้งานจนโพรงเกลือมีขนาดใหญ่เกินไป อาจทำให้ดินบริเวณนั้นเกิดการยุบตัวได้ ซึ่งวิธีที่นิยมทำเพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินคือการอัดน้ำหรือน้ำขมที่เกิดจากกระบวนการผลิตเกลือลงไปเพื่อดำน้ำหนักของดินไว้

2) น้ำเค็มจากการนำแร่เกลือหินขึ้นมาละลาย เป็นการขุดเจาะอุโมงค์ลงใต้ดิน เพื่อนำเอาเกลือจากชั้นแร่เกลือหินขึ้นมาละลาย ซึ่งเหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่ในประเทศไทยยังไม่พบการดำเนินการผลิตเกลือด้วยวิธีนี้

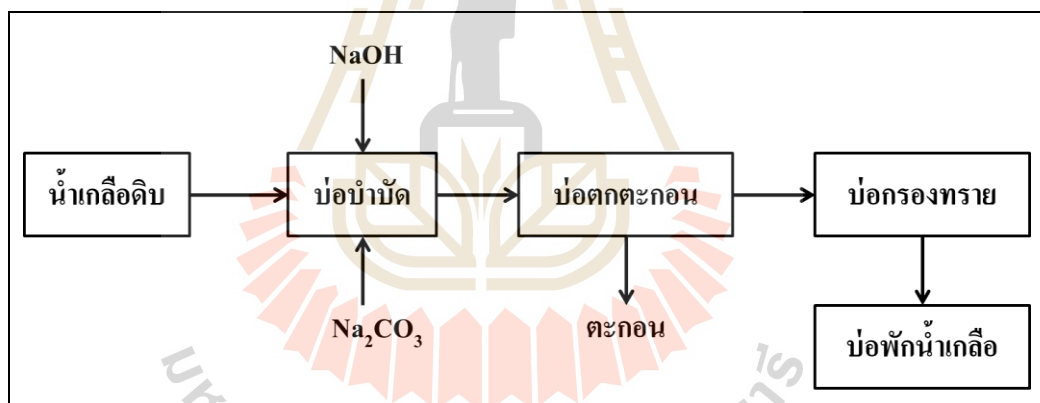
3) น้ำเค็มจากชั้นใต้ดิน เป็นแหล่งน้ำเค็มตามธรรมชาติที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งสามารถที่จะสูบน้ำขึ้นมาใช้ในการผลิตเกลือได้เลย โดยไม่ต้องทำการละลายหรือทำการขุดเจาะชั้นเกลือหิน

4) น้ำทะเล เป็นแหล่งน้ำเค็มที่มีอยู่ตามธรรมชาติและเป็นแหล่งน้ำเกลือขนาดใหญ่ เนื่องจากแหล่งของน้ำทะเลทั่วโลกมีอยู่มาก แต่ถึงแม้ว่าน้ำทะเลจะมีความเค็มเฉลี่ยเพียงร้อยละ 3.5 โดยมวล แต่ก็นับว่าเป็นแหล่งน้ำเค็มที่สำคัญสำหรับผลิตเกลือ

2.2.2 กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ

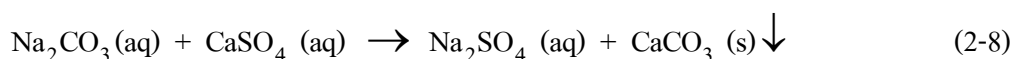
ในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือเพื่อกำจัดหรือแยกสิ่งเจือปนในน้ำเกลือ มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือเพื่อกำจัดกลุ่มไอออนเจือปนคือวิธีการทางเคมี โดยการเติมสารเคมีให้เข้าทำปฏิกิริยากับไอออนเจือปน และเกิดการตกตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะต้องมีกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำเกลือและทำให้ได้น้ำเกลือที่บริสุทธิ์ขึ้น

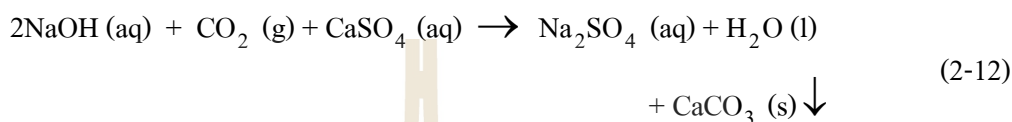
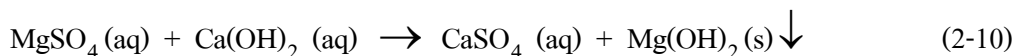
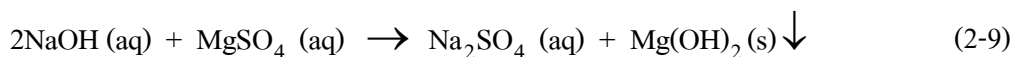
1) การทำบริสุทธิ์น้ำเกลือด้วยวิธีทางเคมี คือการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือด้วยการใช้สารเคมี โดยสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สาร NaOH สาร Na_2CO_3 สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยสารเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารเจือปน อาทิ เช่น ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เมื่อไอออนทั้งสองทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เติมลงไป จะเกิดเป็นของแข็งและตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังผสม โดยขั้นตอนการบำบัดน้ำเกลือด้วยสารละลาย Na_2CO_3 และสารละลาย NaOH แสดงในรูปที่ 2.7 (Austin, 1984)



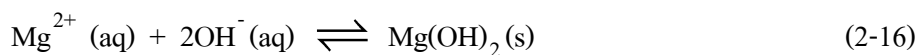
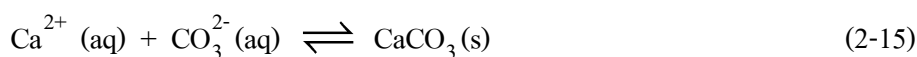
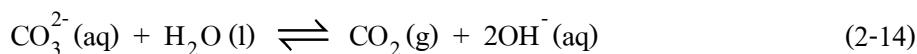
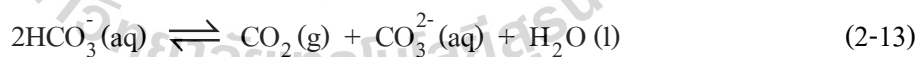
รูปที่ 2.7 การทำบริสุทธิ์น้ำเกลือด้วยสารละลาย Na_2CO_3 และสารละลาย NaOH

สำหรับน้ำเกลือดิบที่มีไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เป็นไอออนเจือปนนั้น ไอออนทั้งสองอาจอยู่ในรูปของสารละลาย CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 และ MgCl_2 ซึ่งในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือดิบด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงในน้ำเกลือ จะสามารถกำจัดไอออนทั้งสองออกมาในรูปของตะกอน CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นดังนี้





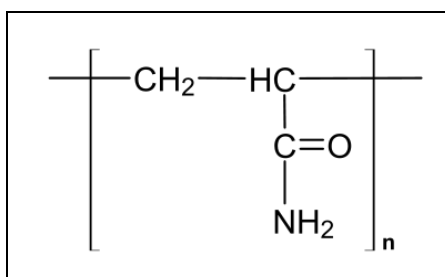
นอกจากนี้ CO_2 นับว่ามีความสำคัญต่อการตกตะกอนของ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ด้วย ซึ่งมีงานวิจัยของ Al-Rawajfeh et al. (2005) ที่ได้อธิบายว่า การเกิดตะกอนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการสูญเสียก๊าซ CO_2 ซึ่ง CO_2 ที่สูญเสียไปเนื่องจากการต้มระเหยน้ำเกลือ จะทำให้ค่า pH ของน้ำเกลือสูงขึ้น เนื่องจากไอออนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มีการเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) มากขึ้น ดังสมการ (2-13) และ (2-16) ซึ่งจะส่งผลให้น้ำเกลือมีสถานะอิ่มตัวมากพอ จนสามารถทำปฏิกิริยากับไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} และเกิดเป็นตะกอน CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ตกตะกอนออกมาได้ แต่ถ้าหากในน้ำเกลือมีการลดค่าความเข้มข้นไอออนแล้ว แนวโน้มของการตกตะกอนและแนวโน้มของการเกิดตะกอนก็จะลดลง ถึงแม้จะมีการสูญเสียก๊าซ CO_2 ในกระบวนการต้มระเหยก็ตาม



2) การแยกตะกอนออกจากน้ำเกลือ เป็นการแยกตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกำจัดไอออนเจือปนด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งโดยส่วนใหญ่ เป็นตะกอนของ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ โดยตะกอนจะมีลักษณะสีขาวและแขวนลอยอยู่ในน้ำเกลือ ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากน้ำเกลือก่อนที่จะส่งน้ำเกลือเข้าไปเก็บไว้ในถังพัก สำหรับขั้นตอนในการกำจัดสารแขวนลอย ได้แก่ การทำให้ใสและการกรอง (ณรงค์ วุฑฒเสถียร, 2540)

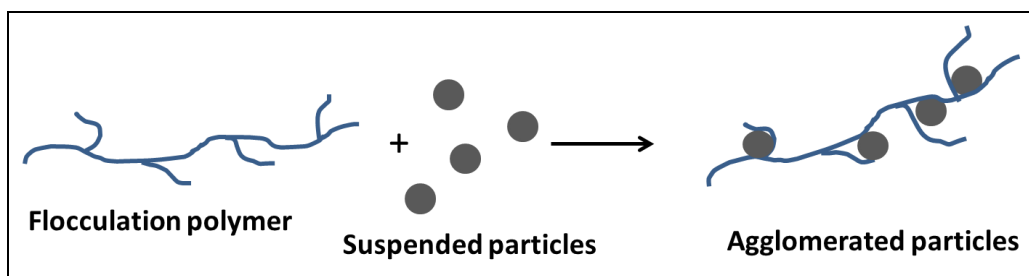
2.1) การทำให้ใส (Clarification) คือกระบวนการที่สารแขวนลอยหรือตะกอนเกิดการรวมตัวและเกิดการตกตะกอน ถ้าหากสารเจือปนที่อยู่ในของเหลวมีขนาดใหญ่จะตกตะกอนได้ง่าย แต่ถ้าหากมีขนาดเล็กมากจะต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอน

(1) การรวมตัว (Flocculation) ฟล็อกเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็ก ๆ หากมีขนาดใหญ่พอที่จะตกตะกอนได้เร็ว แต่ถ้ายังมีขนาดเล็กอยู่ก็จะตกตะกอนได้ช้า ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวก็คือการกวนช้า โดยการกวนช้าจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้ฟล็อกเล็ก ๆ จับตัวรวมกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น แต่หากกวนแรงเกินไปจะทำให้ฟล็อกแตกได้ จึงมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยเร่งให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยสารเคมีที่ใช้คือ สารเคมีจำพวก Polymer หรือ Polyelectrolytes ซึ่งเป็นพวก Flocculants ที่จะช่วยเพิ่มอัตราการรวมตัวเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วย สารเหล่านี้ ได้แก่ Polyacrylamides Polyamine Polyacrylates และ Polyethyleneimine โดยสารเหล่านี้มีโครงสร้างเป็นร่างแหและโมเลกุลมีขนาดใหญ่ สามารถแตกตัวในน้ำได้ เมื่อแบ่ง flocculant ตามการแสดงประจุไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ ประจุลบ (Anionic) ประจุบวก (Cationic) มีทั้งประจุบวกและลบ (Ampholytic) และไม่แสดงประจุไฟฟ้า (Non-ionic) สำหรับรูปที่ 2.8 ได้แสดงถึงโครงสร้างของสาร Polyacrylamides ซึ่งเป็นตัวอย่างของสารรวมตะกอน โดยลักษณะการรวมตัวกันของฟล็อกเมื่อมีการเติมสารรวมตะกอนหรือพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของ Polyacrylamides

(The Editors of Encyclopædia Britannica, www, n.d.)



รูปที่ 2.9 การรวมตัวของฟล็อกเมื่อใส่ Polymer (TutorVista, www, n.d.)

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการจับและรวมตัวเป็นฟล็อก ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เกลือแร่ต่าง ๆ สมบัติความขุ่น ชนิดของสารช่วยเร่งตกตะกอน อุณหภูมิ การกวน และอัตราการเกิดฟล็อก

(1.1) ความเป็นกรด-ด่าง สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนโดยใช้สารรวมตะกอนแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น สารส้มจะมีค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ในช่วง 6 - 7.8 หากในสารละลายมีค่า pH อยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลให้การตกตะกอนเกิดได้ช้า

(1.2) เกลือแร่ต่าง ๆ หากในของเหลวมีอนุภาคของซัลเฟตหรือฟอสเฟต จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการจับตัวเป็นฟล็อกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลของไอออนชนิดต่าง ๆ ต่อการจับตัวเป็นฟล็อก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- เปลี่ยนแปลงช่วง pH ที่เหมาะสมในการเกิดฟล็อก
- เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเกิดฟล็อก
- ปริมาณของสารเคมีช่วยตกตะกอนสำหรับการเกิดฟล็อกจะเปลี่ยนแปลงไป
- ปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนที่เหลือในน้ำเปลี่ยนแปลงไป

(1.3) คุณสมบัติของความขุ่น ถ้าหากของเหลวมีความขุ่นมาก การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคต่าง ๆ จะมาชนกันและจับตัวกันมากขึ้น

(1.4) ชนิดของสารช่วยเร่งตกตะกอน สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนต้องเป็นสารเคมีที่ไม่เป็นพิษหรือไม่อันตรายต่อการบริโภค ซึ่งชนิดของสารและปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับสภาพของของเหลวนั้น ๆ

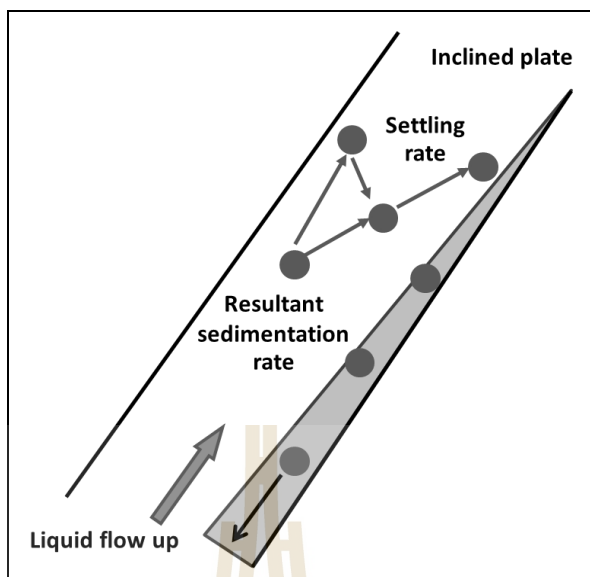
(1.5) อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิของของเหลวลดลงจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการตกตะกอนของฟล็อกช้าลงด้วย นอกจากนี้ การลดลงของอุณหภูมิ ยังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ของสารเคมีต่าง ๆ ในของเหลวลดลงด้วย

(1.6) การกวน สำหรับการกวนเร็วมักนิยมใช้เมื่อมีการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวและเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคเพื่อให้เกิดเป็นฟล็อกมากขึ้น ส่วนการกวนช้าจะใช้สำหรับการรวมตัวของฟล็อกขนาดเล็กให้จับกัน ได้มากขึ้น หากใช้การกวนเร็วหลังจากที่เกิดฟล็อกแล้วนั้นจะทำให้ฟล็อกเกิดการแตกตัวได้

(1.7) อัตราการเกิดฟล็อก ถ้าหากของเหลวมีความขุ่นน้อยหรือมีสารแขวนลอยน้อยจะทำให้อัตราการเกิดฟล็อกน้อยและตกตะกอนช้า เนื่องจากโอกาสในการชนกันของอนุภาคมีน้อย ดังนั้นในการแก้ปัญหานี้ จึงมักมีการนำเอาตะกอนที่ตกแล้วส่วนหนึ่งหมุนเวียนเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มโอกาสที่อนุภาคและฟล็อกจะชนกัน ได้มากขึ้น

(2) การตกตะกอน (Sedimentation) จุดประสงค์ในการตกตะกอน ก็เพื่อจะลดปริมาณความขุ่นในของเหลวก่อนเข้าเครื่องกรอง เพื่อลดภาระของเครื่องกรองไม่ให้มีมากเกินไป ซึ่งการตกตะกอนเกิดจากแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ โดยความเร็วในการจมตัว (Settling velocity) จะคงที่และขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ความหนาแน่นของอนุภาค และความหนืดของของเหลว ซึ่งลักษณะการไหลของของเหลวในถังตกตะกอนจะเป็นแบบไหลขึ้น เพื่อให้ของเหลวไหลออกจากทางด้านล่าง ส่วนตะกอนจะตกสวนทางกับทิศทางการไหล ถ้าหากตะกอนใดมีความเร็วจมตัวมากกว่าอัตราการไหลขึ้น จะทำให้ตะกอนตกลงได้หมด นอกจากนี้ ยังมีถังตกตะกอนแบบนำตะกอนหมุนเวียนกลับ ซึ่งมีการรวมเอาถังผสมเร็ว ถึงกวนช้า และถังตกตะกอนเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งนอกจากจะช่วยให้การจับตัวและการรวมตัวของฟล็อกเกิดในบริเวณที่มีตะกอนเก่าอยู่มากแล้ว ยังทำให้ตะกอนใหม่ตกได้เร็วขึ้น

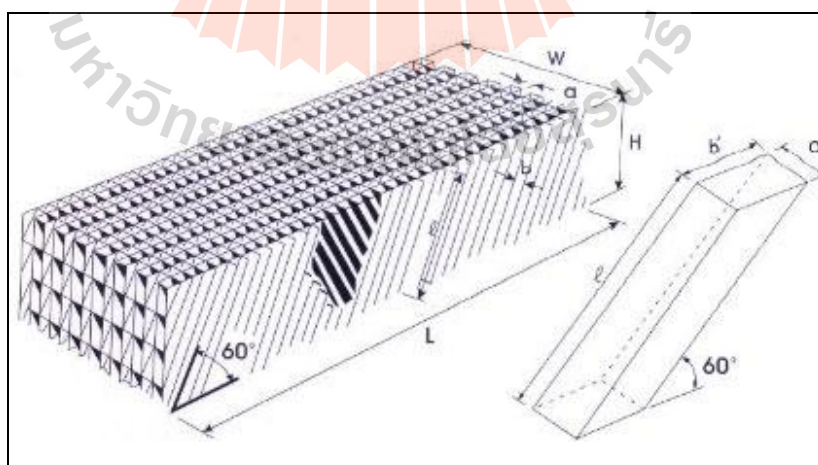
ในการออกแบบการตกตะกอนนั้น นิยมตกตะกอนในท่อเอียงหรือแผ่นเอียง เนื่องจากมีการค้นพบว่าอนุภาคจะตกตะกอนในท่อเอียงหรือแผ่นเอียงได้ดีกว่าการตกตะกอนในแนวตั้ง เพราะตะกอนที่ตกในแนวตั้งจะมีแรงต้านของของเหลวมาก ทำให้ตกตะกอนได้ช้าลง ส่วนในท่อเอียงตะกอนตกลงมาด้วยระยะทางสั้น ๆ ก็จะกระทบกับผนังของท่อเอียงแล้ว ซึ่งแรงต้านทานของน้ำจะเกิดน้อยกว่ามาก เพราะน้ำจะแทรกตัวออกทางด้านข้างของอนุภาค ไม่ปะทะกันโดยตรงในแนวเดียวกัน จากพฤติกรรมของการตกตะกอนของอนุภาคในท่อเอียง แสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อตะกอนตกมารวมกันที่ผนังท่อมากขึ้นก็จะค่อย ๆ ไหลตกลงสู่ด้านล่างได้โดยง่าย



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการตกตะกอนของอนุภาคในท่อเอียง

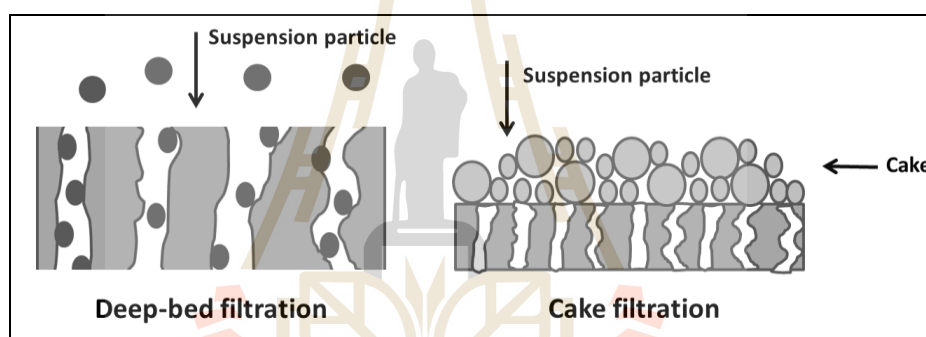
(Wikipedia, www, n.d.)

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนขึ้นอยู่กับระยะความลึกและอัตราการไหลสั้น ซึ่งในท่อเอียงนั้นจะมีสภาพการไหลแบบราบเรียบ ไม่มีกระแสที่ปั่นป่วนมารบกวน จึงส่งผลให้อนุภาคตกตะกอนได้เร็ว ซึ่งลักษณะของแผงท่อเอียงแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของแผงท่อเอียง (Same Company Limited, www, n.d.)

2.2) การกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี สำหรับการแยกสารแขวนลอยที่มีสภาพเป็น Suspended solid หรือเป็นตะกอนที่เกิดจากผลของกระบวนการจับตัวและรวมตัวของตะกอน ซึ่งกลไกของการกรองมีอยู่ 2 แบบ คือ การกรองแบบ Deep-bed filtration และการกรองแบบ Cake filtration ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งการกรองแบบ Cake filtration ของเหลวจะต้องมีแรงดันมากพอที่จะไหลผ่านชั้นสารกรองได้ สำหรับการกรองแบบ Deep-bed เกิดขึ้นเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นสารกรอง (Filter bed) ที่มีลักษณะพรุนเป็นช่องว่างสำหรับดักจับอนุภาคต่าง ๆ เมื่ออนุภาคถูกดักจับจนเต็มช่องว่างแล้ว ก็จะเกิดเป็นชั้นตะกอน (Cake) อยู่บนผิวหน้าของชั้นสารกรอง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นกรองไปด้วย เมื่อมีชั้นตะกอนหนาขึ้นจะทำให้เกิดการไหลผ่านได้ยากขึ้น จึงต้องมีการเปลี่ยนชั้นสารกรองหรือทำการล้างกลับเพื่อทำความสะอาดชั้นสารกรอง



รูปที่ 2.12 กลไกการกรองแบบ Deep-bed และแบบ Cake
(ณรงค์ วุฑฒเสถียร, 2540)

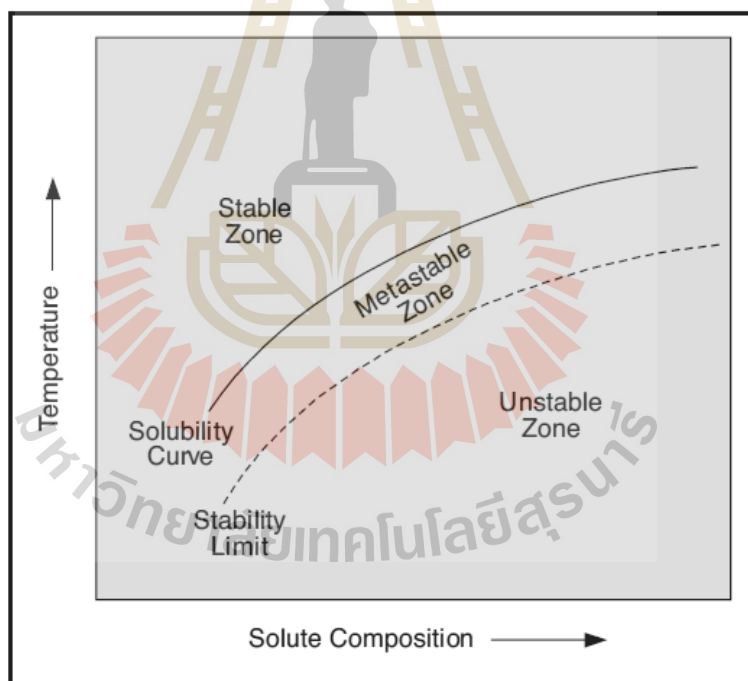
2.2.3 การต้มระเหยและการตกผลึก

กระบวนการต้มระเหยและตกผลึกเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตเกลือ เพราะการเลือกใช้เทคนิคที่แตกต่างกันจะทำให้ได้เกลือที่มีความบริสุทธิ์และปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งเทคนิคการต้มระเหยและการตกผลึกที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรน้ำเกลือที่คุ้มค่า

1) ทฤษฎีการตกผลึก

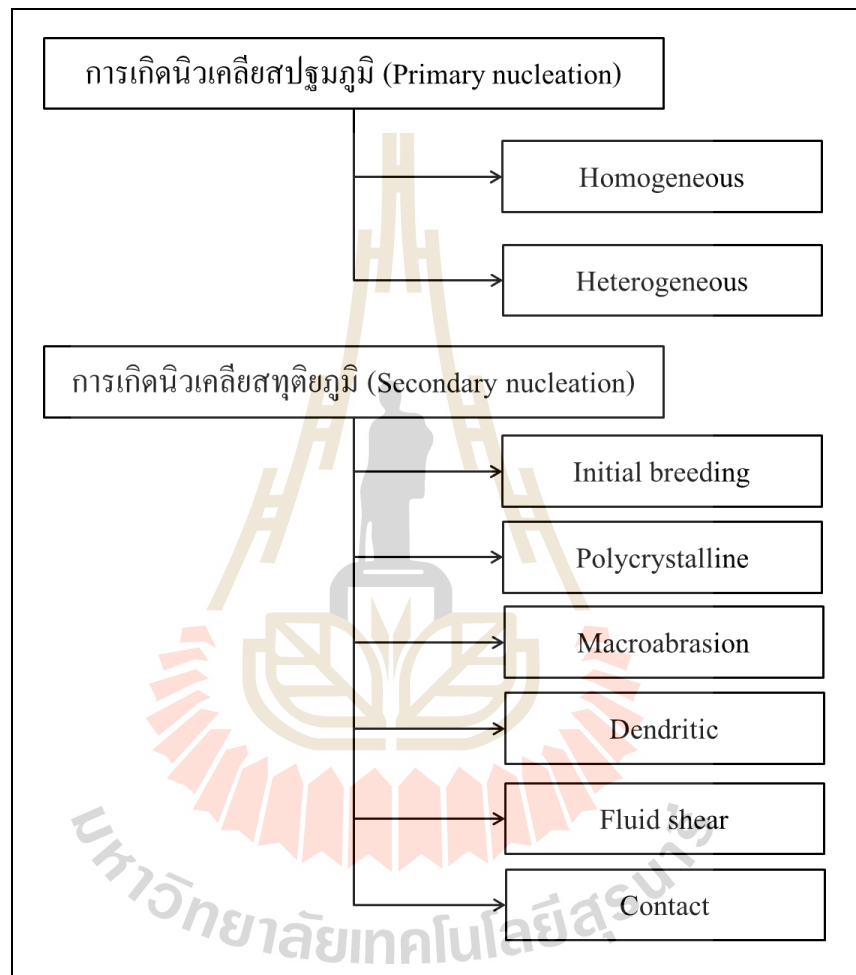
การตกผลึกเป็นหนึ่งเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกสารออกจากสารผสม โดยการทำให้สารนั้น ๆ ตกผลึกออกมาเป็นของแข็ง เทคนิคนี้มักใช้ในการแยกสารที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง สำหรับเครื่องตกผลึกนั้นมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน เช่น การตกผลึกเพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่และมีขนาดสม่ำเสมอ การตกผลึกที่ไม่ต้องการให้ผลึกจับกันเป็นก้อน และการตกผลึกเพื่อลด

ปริมาณของเหลวที่เจือปนในผลึก เบื้องต้นต้องมีการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมทางเทอร์โมไดนามิกส์ของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย หลักการของสมดุลและความเสถียรของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบของแข็งและของเหลว ดังรูปที่ 2.13 เมื่อพิจารณารูปที่ 2.13 เส้นทึบคือ Solubility curve แสดงสมดุลระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว ซึ่งหากอยู่ใน Stable zone ของเหลวจะอยู่ในสถานะของเหลวที่ไม่อิ่มตัวจึงไม่มีการตกผลึก แต่ถ้าหากอยู่ต่ำกว่า Solubility curve จะมีผลึกเกิดขึ้น โดยใน Metastable zone จะต้องมีผลึกล่อถึงจะเกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ได้ แต่ถ้าสารละลายอยู่ใน Unstable zone จะเป็นสารละลายอิ่มตัวพร้อมที่จะเกิดเป็นผลึกได้เองโดยไม่ต้องมีการล่อผลึก ดังนั้น เครื่องตกผลึกจะต้องดำเนินการภายใต้สถานะที่ต่ำกว่าเส้น Solubility curve เพราะต้องการผลิตสารที่เป็นของแข็ง ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง มี 2 กลไก คือ การเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) และการโตของผลึก (Crystals growth) (Samant and O'Young, 2006)



รูปที่ 2.13 พฤติกรรมของเฟสของแข็งและของเหลวที่อธิบายด้วยสมดุลและความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Samant and O'Young, 2006)

1.1) การเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) เป็นการเกิดขึ้นของผลึกใหม่ โดยผ่านกลไกต่าง ๆ ซึ่งกลไกของการเกิดนิวเคลียสผลึก แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ประกอบด้วย การเกิดนิวเคลียสผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) และการเกิดนิวเคลียสผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.14 (Tung et al., 2009)



รูปที่ 2.14 แผนภาพกลไกของการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation)
(Tung et al., 2009)

(1) การเกิดนิวเคลียสผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสผลึก โดยที่ไม่ต้องมีผลึกของตัวถูกละลายอยู่ก่อนหน้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อย ได้แก่ (ศักรินทร์ ปริสวงศ์, 2549)

- การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) จะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของ โมเลกุลในบริเวณนั้น ๆ ในวัฏภาคเอกพันธ์ โดยอะตอมหรือโมเลกุลจะจับตัวกันและก่อตัวเป็นกลุ่ม เกิดเป็นผลึกขนาดเล็ก ๆ แขนงลอยในสารละลายและหากมีโมเลกุลมาเกาะเพิ่มก็จะทำให้ขนาดใหญ่ขึ้น

- การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous nucleation) เป็นการเกิดอนุภาคของแข็งหรือผลึกขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัตถุ เช่น การเกิดผลึกขนาดเล็กเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคอื่นที่แขวนลอยในสารละลายหรือพื้นผิวของภาชนะ

(2) การเกิดนิวเคลียสผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation) เป็นการเกิดขึ้นของผลึกใหม่จากผลึกเดิมที่มีอยู่แล้วในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด ซึ่งผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการแตกหักของผลึกเดิม

1.2) การเติบโตของผลึก (Crystals growth) เป็นขั้นตอนของการขยายขนาดของผลึก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากกระบวนการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) ในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด ซึ่งกระบวนการเติบโตของผลึกเป็นขั้นตอนที่ควบคุมรูปร่างและขนาดของผลึกด้วย ซึ่งการเพิ่มขนาดของผลึกถูกควบคุมด้วย 2 กลไก คือการแพร่ของตัวถูกละลายและปฏิกิริยาที่ผิวหน้าผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามทฤษฎีของการแพร่ คือ สารต่าง ๆ จะมีการถ่ายโอนโมเลกุลจากที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังนั้น ตัวถูกละลายในของเหลวซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะมีการถ่ายโอนมวลไปยังผิวหน้าของผลึกที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำกว่า โดยตัวถูกละลายจะเกาะบนผิวหน้าของผลึกและเชื่อมต่อเข้ากับผลึกด้วยปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึก (Mullin, 1992 อ้างถึงโดย ศักรินทร์ ปริตวงค์, 2549)

2) กระบวนการตกผลึกและอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้มระเหย

ในกระบวนการตกผลึกสาร สถานะของตัวถูกละลายที่ต้องการตกผลึกจะต้องอยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) ซึ่งการทำให้สารอยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด เพื่อชักนำให้เกิดการตกผลึกสามารถทำได้หลากหลายวิธี ได้แก่

- การตกผลึกโดยการลดอุณหภูมิ (Cooling crystallization)
- การตกผลึกโดยการระเหย (Evaporative crystallization)
- การตกผลึกโดยการเติมสารต้านการละลาย (Antisolvent crystallization)
- การทำปฏิกิริยา (Reactive crystallization)

สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการตกผลึกคือการระเหย (Evaporative crystallization) ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะเข้าสู่สถานะอิ่มตัวยิ่งยวด เมื่อมีการระเหยของตัวทำละลายจนทำให้เกิดการตกผลึก (Tung et al., 2009) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยตัวทำละลายเรียกว่าหม้อต้มระเหย

หรือ Evaporator โดยทั่วไป Evaporator ที่นิยมใช้มีอยู่ 5 ชนิด ดังนี้ (Perry et al., 1984 quoted in Henley et al., 2011)

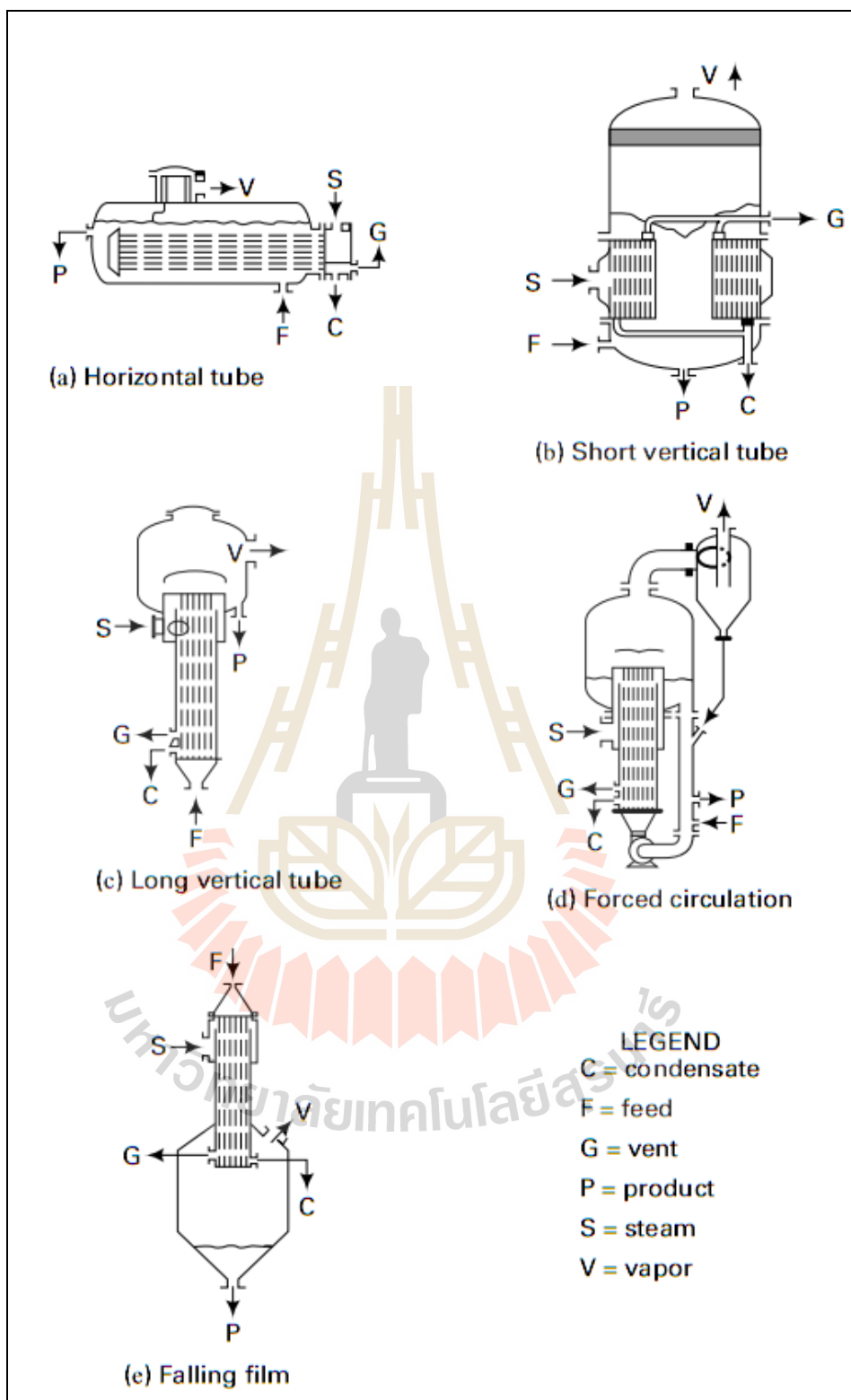
2.1) Horizontal-tube evaporator เป็นเครื่องระเหยที่ประกอบด้วยถัง (Vessel) ขนาดใหญ่ โดยภายในตัวถังจะมีกลุ่มท่อขนาดเล็ก (Tube bundle) ติดตั้งอยู่ในลักษณะแนวนอน ซึ่งสารที่ต้องการระเหยจะไหลอยู่ในรอบ ๆ กลุ่มท่อ ในขณะที่สารให้ความร้อน เช่น ไอน้ำ จะไหลอยู่ในกลุ่มท่อ สำหรับหม้อต้มชนิดนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความหนืดต่ำและไม่ตกตะกอนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2) Short-vertical-tube evaporator เป็นเครื่องระเหยที่มีลักษณะตรงข้ามกับ Horizontal-tube evaporator เนื่องจากกลุ่มท่อจะวางตัวในแนวตั้ง และสารที่ต้องการเพิ่มความเข้มข้นจะไหลอยู่ในกลุ่มท่อ ส่วนไอน้ำจะไหลอยู่ภายนอกกลุ่มท่อ สำหรับการเดือดภายในท่อจะทำให้สารละลายมีการไหลวนซึ่งถือว่าเป็นการกวนเพิ่มทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเครื่องระเหยชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับสารที่มีความหนืดสูงมาก

2.3) Long-vertical-tube evaporator เป็นเครื่องระเหยที่มีกลุ่มท่อยาววางตัวในแนวตั้งและมีช่องสำหรับแยก Vapor-Liquid โดยหลักการการทำงานคือจะมีการป้อนสารละลายเข้าทางด้านล่างของเครื่องระเหยและไอน้ำไหลอยู่ภายนอกกลุ่มท่อ โดยถูกป้อนเข้าทางด้านบน สำหรับเครื่องระเหยชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง เนื่องจากความเร็วในการไหลของของเหลวมีค่าสูง

2.4) Forced-circulation evaporator เป็นเครื่องระเหยที่เหมาะสมสำหรับสารละลายความเข้มข้นสูง โดยในการทำงานจะมีการใช้ปั๊มในการบังคับให้สารละลายไหลวนเข้าไปในกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นไปด้านบน โดยสารแลกเปลี่ยนความร้อนจะไหลอยู่ภายนอกกลุ่มท่อ

2.5) Falling-film evaporator เครื่องระเหยชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารที่ไวต่อความร้อน เช่น น้ำผลไม้ โดยหลักการการทำงานของเครื่องระเหยชนิดนี้คือสารละลายจะป้อนเข้าทางด้านบนสุดของเครื่องและไหลเข้าในท่อ โดยการไหลของสารละลายในท่อจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวท่อ เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำที่อยู่ภายนอกท่อ ซึ่งสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปและไอน้ำจะไหลออกทางด้านล่างของเครื่อง



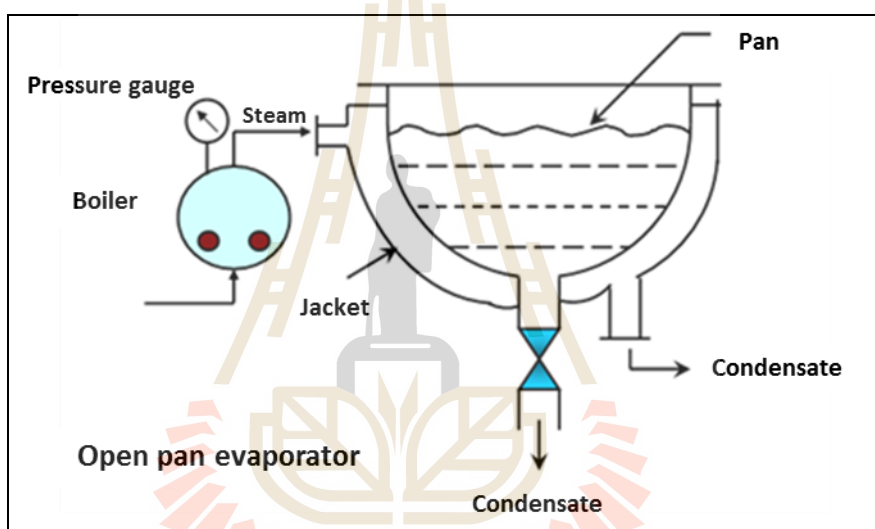
รูปที่ 2.15 ชนิดของหม้อต้มระเหย (Evaporator)

(Perry et al., 1984 quoted in Henley et al., 2011)

3) เทคนิคการต้มระเหยและตกผลึกเกลือ

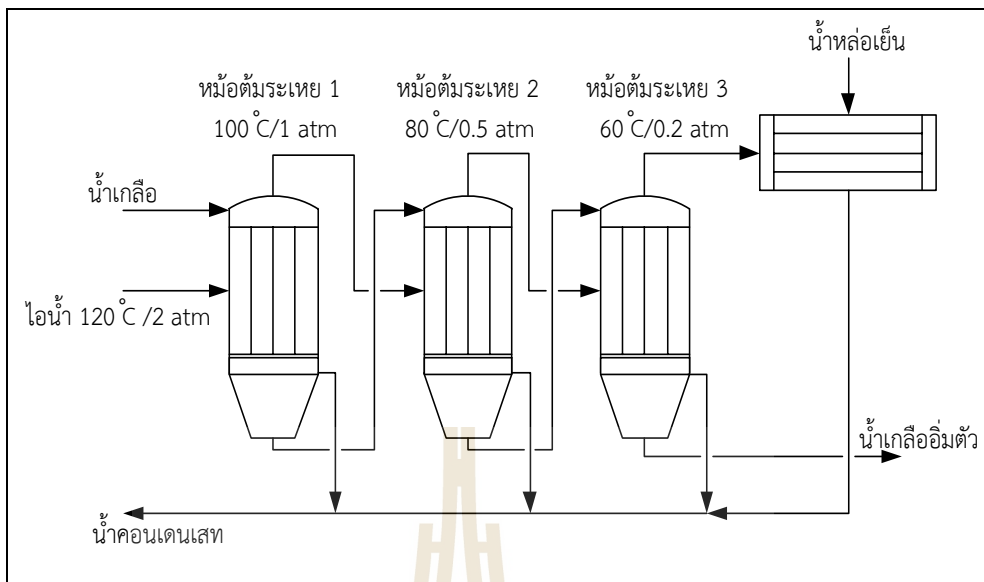
สำหรับเทคนิคต่าง ๆ ที่นิยมนำมาใช้กระบวนการต้มระเหยและการตกผลึกของเกลือ มีดังนี้ การต้มระเหยภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (Open pan evaporation) การต้มระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum pan evaporation) การต้มระเหยด้วย Thermal vapor recompression (TVR) และการต้มระเหยด้วย Mechanical vapor recompression (MVR) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1) การต้มระเหยภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (Open pan evaporation) ในการต้มระเหยภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (Open pan evaporation) เป็นวิธีการที่ต้มระเหยน้ำในภาชนะเปิด โดยลักษณะของ Open pan evaporation แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 หม้อต้มระเหยภายใต้สภาวะบรรยากาศ (Open pan evaporation)
(Engineers guide, www, n.d.)

3.2) การต้มระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum pan evaporation) สำหรับการต้มระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศจะช่วยให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และข้อดีของการต้มระเหยด้วยชุดหม้อต้มระเหยคือ ไอน้ำที่ได้จากหม้อต้มตัวแรกจะกลายเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่จะให้แก่หม้อต้มตัวถัดไป ซึ่งลักษณะการทำงานของหม้อต้มระเหยภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศและภายใต้สภาวะสุญญากาศแสดงในรูปที่ 2.17



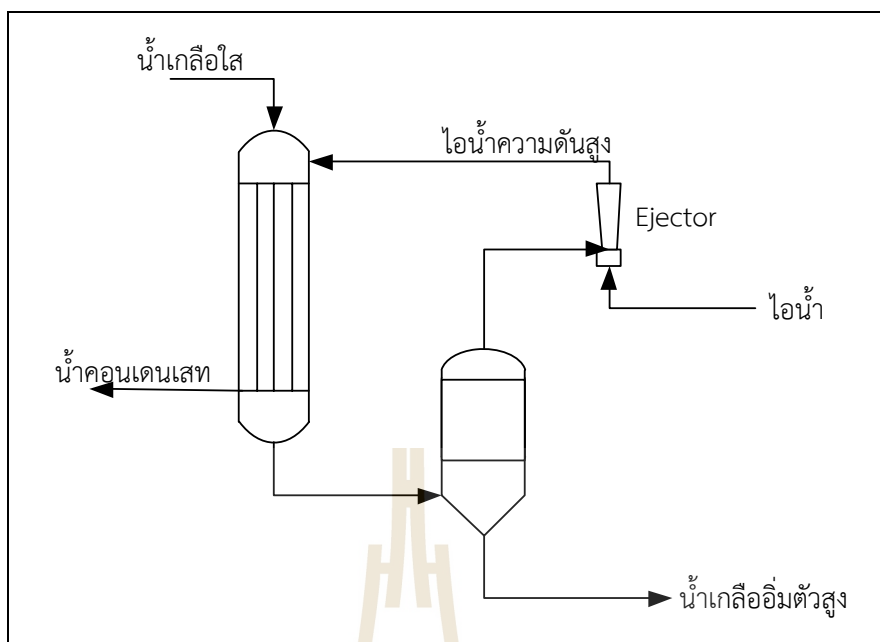
รูปที่ 2.17 ชุดหม้อต้มระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum pan evaporation)

(The Salt Industry Center of Japan, www, n.d.)

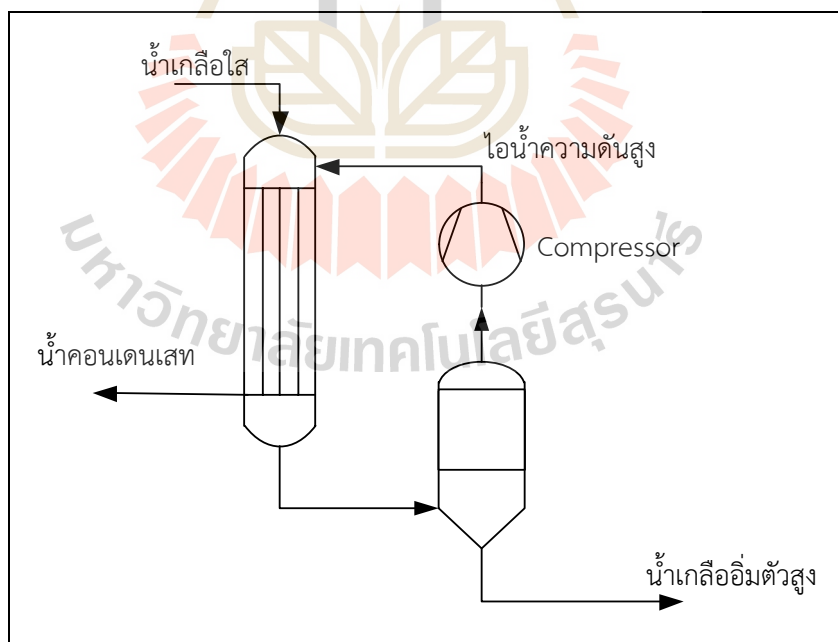
3.3) การต้มระเหยด้วย Thermal vapor recompression (TVR) เป็นการต้มระเหยโดยใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำความดันสูงที่ได้จากการบีบอัดไอน้ำจากกระบวนการต้มระเหยและไอน้ำจากหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งไอน้ำจะถูกบีบอัดด้วย Steam driven ejector ก่อนที่จะถูกนำไปใช้สำหรับให้ความร้อนแก่หม้อต้มระเหย สำหรับการดำเนินงานของการต้มระเหยด้วย Thermal vapor recompression แสดงในรูปที่ 2.18 (Buss-SMS-Canzler, www, n.d.)

3.4) การต้มระเหยด้วย Mechanical vapor recompression (MVR) เป็นการต้มระเหยโดยใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำความดันสูงที่ได้จากการบีบอัดไอน้ำที่ได้จากกระบวนการต้มระเหยเช่นเดียวกับ Thermal vapor recompression (TVR) แต่ไอน้ำจะถูกบีบอัดด้วย Compressor ก่อนที่จะถูกนำไปใช้สำหรับให้ความร้อนแก่หม้อต้มระเหยอีกครั้ง สำหรับการดำเนินงานของการต้มระเหยด้วย Mechanical vapor recompression แสดงในรูปที่ 2.19

(Buss-SMS-Canzler, www, n.d.)



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของการต้มระเหยด้วย Thermal vapor recompression
(Buss-SMS-Canzler, www, n.d.)



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของการต้มระเหยด้วย Mechanical vapor recompression
(Buss-SMS-Canzler, www, n.d.)

2.2.4 การปั่นเหวี่ยงและการอบแห้ง

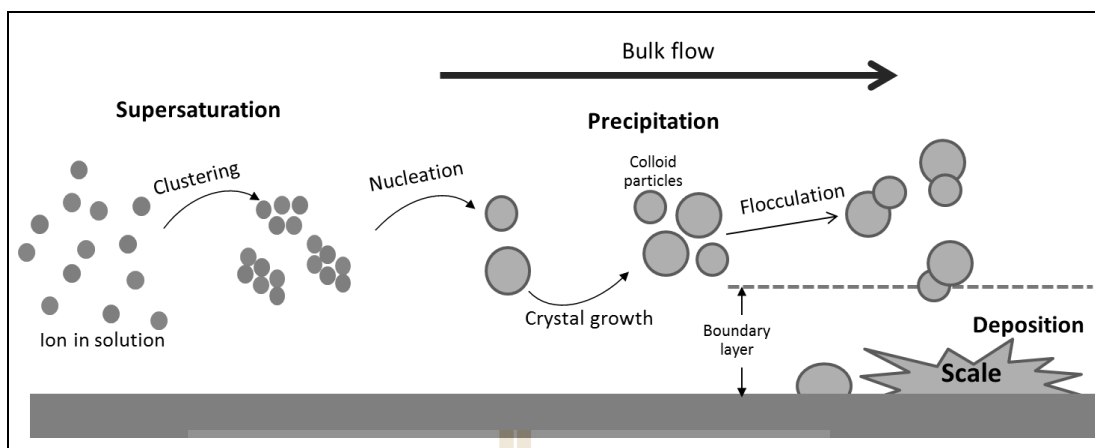
เมื่อผ่านกระบวนการต้มระเหยและการตกผลึกแล้วจะได้ออกมาเป็นของผสมระหว่างผลึกของเกลือและน้ำเกลือ ซึ่งของผสมนี้จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อทำการแยกน้ำเกลือออกจากผลึกเกลือก่อน สำหรับเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเหลวจะเรียกว่า Filtering centrifuge ซึ่งจำแนกได้ 5 ชนิด ได้แก่ Basket Cone screen Pusher Baffle และ Inverting bag centrifuge (Tarleton and Wakeman, 2007) จากนั้นผลึกเกลือจะถูกส่งไปยังเครื่องอบแห้ง (Dryer) เพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดเกลือ โดยเครื่องอบแห้งมีหลายประเภท ยกตัวอย่างเช่น Tray dryer Screw-conveyor dryer Fluidized-bed dryer และ Drum dryer (Henley et al., 2011)

2.3 การเกิดตะกอนในหม้อเคี้ยวสุญญากาศ

ตะกอนที่พบแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพวกจุลชีพที่เป็นสิ่งมีชีวิต สำหรับตะกอนที่เกิดจากสารอินทรีย์เป็นผลมาจากการกักตัวของพื้นผิวโลหะต่าง ๆ หรือจากการทำปฏิกิริยาของสารต่าง ๆ แล้วตกตะกอนออกมา หรือเกิดตะกอนแยกตัวออกมาจากของเหลวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น การละลายได้ของตัวถูกละลายมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลง มีการระเหยของน้ำจนทำให้ความเข้มข้นของสารก่อตะกอนสูงขึ้นและก่อตัวเป็นตะกอน หรือเกิดจากการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

2.3.1 หลักการเกิดตะกอน

ในหม้อเคี้ยวจะมีน้ำเกลือไหลเวียนตลอดเวลา เมื่อน้ำเกลือไหลผ่านผนังท่อ จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังท่อน้ำเกลือเกิดขึ้น เมื่อน้ำเกลือได้รับความร้อนจะทำให้มีการระเหยของน้ำเกิดขึ้น ส่งผลให้สารละลายต่าง ๆ ในบริเวณนั้นมีความเข้มข้นที่สูงขึ้นกว่าปกติ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าความสามารถละลายก็จะเกิดการตกผลึกสะสมและการตกตะกอนบนผนังท่อ ซึ่งหากมีการป้อนน้ำเกลือใหม่ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าความสามารถในการละลายไหลผ่านบริเวณดังกล่าว ก็จะช่วยละลายตะกอนเหล่านั้นออกมาได้ ซึ่งสามารถป้องกันการก่อตัวเป็นตะกอนได้ แต่หากมีการสะสมของตะกอนที่มากขึ้น ตะกอนเหล่านั้นจะก่อตัวเป็นตะกอนเข้าไปเกาะจับที่ผิวผนังท่อในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.20

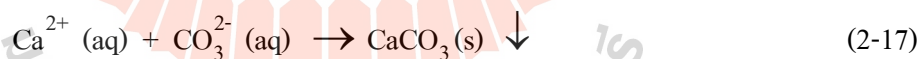


รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดตะกรันเกาะจับที่ผนังท่อ

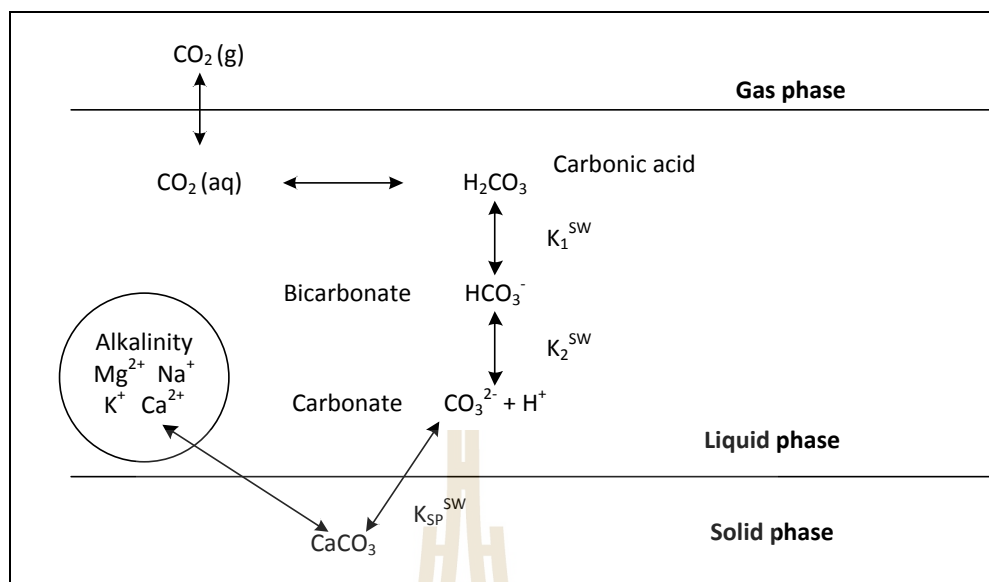
(Civil and Environmental Engineering, Carnegie Mellon University, www, n.d.)

2.3.2 การเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

CaCO_3 เป็นตะกรันที่เป็นผลึกเม็ดใหญ่ แต่ถ้าหากมีสิ่งเจือปนอยู่ในผลึก จะทำให้ผลึกมีรูปร่างเป็นเม็ดขนาดเล็ก ซึ่ง CaCO_3 จะละลายในน้ำได้เพียงเล็กน้อย และขึ้นอยู่กับค่าความดันย่อยของก๊าซ CO_2 อุณหภูมิ และปริมาณของสารบางชนิดในน้ำ อาทิเช่น เกลือ NaCl สำหรับการก่อตะกอนและตะกรันของ CaCO_3 เกิดจากการจับตัวกันตามสมการ (2-17)



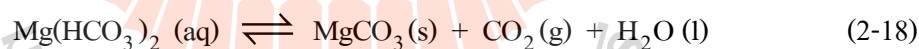
การเกิดขึ้นของ CaCO_3 เกิดขึ้นจากการสลายตัวของไอออน HCO_3^- เป็นก๊าซ CO_2 และไอออน CO_3^{2-} หากน้ำเกลือมี Ca^{2+} ละลายอยู่มาก ก็จะทำให้ไอออน CO_3^{2-} เข้าจับกับไอออน Ca^{2+} เกิดเป็น CaCO_3 มากขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ Al-Anezi (2007) ที่อธิบายถึงสมดุลคาร์บอเนตทั้งในเฟสของแข็ง ของเหลว และแก๊สดังรูปที่ 2.21



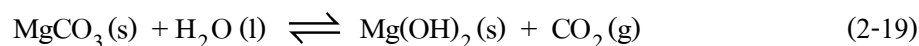
รูปที่ 2.21 แผนภาพสมดุลคาร์บอเนต (Al-Anezi, 2007)

2.3.3 การเกิดตะกอนแมกนีเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ตะกอนและตะกอนแมกนีเซียมที่พบเห็นปกติจะเป็น MgCO_3 ซึ่งการละลายจะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่นเดียวกับ CaCO_3 โดยที่ MgCO_3 เกิดจากการสลายตัวของ $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ดังสมการที่ (2-18)



แต่ถ้าหากอุณหภูมิของสารละลายสูงกว่า 82°C หรือใกล้จุดเดือดของน้ำ จะทำให้ MgCO_3 ที่เกิดขึ้น สลายตัวเป็น $\text{Mg}(\text{OH})_2$ หรือ Brucite ดังสมการ (2-19) และความสามารถในการละลายของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น



2.3.4 สารประกอบที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกอน

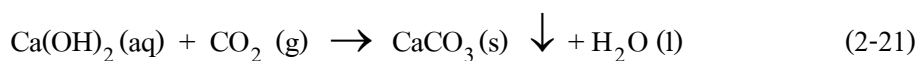
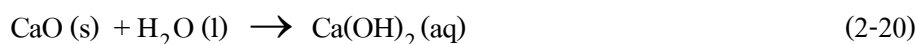
จากที่ได้ทราบถึงสาเหตุของการเกิดตะกอนมาแล้ว ในหัวข้อนี้จะอธิบายบทบาทของสารประกอบเหล่านั้นในภาคอุตสาหกรรม โดยสารประกอบที่เป็นต้นเหตุของการเกิดตะกอนที่

ยกตัวอย่างมาอธิบายได้แก่ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งหากปล่อยให้สารทั้งสองชนิดนี้ละลายอยู่ในน้ำเกลือจะทำให้เกิดตะกอนในกระบวนการผลิตเกลือ แต่ในทางตรงกันข้าม หากมีการแยกเอา CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ หรือสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมออกมาจากน้ำเกลือ นอกจากจะลดการเกิดตะกอนได้แล้วนั้น ยังเป็นการนำเอาสารประกอบที่จำเป็นกลับมาใช้ประโยชน์แทนการปล่อยทิ้งออกมาในรูปของกากอุตสาหกรรม

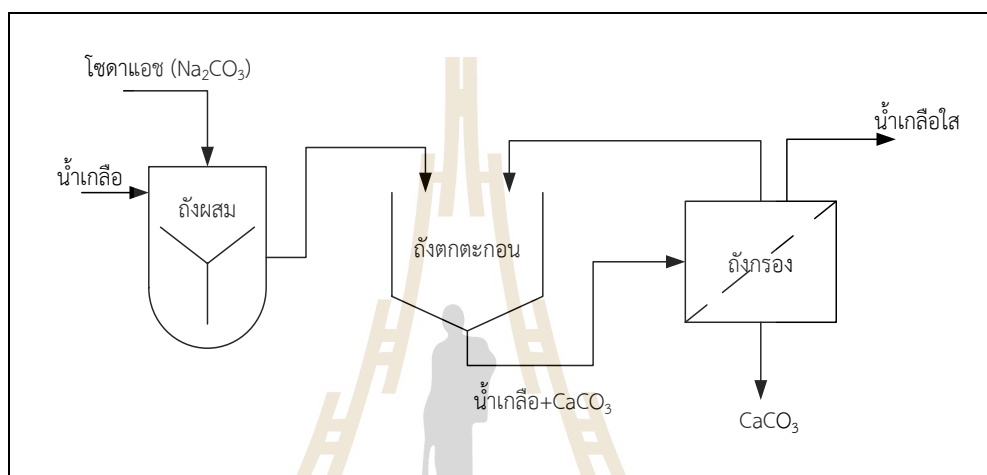
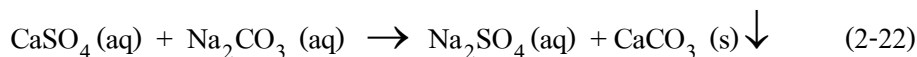
1) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นอีกหนึ่งสารเคมีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมกระดาษ และการผลิตพีวีซี ในปี พ.ศ. 2555 ทวีปเอเชียเป็นทวีปที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทางด้านอุตสาหกรรมของสาร CaCO_3 เนื่องจากประเทศจีนมีการขยายอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษและพลาสติก จึงทำให้มีความต้องการสาร CaCO_3 ที่เพิ่มขึ้น และในปี 2559 ความต้องการในการใช้สาร CaCO_3 จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับทั่วโลก เนื่องจากการเติบโตของอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศจีนและอินเดีย (Pnewswire, www, 2012)

1.1) สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับสาร CaCO_3 มักพบได้ทั่วไปในรูปของแร่หิน เช่น อะราโกไนท์ (Aragonite) แคลไซต์ (Calcite) หินปูน (Limestone) รวมทั้งเป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอย ไข่มุกและเปลือกไข่ ซึ่ง CaCO_3 จะไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถละลายได้ในกรด ซึ่ง CaCO_3 มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบสามเหลี่ยมแบนราบ (Trigonal) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 100.09 โดยที่ค่าความหนาแน่นของแคลไซต์และอะราโกไนท์เท่ากับ 2.71 และ 2.83 g/cm^3 ตามลำดับ ซึ่งจุดหลอมเหลวของแคลไซต์และอะราโกไนท์มีค่าเท่ากับ 825 และ 1,339 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ สำหรับค่าความสามารถในการละลายของ CaCO_3 ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ 1.3 มิลลิกรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร (PubChem, www, n.d.)

1.2) กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับ CaCO_3 สามารถผลิตได้ทั้งโดยตรงจากหินอ่อนหรืออาจผลิตได้จากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยที่ CaO จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเมื่อเติมก๊าซ CO_2 ลงไปก็จะเกิดเป็น CaCO_3 ที่ตกตะกอนออกมา ดังสมการ (2-20) และ (2-21) ที่แสดงปฏิกิริยาเคมีของการผลิต CaCO_3 จาก CaO



นอกจากนี้ CaCO_3 ยังสามารถผลิตได้จากน้ำทะเลและน้ำเกลืออีกด้วย เนื่องจากมีไอออน Ca^{2+} ละลายอยู่ในน้ำทะเลและน้ำเกลือ ซึ่งกระบวนการผลิต CaCO_3 จากน้ำเกลือแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีการเติมสารละลาย Na_2CO_3 ลงในน้ำเกลือ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีตามสมการ (2-22)



รูปที่ 2.22 กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตจากน้ำเกลือและโซเดียมคาร์บอเนต

1.3) ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต สาร CaCO_3 เป็นสารเคมีที่ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ภาคอุตสาหกรรม ทางด้านการแพทย์และการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

(1) การใช้งานในภาคอุตสาหกรรม สาร CaCO_3 เป็นสารตั้งต้นหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นวัสดุก่อสร้างหรือส่วนผสมของปูนซีเมนต์ อีกทั้งมีการใช้ CaCO_3 ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อทำให้น้ำตาลมีความบริสุทธิ์ เป็นต้น

(2) การใช้งานทางด้านการแพทย์ สาร CaCO_3 สามารถนำไปผลิตเป็นอาหารเสริมหรือยาลดกรดในกระเพาะอาหารได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปในกระบวนการผลิตยาสีฟันและใช้เป็นสารกันบูด อย่างไรก็ตาม การรับ CaCO_3 ที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อร่างกายได้

(3) การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม CaCO_3 สามารถใช้แก้ปัญหาน้ำเสียและดินที่มีสภาพเป็นกรดได้ อีกทั้งยังถูกใช้ในกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ที่ปนออกมากับก๊าซที่ปล่อยทิ้งออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

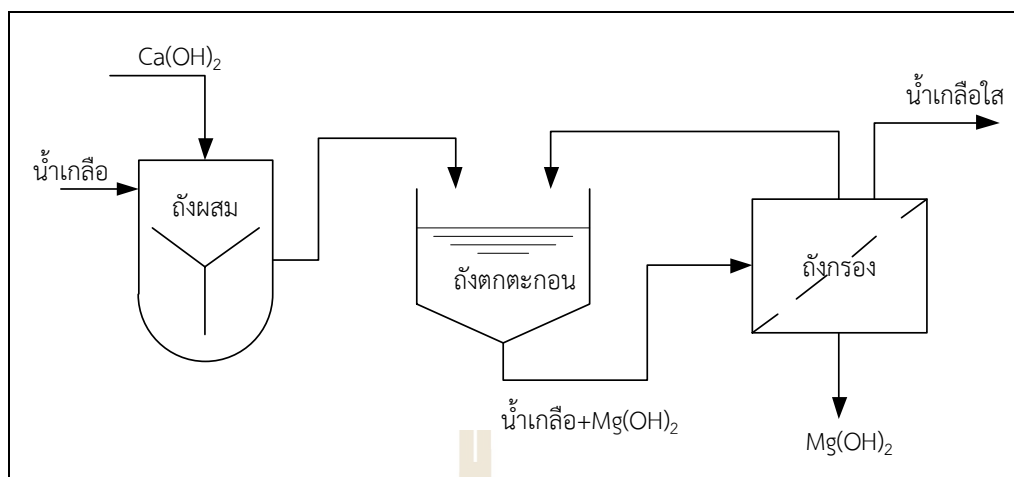
2) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) จากรายงานของการใช้ MgO ของทั่วโลกในปี 2013 พบว่า สารประกอบแมกนีเซียม อาทิเช่น $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ และ $MgSO_4$ ล้วนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแพร่หลาย เช่น วัสดุทนไฟ สารเคมีที่ใช้ในการเกษตร ใช้ในการบำบัดน้ำ และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะแมกนีเซียม ซึ่งโลหะแมกนีเซียม มีลักษณะเบาจึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และมีการคาดการณ์ว่าความต้องการในการใช้ $Mg(OH)_2$ ระหว่างปี พ.ศ. 2555 - 2561 ในตลาดโลกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปี ดังที่ได้มีการรายงานไว้ใน ISH Markit, www (2014)

2.1) สมบัติของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $Mg(OH)_2$ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เมื่อถูกละลายในน้ำมักจะถูกเรียกว่า Milk of magnesia เนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับน้ำนม ถ้าอยู่ในรูปของแร่จะรู้จักกันในชื่อ Brucite โดยทั่วไป $Mg(OH)_2$ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Hexagonal โดยมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 58.32 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.345 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $350 \text{ }^\circ\text{C}$ และค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ เท่ากับ 0.64 มิลลิกรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร (PubChem, www, n.d.)

2.2) กระบวนการผลิตแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ สาร $Mg(OH)_2$ สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (Metathesis reaction) ระหว่างเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) กับสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Hydroxide compound) หรืออาจพบได้ตามธรรมชาติในรูปของแร่ Brucite นอกจากนี้ $Mg(OH)_2$ มักผลิตได้จากน้ำทะเลหรือน้ำเกลือ โดยการทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ตามสมการเคมี (2-23)



สำหรับ $Mg(OH)_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างต้น สามารถแยกออกจากรน้ำเกลือได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การตกตะกอน การกรอง และการแยกโดยใช้แม่เหล็ก ซึ่ง $Mg(OH)_2$ ที่ผลิตจากรน้ำเกลือและสาร $Ca(OH)_2$ จะถูกแยกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง ดังรูปที่ 2.23



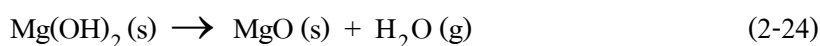
รูปที่ 2.23 กระบวนการผลิตแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำเกลือและแคลเซียมไฮดรอกไซด์

2.3) ประโยชน์ของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ สาร $Mg(OH)_2$ เป็นสารเคมีที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น การผลิตยา ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารดับเพลิง และใช้ทำเป็นปุ๋ย

(1) การผลิตยา ยาที่ผลิตจาก $Mg(OH)_2$ ส่วนใหญ่จะเป็นยาที่ใช้ในการแก้อาการท้องเฟ้อ และลดกรดในกระเพาะอาหาร อีกทั้งยังใช้เป็นสารระงับกลิ่นได้วงแขนได้อีกด้วย

(2) การบำบัดน้ำเสีย ในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ $Mg(OH)_2$ ในการแก้ปัญหาหน้าเสียที่มีสภาพเป็นกรด เนื่องจาก $Mg(OH)_2$ เป็นด่างที่ไม่อันตราย นอกจากนี้ $Mg(OH)_2$ ยังใช้เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างแนวปะการังเทียม

(3) การใช้เป็นสารดับเพลิง เนื่องจาก $Mg(OH)_2$ มีคุณสมบัติในการหน่วงไฟ จึงมักถูกนำมาใช้เป็นสารดับเพลิง เพราะการสลายตัวของ $Mg(OH)_2$ เป็นแบบดูดความร้อน มีปฏิกิริยาดังนี้



ซึ่งความร้อนจากเพลิงไหม้จะถูกถ่ายโอนเข้าไปเพื่อใช้ในปฏิกิริยาข้างต้น จากนั้นไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเจือจางก๊าซต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณนั้น ๆ รวมทั้งยับยั้งก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อีกด้วย

(4) การใช้เป็นปุ๋ย จากสมบัติของ $Mg(OH)_2$ ที่เป็นด่าง จึงมักนำมาใช้ในการปรับปรุงดินที่มีปัญหาดินเป็นกรดและใช้ในการเพิ่มธาตุแมกนีเซียม (Mg) ให้แก่พืชด้วย

2.3.5 ผลเสียที่เกิดจากตะกรัน การเกิดตะกรันเกาะจับที่ผนังท่อในหม้อต้ม จะส่งผลเสียดังนี้

1) ก่อให้เกิดท่อบวมจนเกิดการระเบิดได้ โดยทั่วไปแล้ว ถ้าไม่มีตะกรันเกาะที่ผิวท่อ จะทำให้ท่อสามารถทนแรงดันได้จนถึงอุณหภูมิค่าหนึ่ง แต่เมื่อมีตะกรันเกิดขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของท่อสูงขึ้น เนื่องจากตะกรันมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ เมื่ออุณหภูมิของท่อสูงเกินกว่าที่จะรับได้ ท่อก็จะบวมโป่งและปูดออกจนเกิดการระเบิด

2) ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อต้มลดลง เพราะตะกรันที่เกิดขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำร้อนไปยังน้ำได้น้อยลง

3) สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เนื่องจากตะกรันที่เกิดขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งหากต้องการให้ได้ความร้อนเท่าเดิมก็จำเป็นที่จะต้องเพิ่มการป้อนเชื้อเพลิงที่มากขึ้น

2.4 การป้องกันการเกิดตะกรัน

เนื่องจากสาเหตุในการเกิดตะกรันมาจากการที่ของเหลวมีปริมาณของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่สูง เมื่อมีการตกตะกอนและการตกผลึกของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมจะทำให้เกิดตะกรันขึ้น ซึ่งตัวอย่างวิธีที่ใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรัน ได้แก่

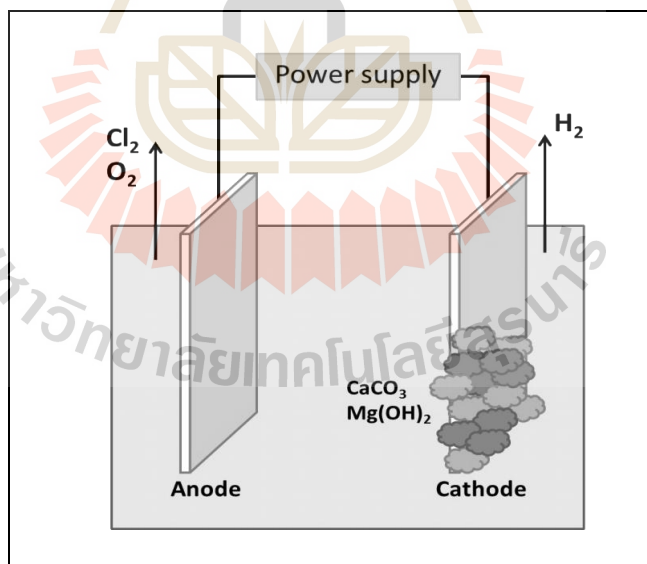
2.4.1) การใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดการตกตะกอน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้คือสาร Na_2CO_3 และสาร $NaOH$ และหลังการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับสารเคมี ไอออนก็จะถูกกำจัดออกมาในรูปของตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นก็จะถูกแยกออกจากของเหลวด้วยเทคนิคการแยกของแข็งออกจากของเหลว อาทิ การตกตะกอนและการกรอง

2.4.2) การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) หรือแลกเปลี่ยนระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์กับสารประกอบเชิงซ้อนอื่น ๆ ซึ่งการใช้เรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ก็เพื่อกำจัดไอออนที่เจือปนในของเหลว โดยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่ในของเหลวกับไอออนของเรซิน ซึ่งเรซินที่มีประจุบวก (Cation) จะแลกเปลี่ยนกับประจุบวก และเรซินที่มีประจุลบ (Anion) จะแลกเปลี่ยนกับประจุลบ ซึ่งเรซินที่ใช้ไปแล้วก็จะถูกนำมาฟื้นฟูใหม่ เพื่อที่จะนำไปใช้งานได้อีกครั้ง

2.4.3) การใช้กระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากของเหลว ซึ่งเมมเบรนสามารถกรองแยกอนุภาคขนาดเล็กได้ และเมมเบรนบางชนิดยอมให้อิออนหรือสารบางตัวเท่านั้นที่ผ่านได้ ซึ่งประเภทของเมมเบรน แบ่งได้ ดังนี้

- Reverse osmosis (RO) เป็นการใช้แรงดันในการแยกสารเจือปนออกจากของเหลว
- Ultrafiltration (UF) เป็นการใช้แรงดันในการแยกสารต่าง ๆ ออกจากของเหลว เช่นเดียวกับ RO แต่แยกได้เฉพาะสารอินทรีย์ขนาดใหญ่
- Electrodialysis (ED) เป็นการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบ เพื่อให้แตกตัวเป็นไอออนได้ แต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ได้

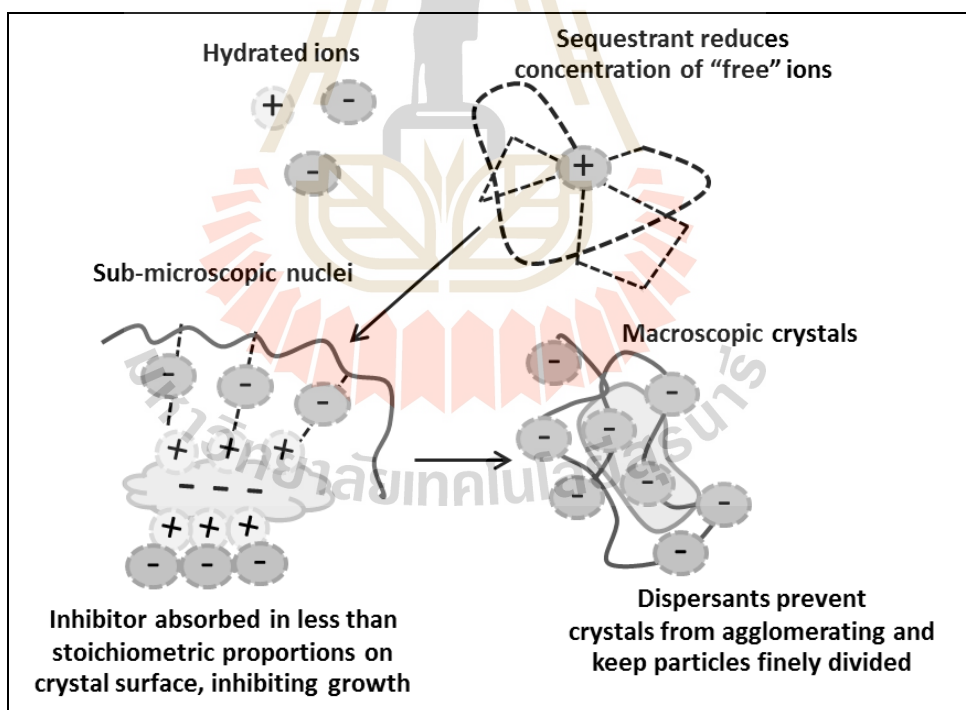
2.4.4) การตกตะกอนโดยการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี เป็นการตกตะกอนที่มีการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการสร้างหมู่ OH^- และหมู่ CO_3^{2-} ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด (Electrode) โดยในการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันนี้ จะเกิดขึ้นที่แคโทดซึ่งเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เมื่อหมู่ OH^- และหมู่ CO_3^{2-} เกิดขึ้นที่แคโทดแล้ว ไอออนที่มีประจุบวก เช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} ก็วิ่งเข้าหาไอออนลบเพื่อทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นตะกอนเกาะอยู่ที่แคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กระบวนการตกตะกอนโดยการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี

โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี เช่น Zeppenfeld (2011) ได้ทำการศึกษาการแยกไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในสารละลายด้วยการใช้เซลล์ไฟฟ้า โดยการสร้างไอออน CO_3^{2-} และ OH^- ขึ้นที่แคโทด เพื่อให้ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เข้าทำปฏิกิริยากับไอออน CO_3^{2-} และ OH^- จนเกิดเป็นตะกอนและเกาะอยู่ที่แคโทด

2.4.5) การเติมสารยับยั้งการตกตะกอน เป็นการเติมสารเคมีเข้าไปเพื่อหน่วงหรือยับยั้งในการก่อตัวเป็นตะกอนหรือตะกอน โดยสารที่เติมเข้าไปจะทำการสร้างฟิล์มบาง ๆ รอบผลึกของตะกอนเพื่อไม่ให้ตะกอนมีขนาดใหญ่อขึ้นและยังคงแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และไม่เข้าไปเกาะที่พื้นผิวของวัสดุ สำหรับชนิดของสารยับยั้งการตกตะกอน แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ สารคีเลต (Chelating agent) Threshold inhibitor และ Crystal distortion inhibitor ซึ่งสารแต่ละตัวที่จะนำไปใช้ต้องพิจารณาถึงค่า pH และไอออนลบที่มีอยู่ในสารละลาย เช่น สารคีเลตจำพวก Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) จะใช้ได้ดีในการป้องกันการเกิดตะกอนที่เกิดจากแคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) สำหรับกลไกของสารยับยั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กลไกของสารยับยั้งในการป้องกันการเกิดตะกอน

(Al-Deffeeri, 2007)

2.4.6) การเติมตัวล่อเพื่อให้เกิดการตกผลึกของตะกอน เป็นการเติมสารชนิดเดียวกับตะกอนเพื่อล่อให้เกิดการตกตะกอน เช่น หากต้องการตกผลึก CaCO_3 ก็จำเป็นที่จะต้องมีการเติมผลึก CaCO_3 ไปในสารละลาย โดยมีงานวิจัยของ Yi-Pin and Philip (2005) ที่ศึกษาผลของการเติมตัวล่อ (Seeding) และองค์ประกอบของสารละลายในการตกตะกอนแคลไซต์ โดยตัวล่อที่ศึกษาคือควอตซ์ (Quartz) โดโลไมท์ (Dolomite) และแคลไซต์ ที่มีขนาดต่างกัน จากผลการวิจัยพบว่ามีเพียงแคลไซต์เท่านั้นที่ส่งผลให้มีการตกตะกอนของแคลไซต์ซึ่งอัตราการตกตะกอนขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวล่อ และการเพิ่มอัตราส่วนของ CO_3^{2-} ต่อแคลไซต์ยังช่วยเพิ่มอัตราการตกตะกอนด้วย

2.5 การประเมินราคาของวิธีการสำหรับการป้องกันการเกิดตะกอน

ในการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นสำหรับแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำนั้น การประเมินราคาเป็นหนึ่งในข้อมูลที่สำคัญสำหรับประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการหรือแนวทางต่าง ๆ ไปปรับใช้จริงกับโรงงาน โดยคำนายของการประเมินราคา หมายถึง การคำนวณหาค่าการลงทุน ค่าดำเนินการที่มีราคาใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายจริงมากที่สุด ซึ่งการทำการประเมินราคาจำเป็นที่จะต้องมีการเสนอแนวทางสำหรับการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำก่อน จากนั้นจึงจะสามารถทำการประเมินราคาได้ (Turton et al., 2008) โดยการประเมินราคาจะคำนวณหาต้นทุนในการลงทุนและต้นทุนในการผลิตสินค้า ซึ่งรายละเอียดของต้นทุนแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.5.1 ต้นทุนในการลงทุนของโครงการ (Total capital investment cost) เป็นค่าการลงทุนเริ่มต้นที่เกิดจาก 2 ส่วน คือค่าการลงทุนเริ่มต้นคงที่ (Fixed capital investment) และเงินทุนหมุนเวียน (Working capital investment) ซึ่งเป็นเงินที่กักไว้ใช้ในช่วงเริ่มต้นโครงการ ส่วนค่าการลงทุนเริ่มต้นคงที่จะประกอบไปด้วยสองส่วนย่อย คือค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์และการก่อสร้าง และอีกหนึ่งส่วนคือค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าแรง

1) การประเมินราคาค่าการลงทุนเริ่มต้นคงที่ (Fixed capital investment) ในการประเมินราคาของต้นทุนคงที่ สิ่งที่ต้องพิจารณาคือดัชนีราคาของอุปกรณ์ (cost indexes) ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตและช่วงเวลา

1.1) ผลของกำลังการผลิตต่อต้นทุนของอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้ว การประเมินต้นทุนของอุปกรณ์มักจะใช้การประเมินจากกำลังการผลิต ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2-25)

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^x \quad (2-25)$$

โดยที่ A_a คือราคาของอุปกรณ์ของกำลังการผลิตที่ต้องการ C_a
 A_b คือราคาของอุปกรณ์ของกำลังการผลิตที่ทราบค่า C_b
 x คือ Cost capacity factor ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6

1.2) ผลของช่วงเวลาต่อต้นทุนของอุปกรณ์ จะเป็นการประเมินต้นทุนโดยอาศัยอัตราส่วนของราคาอุปกรณ์ที่ช่วงเวลาหนึ่งเทียบกับราคาสินค้าที่ช่วงเวลาเริ่มต้น ซึ่งหากรู้ราคาในอดีต จะสามารถหารราคาอุปกรณ์นั้น ๆ ในปัจจุบันได้ ดังสมการที่ (2-26)

$$C_2 = C_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad (2-26)$$

เมื่อ C_1 คือ ราคาของอุปกรณ์ในอดีต
 C_2 คือ ราคาของอุปกรณ์ในปัจจุบัน
 I_1 คือ ดัชนีราคาในอดีต
 I_2 คือ ดัชนีราคาในปัจจุบัน

แต่ถ้าไม่ทราบดัชนีราคา สามารถใช้ดัชนีราคาจากบริษัทที่จำหน่ายอุปกรณ์นั้น ๆ ได้

2) การประมาณราคาเงินทุนหมุนเวียน (Working capital investment) เนื่องจากเงินส่วนนี้เป็นเงินก้อนไว้ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสินค้าคงคลังหรือค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์สำรอง เงินสด เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนในการประเมินเงินทุนหมุนเวียนมีดังนี้

- ค่าเงินทุนหมุนเวียนจะอยู่ที่ร้อยละ 10 - 20 ของค่าการลงทุนเริ่มต้นคงที่
- คิดเป็นร้อยละ 10 ต่อราคาขายต่อปี

2.5.2 ต้นทุนทั้งหมดในการผลิตสินค้า (Total product cost) เป็นต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายโดยตรงในกระบวนการผลิต (Manufacturing cost) เช่น ค่าวัสดุ ค่าแรงงานและค่าซ่อมบำรุง ส่วนค่าใช้จ่ายอื่น ๆ (General expense) เช่น ค่าการวิจัยและพัฒนา ค่าใช้จ่ายในการจำหน่ายสินค้าและค่าใช้จ่ายในการบริหาร ซึ่งต้นทุนในการผลิตสินค้าหาได้ดังนี้

$$\text{COM} = \text{DMC} + \text{FMC} + \text{GE} \quad (2-27)$$

โดยที่	COM	คือ ราคาต้นทุนทั้งหมดในการผลิต (บาท/หน่วยการผลิต)
	DMC	คือ ราคาต้นทุนโดยตรง (บาท/หน่วย)
	FMC	คือ ราคาต้นทุนคงที่ (บาท/หน่วย)
	GE	คือ ค่าใช้จ่ายทั่วไป (บาท/หน่วย)

2.6 ปรัชศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การทำบริสุทธิ์น้ำเกลือสำหรับการผลิตเกลือบริสุทธิ์เพื่อบริโภค

Terziev (1935) ได้เปิดเผยวิธีการกำจัด CaSO_4 ออกจากน้ำเกลือที่ออกจากกระบวนการแอมโมเนีย-โซดา (Ammonia-Soda process) ด้วยวิธีการตกตะกอนโดยให้ตกตะกอนร่วมกับเกลือแคลเซียมอื่นที่ไม่ละลายน้ำ เช่น CaCO_3 โดยปริมาณของ CaCO_3 ที่ตกตะกอนจะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 10 เท่าของ CaSO_4 ที่มีอยู่ในน้ำเกลือ ซึ่งตะกอนของ CaCO_3 ที่เกิดขึ้นมาจากการเติม Ca(OH)_2 ลงไปในน้ำเกลือและตามด้วยการเติมก๊าซ CO_2 ลงไปเพื่อเปลี่ยน Ca(OH)_2 ให้เป็น CaCO_3

Hidetomo (1964) ได้นำเสนอวิธีการทำน้ำเกลือที่มีไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ปนอยู่ให้มีความบริสุทธิ์ โดยการเติมสารพวก NaOH Ca(OH)_2 หรือ Na_2CO_3 เพื่อเปลี่ยนไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เป็น CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ตามลำดับ และในขณะที่เติมอากาศที่สภาวะความดันบรรยากาศหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำเกลือ นั้น ให้ทำการลดความดันเพื่อให้เกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งกลุ่มฟองอากาศนี้จะช่วยพาตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ลอยขึ้นไปบนผิวบนของน้ำเกลือจากนั้นกลุ่มตะกอนก็จะถูกกวาดออกหรือ Skimming จากน้ำเกลือ

Moritz (1982) ได้เสนอวิธีการผลิตเกลือบริสุทธิ์จากน้ำเกลือที่มีไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ปะปนอยู่ โดยวิธีการที่ใช้คือการใส่สารละลาย Na_2CO_3 และ NaOH ในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ออกมาในรูปของตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ตามลำดับ เมื่อผ่านการตกตะกอนแล้วจะต้องมีการกรองแยกซ้ำ ซึ่งวิธีการนี้สามารถลดปริมาณรวมของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือลงได้ต่ำกว่า 5 ppm นอกจากนี้ การเติม Na_2CO_3 ก่อน NaOH จะช่วยให้ตกตะกอนได้ง่าย

2.6.2 การนำเอาสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมมาใช้ประโยชน์

Moote et al. (1985) ได้ศึกษาการแยกและการนำเอาแมกนีเซียม (Mg) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) จากน้ำเกลือกลับมาใช้ โดยการเติม Ca(OH)_2 เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำเกลือ ที่

อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C แต่ต้องต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำเกลือ ซึ่งการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้ตะกอน $Mg(OH)_2$ ตกตะกอนได้เร็วขึ้นและสามารถกรองแยกออกจากน้ำเกลือได้

Lehmann et al. (2014) ได้ศึกษาการนำเอาสารละลายแมกนีเซียมจากตะกอน $Mg(OH)_2$ ที่ได้จากน้ำเกลือกลับมาใช้ โดยการเติมสาร CaO เข้าไปทำปฏิกิริยากับไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือ แต่เนื่องจากตะกอน $Mg(OH)_2$ เบาละและตกตะกอนได้ช้า จึงมีการแยก $Mg(OH)_2$ จากน้ำเกลือ โดยการใส่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และแม่เหล็ก จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการใส่แม่เหล็กเข้าร่วมกับการใส่ Fe_3O_4 จะทำให้สามารถแยก $Mg(OH)_2$ ได้เร็วยิ่งขึ้น และสารละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $Mg(HCO_3)_2$ โดยสารเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง $Mg(OH)_2$ ที่ถูกดูดซับอยู่บน Fe_3O_4 กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และก๊าซ CO_2 ตามลำดับ

De Beer et al. (2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ $CaCO_3$ ชนิดตกผลึกจากกระบวนการนำซัลเฟอร์ (S) จากกากยิปซัมกลับมาใช้ โดยการนำกากยิปซัมมาผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนยิปซัมให้อยู่ในรูปของแคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) จากนั้นจะเปลี่ยน CaS ให้อยู่ในรูปของสารละลาย โดยการเติมน้ำและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จากนั้นปล่อยก๊าซ CO_2 ลงในสารละลายเพื่อตกตะกอน $CaCO_3$ ส่วนก๊าซ H_2S ที่ออกจากกระบวนการคาร์บอนเนชัน (Carbonation) จะถูกนำไปแยกเป็น S ต่อไป

2.6.3 สาเหตุและแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรัน

Al-Rawajfeh et al. (2005) กล่าวว่าเกิดการเกิดตะกรันขึ้นในหม้อต้มระเหย มีสาเหตุมาจากเกลือของ $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$ และ $CaSO_4$ ที่ละลายในน้ำได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการเกิดตะกรันจำพวกนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการสูญเสียก๊าซ CO_2

Yi-Pin et al. (2005) ได้ศึกษาผลของการเติมตัวล่อ (Seeding) และองค์ประกอบของสารในการตกตะกอนของแคลไซต์ ซึ่งตัวล่อที่ศึกษาคือ ควอตซ์ (Quartz) โดโลไมท์ (Dolomite) และแคลไซต์ ที่มีขนาดต่างกัน จากผลการวิจัยพบว่ามีเพียง $CaCO_3$ เท่านั้นที่ส่งผลให้มีการตกตะกอนของ $CaCO_3$ และอัตราการตกตะกอนก็ยิ่งขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวล่อด้วยและการเพิ่มอัตราส่วนของ CO_3^{2-} ต่อแคลไซต์ จะช่วยเพิ่มอัตราการตกตะกอนด้วย

Kazi et al. (2015) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการเกิดตะกรัน $CaCO_3$ บนพื้นผิวท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและศึกษาวิธีลดตะกรัน โดยใช้กัมอารบิก (Gum arabic) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่าปริมาณของตะกอน $CaCO_3$ บนพื้นผิวท่อที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน จะมีปริมาณดังนี้ อะลูมิเนียม > ทองเหลือง > เหล็กกล้าไร้สนิม 316 และการเติมกัมอารบิก

ลงไปในการละลายจะช่วยหน่วงการเติบโตของผลึก CaCO_3 ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่ลดลง

2.6.4 การศึกษาพฤติกรรมของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

Petric and Petric (1980) ได้ศึกษาอัตราการตกตะกอนของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่ผลิตจากน้ำทะเล โดยการเติมปูนขาวเข้าทำปฏิกิริยากับไอออน Mg^{2+} ที่อยู่ในน้ำทะเล พร้อมทั้งทำการกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมสารเร่งตกตะกอน จากการศึกษาพบว่าอัตราการตกตะกอนของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จะเพิ่มขึ้น แต่การเติมสารเร่งตกตะกอนจะทำให้ความบริสุทธิ์ของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ มีค่าลดลง

Turek and Gnot (1995) ได้ศึกษาการตกตะกอนของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จากน้ำเกลือ โดยการเติมสารละลาย NaOH เข้าทำปฏิกิริยากับไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือ ซึ่งการเติมสารละลาย NaOH ลงไปในน้ำเกลือโดยไม่มีการกวน จะช่วยเพิ่มอัตราการตกตะกอนและอัตราการกรองได้ และหากมีการปล่อยให้มีการก่อตัว (Forming) ที่นานขึ้นและมีการกวนช่วย จะทำให้การตกตะกอนเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่าและอัตราการกรองเพิ่มขึ้น 60 เท่า ส่วนความชื้นของตะกอน $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ก็จะลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ การเพิ่มระยะเวลาในการก่อตัว (Time of forming) ยังช่วยเพิ่มขนาดของตะกอนด้วย

Song et al. (2013) ได้ศึกษาการเตรียมและกลไกของการเกิดผลึกของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ด้วยวิธีการตกตะกอนในเครื่องตกผลึก โดยมี MgCl_2 เป็นสารตั้งต้นและ NaOH เป็นสารที่ทำให้เกิดตะกอน จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) มีผลต่อขนาดและปริมาณของน้ำใน $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่ง $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ $30 \mu\text{m}$ มีความบริสุทธิ์ 99% และมีน้ำปนอยู่น้อยกว่า 31%

Zeppenfeld (2011) ได้ศึกษาการแยกไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ออกจากสารละลายด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยไอออนทั้งสองจะถูกแยกออกมาในรูปของ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ตามลำดับ โดยตะกอนทั้งสองจะเกาะที่แคโทด เนื่องจากที่แคโทดมีไอออน CO_3^{2-} และ OH^- ซึ่งอัตราการตกตะกอนของ CaCO_3 ถูกจำกัดโดยการแพร่ของไอออน HCO_3^- แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} แต่การตกตะกอนของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งอัตราการตกตะกอนของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

เนื่องจากปัญหาการเกิดตะกรันในหม้อเคี้ยวสุญญากาศของกระบวนการผลิตเกลือ เป็นต้นเหตุของการสูญเสียกำลังการผลิตและสิ้นเปลืองพลังงาน จึงนำมาสู่การศึกษาต้นเหตุของการเกิดตะกรันและหาแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน สำหรับเนื้อหาของบทที่ 3 จะแสดงถึงรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่าง รวมทั้งรายละเอียดของวิธีการทดลองในหัวข้อต่าง ๆ

3.2 สารเคมีและเครื่องมือ

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) น้ำเกลือดิบ
- 2) สารโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3)
- 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) 50 wt.%
- 4) สารช่วยเร่งตกตะกอน (Polyacrylamide, Maxfloc 912)
- 5) สารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) บริสุทธิ์ (เกรดทางการค้า)
- 6) Calconcarboxylic acid indicator (Cal-red)
- 7) สารละลายบัฟเฟอร์ $\text{NH}_4\text{OH}-\text{NH}_4\text{Cl}$
- 8) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M และ 1.0 M
- 9) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) 0.1 M
- 10) สารละลาย EDTA 0.01 M

โดยน้ำเกลือดิบ สาร Na_2CO_3 สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 50 wt.% สารช่วยเร่งตกตะกอน Polyacrylamide และ Calconcarboxylic acid indicator (Cal-red) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สยามทรัพย์มณี จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) อ่างกระจก ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
- 2) ชุดจ่ายออกซิเจนในตู้ปลา (ใช้เป็นตัวช่วยในการผสมของสารในอ่างกระจก)
- 3) ชุดจำลองเพื่อศึกษาการเกิดตะกรัน
- 4) ชุดเครื่องแก้วทดสอบปฏิกิริยาแบบแจ็กเกต (Jacketed reaction vessels)

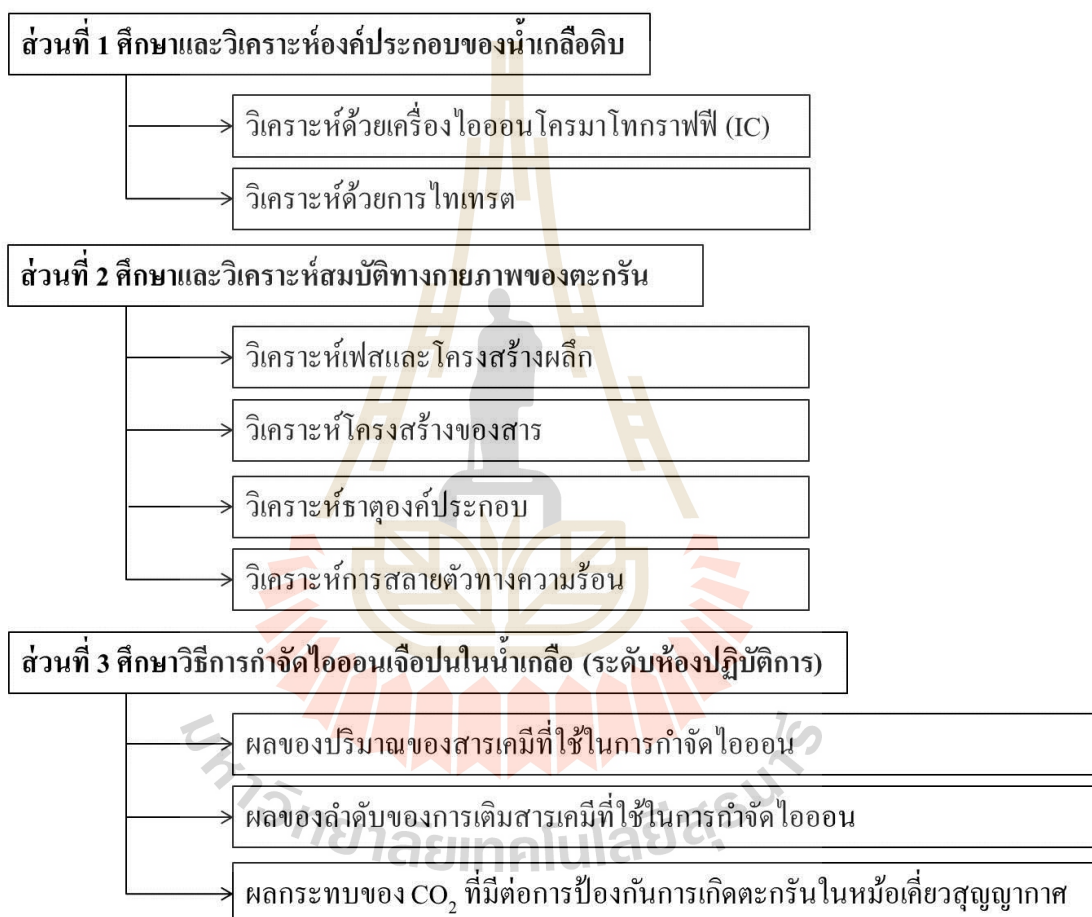
3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

- 1) เครื่องไอออน โครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC)
- 2) เครื่องวิเคราะห์เฟสและ โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction, XRD)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ
(Energy dispersive x-ray fluorescence, EDXRF)
- 4) เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร
(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)
- 5) เครื่องมือวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน
(Simultaneous thermal analysis, STA)
- 6) เครื่องมือวิเคราะห์การคายซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์
(CO₂-Temperature programmed desorption, CO₂-TPD)

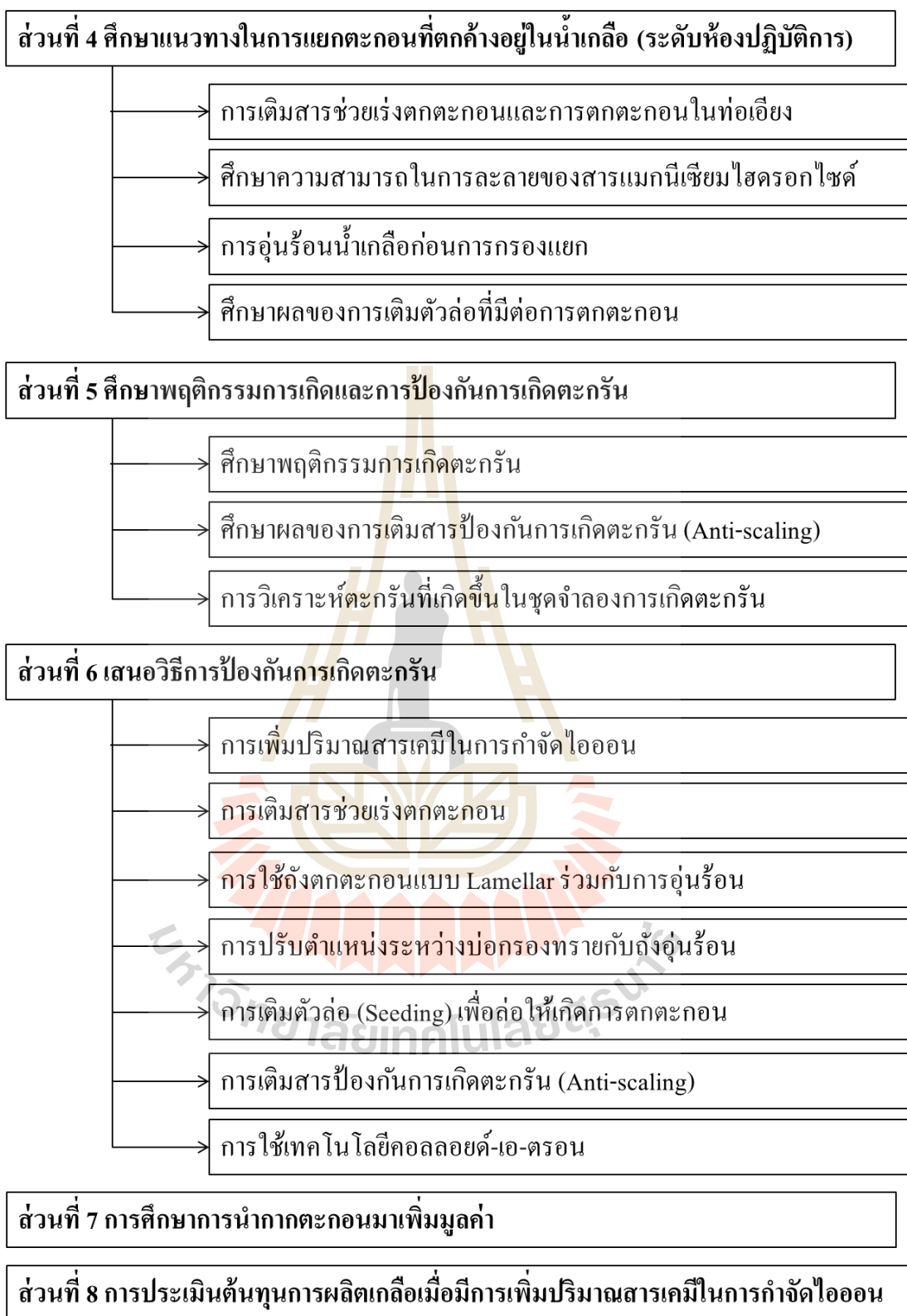
3.3 วิธีการทดลอง

การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน ในหม้อเคียวสุญญากาศของกระบวนการผลิตเกลือ แบ่งการศึกษาออกเป็น 8 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำเกลือดิบ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณองค์ประกอบของไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเกลือดิบ ส่วนที่ 2 ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันด้วยเทคนิค XRD XRF FTIR และ STA เพื่อหาสาเหตุของการเกิดตะกรัน ส่วนที่ 3 ศึกษาวิธีการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ) เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมต่อการกำจัดไอออนเจือปน ส่วนที่ 4 ศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนออกจากน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ) เพื่อหาแนวทางในการแยกตะกอนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกำจัดไอออนและตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ ส่วนที่ 5 ศึกษาพฤติกรรม การเกิดและการป้องกันการเกิดตะกรัน โดยทำการศึกษาดูชุดอุปกรณ์จำลองอย่างง่าย ส่วนที่ 6 เสนอวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน ซึ่งเป็นการนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถนำไปใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันในโรงงานได้ โดยใช้ผลการทดลองจากระดับห้องปฏิบัติการมาประกอบการ

นำเสนอ ส่วนที่ 7 ศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า และส่วนที่ 8 การประเมินต้นทุนของการผลิตเกลือ เมื่อเลือกใช้วิธีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไออนเป็นแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกอน ซึ่งผลจากการประเมินต้นทุนจะถูกใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับประกอบการพิจารณาและตัดสินใจก่อนที่จะมีการนำไปใช้จริงในโรงงาน ซึ่งภาพรวมของการศึกษางานวิจัยทั้งหมดนี้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของการทดลอง

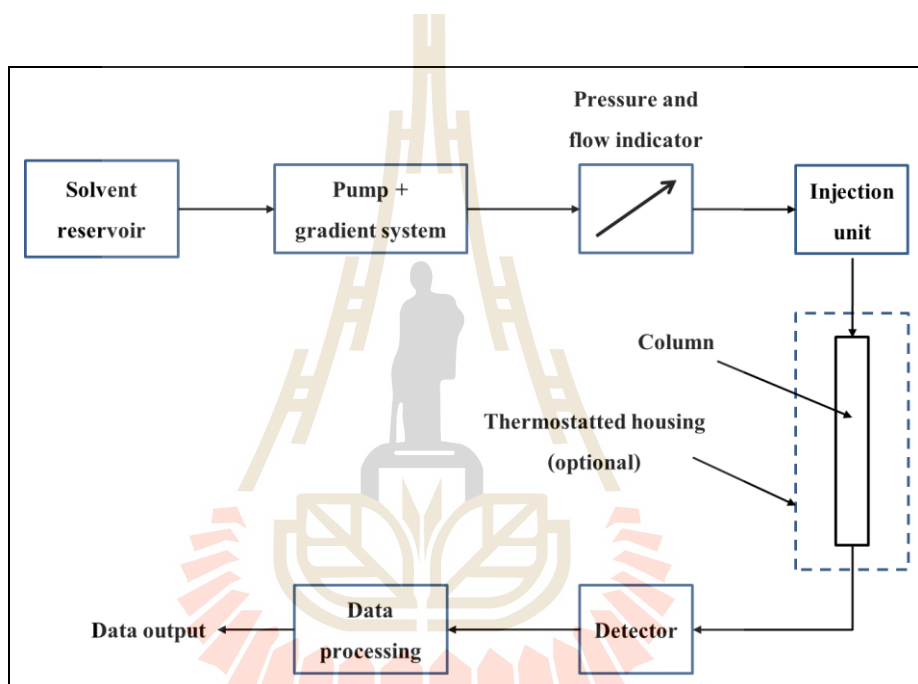


รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของการทดลอง (ต่อ)

3.3.1 การศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบ

การวิเคราะห์หาไอออนองค์ประกอบในน้ำเกลือดิบของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ การใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (IC) และการไทเทรต ซึ่งรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวมีดังนี้

1) เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography, IC) เป็นอีกหนึ่งเทคนิคโครมาโทกราฟีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแยกและวิเคราะห์ปริมาณของตัวถูกละลายที่อยู่ในรูปไอออน โดยองค์ประกอบของเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบอย่างง่ายของเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี
(Fritz and Gjerde, 2009)

โดยไอออนโครมาโทกราฟีเป็นรูปแบบหนึ่งของลิกวิดโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) ที่พัฒนาขึ้นมาในปี 1975 โดยมีพื้นฐานการทำงานมาจากไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโทกราฟี ในการวิเคราะห์ไอออนสารอนินทรีย์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไอออนบวก (Cation) และ ไอออนลบ (Anion) ส่วนสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ได้จะต้องเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นกรดหรือเบสที่สามารถ Protonate หรือ Ionize ให้เป็นสารประกอบที่มีสมบัติที่มีขั้ว การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุภายในคอลัมน์ที่เป็นเฟสคงที่ (Stationary phase) โดยมี

ตัวพาซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) พาสารถัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ที่มีของแข็งจำพวกเรซินบรรจุอยู่ภายในเพื่อทำการแลกเปลี่ยนประจุกันบนผิวของเฟสคงที่ จากนั้นสารจะเข้าสู่ตัวตรวจวัดเพื่อทำนายชนิดของไอออนที่อยู่ภายในสารตัวอย่างด้วยการเปรียบเทียบระยะเวลา ที่สารวิเคราะห์ในตัวอย่างออกเทียบกับเวลาของสารมาตรฐานที่ต้องการวิเคราะห์ (Fritz and Gjerde, 2009)

2) การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต การไทเทรตเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือ ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นวิธีการหลักสำหรับหาปริมาณไอออนองค์ประกอบในน้ำเกลือของงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถวิเคราะห์ได้ทันที โดยวิธีการไทเทรตที่อธิบายในหัวข้อนี้ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเป็นไอออนเจือปนหลักที่อยู่ในน้ำเกลือดิบ และเป็นต้นเหตุของการเกิดตะกรัน ดังที่ได้นำเสนอไว้ใน Garrett-Price et al. (1985) โดยขั้นตอนการหาปริมาณไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือด้วยวิธีการไทเทรต มีดังนี้

2.1) ปิเปิดน้ำเกลือปริมาตร 25 mL และน้ำกลั่น 475 mL ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 mL แล้วเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน

2.2) ปิเปิดสารละลายที่เตรียมในข้อ 2.1) มา 25 mL ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 mL

2.3) เติมสารละลายบัฟเฟอร์ $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_4\text{OH}$ ปริมาตร 1 mL และ Hardness indicator ปริมาตร 2-3 หยด เขย่าให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2.4) นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA ความเข้มข้น 0.01 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน บันทึกปริมาตร EDTA ที่ใช้เป็นค่า A

2.5) ปิเปิดสารละลายที่เตรียมในข้อ 2.1) มา 25 mL ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 mL

2.6) เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 1 mL แล้วเติม Cal-red ปริมาณครึ่งช้อนตวงเพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์

2.7) นำสารละลายในข้อ 2.6) ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน บันทึกปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตเป็นค่า B

2.8) นำมาคำนวณปริมาณ Total hardness ปริมาณไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Total hardness (mg/L as CaCO}_3) = \frac{A \times N_{\text{EDTA}} \times 1000 \times 500}{25 \times 25} \quad (3-1)$$

$$\text{Calcium hardness (mg/L as CaCO}_3) = \frac{B \times N_{\text{EDTA}} \times 1000 \times 500}{25 \times 25} \quad (3-2)$$

$$\text{Magnesium hardness (mg/L as CaCO}_3) = \text{Total hardness} - \text{Calcium hardness} \quad (3-3)$$

$$\text{Calcium hardness (mg/L)} = \text{Calcium hardness (mg/L as CaCO}_3) \times 0.4 \quad (3-4)$$

$$\text{Magnesium hardness (mg/L)} = \text{Magnesium hardness (mg/L as CaCO}_3) \times 0.243 \quad (3-5)$$

เมื่อ A คือ ปริมาตร EDTA 0.01 M ที่ใช้ในการไทเทรตหา Total hardness
 B คือ ปริมาตร EDTA 0.01 M ที่ใช้ในการไทเทรตหา Calcium hardness
 N_{EDTA} คือ ความเข้มข้นที่แท้จริงของ EDTA (mol/L)

3.3.2 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน

การศึกษาและวิเคราะห์ตะกรันเป็นการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันที่เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำเพื่อหาต้นเหตุของการเป็นตะกรัน ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย การวิเคราะห์หาเฟสและโครงสร้างผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างของสารและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในตะกรัน การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ และการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน มีดังนี้

1) X-ray diffraction (XRD) (สันศนิษฐ์ รักไทยเจริญชีพ, 2558; Dinnebier, 2008)

เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง พร้อมทั้งใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงอะตอมและขนาดผลึก ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray) เมื่อรังสี X-ray ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกจะมีรังสีบางส่วนสะท้อนกลับ ซึ่งมุมของรังสีสะท้อนกลับจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่าง ๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่อง X-ray diffractometer ขึ้นและมีการ

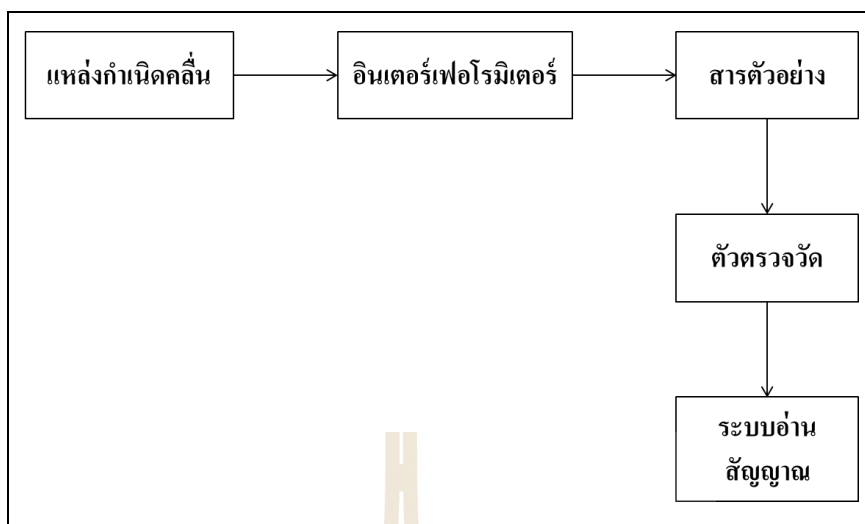
พัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda_{x\text{-ray}} = 2d \sin\theta \quad (3-6)$$

เมื่อ	n	คือ	1, 2, 3, ...
	$\lambda_{x\text{-ray}}$	คือ	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
	θ	คือ	มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก

2) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, 2547; แม้น อมรสิทธิ์, 2009)

เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลสาร โดยศึกษาจากทรานซิชันของการสั่น ของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (Infrared) ในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) ประมาณ $12800\text{-}10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นวิสิเบิล (Visible radiation) กับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave radiation) โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near infrared Middle infrared Far-Infrared ซึ่งช่วงของรังสีอินฟราเรดที่มักใช้ในการวิเคราะห์คือ Middle infrared มีช่วงเลขคลื่นเท่ากับ $4000\text{-}200\text{ cm}^{-1}$ เมื่อโมเลกุลของสารได้ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไป จะทำให้พันธะของโมเลกุลในสารตัวอย่างเกิดการสั่นและการหมุน ซึ่งความถี่ของรังสีที่โมเลกุลดูดกลืนเข้าไปจะเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลสารนั้น ๆ โดยที่สารแต่ละตัวจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่แตกต่างกันออกไปทำให้สามารถใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะแสดงในความสัมพันธ์ของ Wavenumber กับ Transmittance หรือที่เรียกว่า Infrared spectrum สำหรับไดอะแกรมของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบฟูเรียร์-ทรานสฟอร์ม (FTIR) แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม
(นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์, 2547; แม้น อมรสิทธิ์, 2009)

ตารางที่ 3.1 ช่วงเลขคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบต่าง ๆ

Region	Group	Possible compound present (or absen:
3700-3100	-OH -NH =CH	Alcohols, aldehydes, carboxylic acids Amides, amines Alkynes
3100-3000	=CH -CH ₂ or -CH=CH-	Aromatic compounds Alkenes or unsaturated rings
3000-2800	-CH, -CH ₂ , -CH ₃	Aliphatic group
2800-2600	-CHO	Aldehydes (Fermi doublet)
2700-2400	-POH -SH -PH	Phosphorus compounds Mercaptans and thiols Phosphines
2400-2000	-C≡N -N=N ⁺ =N ⁻ -C≡C-	Nitriles Azides Alkynes*

ตารางที่ 3.1 ช่วงเลขคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบต่าง ๆ (ต่อ)

Region	Group	Possible compound present (or absent:
1870-1650	C=O	Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters ketones, lactams, lactones, quinones
1650-1550	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatics,*aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
1550-1300	NO ₂ CH ₃ and CH ₂	Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
1300-1000	C-O-C and C-OH S=O, P=O, C-F	Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
1100-800	Si-O and P-O	Oganosilicon and phosphorus compounds
1000-650	=C-H -NH	Alkenes and aromatic compounds Aliphatic amines
800-400	C-halogen Aromatic ring	Halogen compounds Aromatic compounds

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์, 2009

3) การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบโดยเครื่องมือ Energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF) (นิพนธ์ ตั้งคณาวัชรีย์ และ คณิตา ตั้งคณาวัชรีย์, 2547)

X-ray fluorescenc หรือการเรืองรังสีเอกซ์ เกิดจากการที่ธาตุเกิดอันตรกิริยากับโฟตอนรังสีเอกซ์ (X-ray photons) แล้วธาตุนั้น ๆ จะผลิตโฟตอนรังสีเอกซ์ขึ้นมาใหม่ที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งรังสีเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยอาศัยความยาวคลื่นและพลังงาน โดยเทคนิค XRF แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Energy dispersive (EDXRF) และ Wavelength dispersive (WDXRF) ซึ่งเทคนิค Energy dispersive จะวัดค่าพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น ในขณะที่ Wavelength dispersive จะวัดค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น การเรืองรังสีเอกซ์เกิดจากการที่ผ่านรังสีเอกซ์ปฐมภูมิไปยังสารตัวอย่างที่มีธาตุเป็นองค์ประกอบ จากนั้นจะเกิดการดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K (ชั้นในสุด) ของธาตุหลุดออกไปจัดเป็นกระบวนการ Photoelectron absorption ซึ่งจะทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้น K และตอนนี้ธาตุอยู่ในรูปไอออนและอยู่ในสภาวะเร้า เมื่อไอออนใน

สภาวะเร้ากลับสู่สภาวะพื้น อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงาน L จะเคลื่อนที่มาแทนที่ว่างอิเล็กตรอนในชั้น K พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ออกมา

4) การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนโดยเครื่องมือ Simultaneous thermal analyzer (STA) (Sorai, 2004)

เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยเทคนิค TGA (Thermogravimetric analysis) และเทคนิค DSC (Differential scanning calorimeter) โดย TGA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างภายใต้สภาวะที่กำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสารตัวอย่างจะถูกบันทึกเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิหรือเวลา ในการวิเคราะห์ TGA มักใช้ในการศึกษาความเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ ปริมาณของสาร และชนิดของสารที่อยู่ในสารตัวอย่าง เป็นต้น ในขณะที่เทคนิค DSC จะใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ดูดความร้อน (Endothermic) หรือคายความร้อน (Exothermic) ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่าง และเทคนิค DSC สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความจุความร้อน (Heat capacity) ของสารตัวอย่างได้ด้วย โดยการวิเคราะห์นั้นจะทำการใส่ตัวอย่างลงบนตาชั่งความละเอียดสูงที่มีการบันทึกค่าด้วยโปรแกรมที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งจะมีการบันทึกค่าต่อเนื่องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่มีการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง

3.3.3 การศึกษาวิธีการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

ในการศึกษาและหาวิธีในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ นั้น มีการศึกษาตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ 1) ปริมาณสารเคมี 2) ลำดับการเติมสารเคมี และ 3) ผลกระทบของก๊าซ CO_2 ที่มีต่อการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ โดยรายละเอียดของการทดลองมีดังต่อไปนี้

1) การศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน ในการกำจัดไอออนเจือปนหลัก (Ca^{2+} และ Mg^{2+}) ในน้ำเกลือดิบ เพื่อเตรียมน้ำเกลือก่อนเข้าสู่กระบวนการตกผลึกนั้น ได้ใช้วิธีการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยการตกตะกอน ซึ่งไอออนทั้งสองจะถูกกำจัดออกมาในรูปของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) โดยใช้สารละลาย Na_2CO_3 และ NaOH ตามลำดับ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือพิจารณาการลดลงของปริมาณไอออนเจือปนในน้ำเกลือที่ขึ้นกับปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน ในการทดลองการกำจัดไอออนเจือปนจะใช้น้ำเกลือดิบปริมาตร 1 ลิตรต่อหนึ่งการทดลอง โดยน้ำเกลือดิบที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออน Ca^{2+} เท่ากับ 2,982 mg/L และ Mg^{2+} เท่ากับ 2,332 mg/L โดยรายละเอียดของการทดลองมีดังนี้

1.1) คำนวณปริมาณสารเคมีที่จะใช้ในการกำจัดไอออน โดยปริมาณที่ใช้จะคำนวณจากปริมาณไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม โดยการคำนวณจะขึ้นอยู่กับสถานะที่เลือกใช้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือดิบ

ชื่อสถานะ	สัดส่วนของปริมาณสารเคมีที่ใช้	
	Na ₂ CO ₃	NaOH
PC-PH	ตามสัดส่วนของโรงงาน	ตามสัดส่วนของโรงงาน
SC-50%SH	ตามสัดส่วนไอออนแคลเซียม	50%ของสัดส่วนไอออนแมกนีเซียม
SC-SH	ตามสัดส่วนไอออนแคลเซียม	ตามสัดส่วนไอออนแมกนีเซียม
110%SC- 110%SH	110%ของสัดส่วนไอออนแคลเซียม	110%ของสัดส่วนไอออนแมกนีเซียม
120%SC- 120%SH	120%ของสัดส่วนไอออนแคลเซียม	120%ของสัดส่วนไอออนแมกนีเซียม
130%SC- 130%SH	130%ของสัดส่วนไอออนแคลเซียม	130%ของสัดส่วนไอออนแมกนีเซียม

1.2) เมื่อได้ปริมาณของสารเคมีที่ต้องใช้ ทำการเตรียมสารละลาย โดยละลาย Na₂CO₃ ที่เป็นของแข็งตามปริมาณที่คำนวณได้ในน้ำกลั่น 20 mL และละลาย NaOH ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 50 wt.% ตามปริมาณที่คำนวณได้ในน้ำกลั่น 7.5 mL

1.3) เติมสารละลาย Na₂CO₃ ลงในน้ำเกลือ โดยมีการกวนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยการใส่ชุดจ่ายออกซิเจนในตู้ปลาเป็นตัวช่วยในการผสม

1.4) หยุดการผสม 15 นาที

1.5) เติมสารละลาย NaOH ลงในน้ำเกลือ ที่ไว้ 15 นาที

1.6) เปิดปั๊มของตัวจ่ายออกซิเจนในตู้ปลาเพื่อผสมอีกครั้ง เป็นเวลา 30 นาที

1.7) ปิดลม และปล่อยให้ตกตะกอน อย่างน้อย 2 - 3 ชั่วโมง

1.8) นำน้ำเกลือใสมาวัดค่าปริมาณของไอออน Ca²⁺ และ Mg²⁺ ด้วยวิธีการไทเทรตกับสารละลาย EDTA ดังวิธีในหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” แต่ใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 25 mL ต่อน้ำกลั่น 225 mL

2) การศึกษาผลของลำดับการเติมสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของลำดับการเติมสารเคมีที่มีต่อการลดลงของค่าไอออนในน้ำเกลือ โดยจะทำการเติมสารละลาย NaOH ก่อนสารละลาย Na_2CO_3 ซึ่งปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 3.2 และน้ำเกลือดิบที่ใช้ในการทดลองคือ 1 ลิตร มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออน Ca^{2+} เท่ากับ 2,982 mg/L และ Mg^{2+} เท่ากับ 2,332 mg/L โดยรายละเอียดของวิธีการศึกษามีดังนี้

2.1) เตรียมสารละลาย โดยละลาย Na_2CO_3 ที่เป็นของแข็งในน้ำกลั่น 20 mL และละลาย NaOH ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 50 wt.% ในน้ำกลั่น 7.5 mL

2.2) เติมสารละลาย NaOH ทิ้งไว้ 15 นาที

2.2) เปิดปั๊มตัวจ่ายออกซิเจนในตู้ปลา เพื่อช่วยให้สารผสมกันได้ดีขึ้นอีก 15 นาที

2.3) เติมสารละลาย Na_2CO_3 โดยยังคงเปิดปั๊มอยู่ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง 30 นาที

2.4) ปิดลม และปล่อยให้ตกตะกอน อย่างน้อย 2-3 ชั่วโมง

2.5) นำน้ำเกลือใสมาวัดค่าปริมาณของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยวิธีการไทเทรตกับสารละลาย EDTA ดังวิธีในหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” แต่ใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 25 mL ต่อน้ำกลั่น 225 mL

3) การศึกษาผลกระทบของ CO_2 ที่มีต่อการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ การศึกษาผลกระทบของ CO_2 มีต่อการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ ประกอบด้วยการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสูญเสียก๊าซ CO_2 ในน้ำเกลือ และผลของการเติมก๊าซ CO_2 ที่มีต่อการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ มีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

3.1) การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสูญเสียก๊าซ CO_2 ในน้ำเกลือ

- (1) ตวงน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว 100 mL ใส่ลงขวดรูปชมพู่ 2 ขวด
- (2) นำไปอุ่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 60 70 80 และ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- (3) ปิดปากขวดด้วยพลาสติกแรปและกระดาษฟอยล์ รอให้เย็น
- (4) ขวดที่ 1 หยดฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) และไทเทรตด้วยกรด HCl 0.1 M บันทึกค่าเป็น V_p
- (5) ขวดที่ 2 หยดเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) และไทเทรตด้วยกรด HCl 0.1 M บันทึกค่าเป็น V_{mo} เมื่อได้ค่า V_p และ V_{mo} จะต้องมีการพิจารณาสมการที่ใช้ในการหาปริมาณ CO_2 ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

Volume Concentration	Predominant form of alkalinity	Approximate concentration
$V_p = V_{mo}$	CO_3^{2-}	$[\text{CO}_3^{2-}] = V_p * N_{\text{HCl}}/V_s$
$V_p = 0$	HCO_3^-	$[\text{HCO}_3^-] = V_{mo} * N_{\text{HCl}}/V_s$
$V_{mo} = 0$	OH^-	$[\text{OH}^-] = V_p * N_{\text{HCl}}/V_s$
$V_{mo} > V_p$	CO_3^{2-} and HCO_3^-	$[\text{CO}_3^{2-}] = V_p * N_{\text{HCl}}/V_s$ $[\text{HCO}_3^-] = (V_{mo}-V_p) * N_{\text{HCl}}/V_s$
$V_p > V_{mo}$	OH^- and CO_3^{2-}	$[\text{CO}_3^{2-}] = V_{mo} * N_{\text{HCl}}/V_s$ $[\text{HCO}_3^-] = (V_p-V_{mo}) * N_{\text{HCl}}/V_s$

ที่มา : Lower, 1999

โดย N_{HCl} คือ ค่าความเข้มข้นของกรด HCl มีค่าเท่ากับ 0.1 M

V_s คือ ปริมาตรของน้ำเกลือที่ใช้ในการหาค่าความเป็นด่าง เท่ากับ 100 mL

3.2) ผลของการเติมก๊าซ CO_2 ที่มีต่อการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อต้ม

สูญญากาศ

ศึกษา

อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 15 นาที

- (1) วัดค่า pH และค่าไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เริ่มต้นของน้ำเกลือดิบที่นำมา
- (2) ตวงน้ำเกลือดิบปริมาตร 250 mL ใส่ในบีกเกอร์ ปิดด้วยกระดาษฟอยล์
- (3) ปล่อยก๊าซ CO_2 ลงในน้ำเกลือ ด้วยอัตราการไหล 100 mL/min ที่
- (4) สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในน้ำเกลือ วัดค่า pH หลังเติมก๊าซ CO_2
- (5) หากมีตะกอนเกิดขึ้นให้กรองและล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์ด้วย SEM และ XRD (ถ้าไม่มีให้ข้ามไป)

(6) โทเทรตหาค่าความเป็นด่างตามวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.1)

3.3.4 การศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

เมื่อได้ศึกษาแนวทางในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือแล้ว วิธีการกำจัดตะกอนก็มีส่วนสำคัญในการป้องกันการเกิดตะกอนได้ สำหรับการศึกษาการแยกตะกอนแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ศึกษาการแยกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไอออนและส่วนที่ 2 ศึกษาการ

แยกตะกอนขนาดเล็กที่ตกค้างในน้ำเกลือ โดยในส่วนที่ 1 จะศึกษาการแยกตะกอนด้วยวิธีการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียง และการทดลองส่วนที่ 2 ทำการแยกตะกอนตกค้างขนาดเล็กด้วยการอุ่นร้อนน้ำเกลือและการเติมตัวต่อ (Seeding) ซึ่งการแยกตะกอนด้วยการอุ่นร้อน ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการหาอุณหภูมิสำหรับการอุ่นร้อน โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

1) การแยกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำเกลือ

เมื่อกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ออกมาในรูปของตะกอน $CaCO_3$ และ $Mg(OH)_2$ ตะกอนทั้งสองจะถูกแยกออกจากน้ำเกลือด้วยการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ค่อนข้างนาน จึงสนใจศึกษาผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและผลของการตกตะกอนในท่อเอียง เพื่อลดระยะเวลาในการตกตะกอน โดยการแยกตะกอนจะศึกษาที่อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.1) การศึกษาผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน ในการแยกตะกอนโดยการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารช่วยเร่งตกตะกอนและปริมาตรของสารช่วยเร่งตกตะกอนที่ใช้ ซึ่งความเข้มข้นที่ศึกษาได้แก่ 0.1 0.25 และ 0.5 %w/v และปริมาตรของสารช่วยเร่งตกตะกอนที่ใช้ต่อตะกอนที่เกิดจากการกำจัดไอออนในน้ำเกลือปริมาตร 500 mL ได้แก่ 2.5 5 10 mL ซึ่งชนิดของสารช่วยเร่งตกตะกอนที่ใช้คือ MAX FLOC 912 เป็นโพลีเมอร์ชนิดไม่มีขั้ว ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการทดลองดังนี้

- (1) ตวงน้ำเกลือดิบปริมาตร 500 mL ใส่ลงในบีกเกอร์
- (2) เตรียมสารละลาย Na_2CO_3 และ NaOH โดยใช้สภาวะ SC-CH สำหรับการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือดิบ
- (3) เติมสารละลาย Na_2CO_3 ลงผสมกับน้ำเกลือเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการใช้ชุดจ่ายออกซิเจนในตู้ปลาเป็นตัวช่วยในการผสม
- (4) หยุดการผสม 15 นาที
- (5) เติมสารละลาย NaOH ลงในน้ำเกลือ ทิ้งไว้ 15 นาที
- (6) เปิดปั๊มของชุดจ่ายออกซิเจนในตู้ปลาเพื่อผสมอีกครั้ง เป็นเวลา 15 นาที
- (7) เติมสารช่วยเร่งตกตะกอน โดยยังเปิดปั๊มต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที
- (8) ปิดปั๊ม ย้ายสารจากบีกเกอร์ลงในกระบอกตวงที่มีขีดบอกปริมาตรขนาด 500 mL
- (9) เริ่มจับเวลา สังเกตการตกตะกอน จนระดับตะกอนถึงขีดปริมาตรที่ 150 mL

1.2) การศึกษาผลของการตกตะกอนภายในท่อเอียง การตกตะกอนภายในท่อเอียงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้ โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาการตกตะกอนในท่อเอียงที่ทำมุมกับระนาบ 60° ซึ่งการตกตะกอนในท่อเอียงนี้ ได้ศึกษาผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนร่วมด้วย ดังนั้นวิธีการทดลองจึงคล้ายกับหัวข้อ 1.1) “การศึกษาผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน” แต่ในขั้นตอนที่ (8) จะเป็นการย้ายสารจากบีกเกอร์ลงกระบอกเอียง จากนั้นจะจับเวลาและสังเกตการตกตะกอน จนกระทั่งระดับตะกอนถึงขีดบอกปริมาตรประมาณ 150 mL

2) การแยกตะกอนตกค้างขนาดเล็กด้วยการอุ่นร้อนน้ำเกลือและการเติมตัวล่อ

(Seeding)

2.1) การอุ่นร้อน การเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสมบัติของสารที่เป็น Inverse solubility ซึ่งเป็นพฤติกรรมของตัวถูกละลายในน้ำเกลือที่สามารถละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเกลือสูงขึ้น จึงส่งผลให้ตัวถูกละลายแยกตัวออกมาเป็นของแข็งและก่อตัวเป็นตะกอน จากพฤติกรรมดังกล่าว จึงสนใจที่จะศึกษาการอุ่นร้อนน้ำเกลือก่อน เพื่อเร่งให้ตัวถูกละลายที่เป็นต้นเหตุของการเกิดตะกอนแยกตัวออกมาก่อน จากนั้นจึงทำการกรองแยกก่อนนำน้ำเกลือป้อนเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศ สำหรับการแยกตะกอนตกค้างด้วยการอุ่นร้อน โดยมีการศึกษาดังนี้ 1) การศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ก่อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอุ่นร้อน จากนั้นศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการลดลงของปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ ดังนี้ 2) ผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน 3) ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก และ 4) ผลของน้ำเกลือที่เก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ เมื่อได้ค่าปริมาณตะกอนจากการอุ่นร้อน ได้นำมาคำนวณเพื่อประมาณค่าเป็นความหนาของตะกอนที่อาจจะเกิดขึ้นในหม้อเคียวสุญญากาศ หากตั้งสมมติฐานว่ามีการป้อนน้ำเกลือตัวอย่างเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการผลิตเกลือ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นร้อนสำหรับการทดลองนี้เท่ากับ $110^\circ C$ เนื่องจากต้องการให้ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณตะกอนที่จะเกิดขึ้นจริง ซึ่งรายละเอียดของวิธีการทดลองมีดังนี้

2.1.1) การศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในการศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ จะศึกษาการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในตัวทำละลายที่มีค่าความเข้มข้นของไอออนแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวทำละลายที่ศึกษาได้แก่น้ำกลั่น สารละลาย NaCl 22 wt.% น้ำเกลือดิบ น้ำเกลือที่กำจัดไอออนด้วยสภาวะ PC-PH และน้ำเกลือที่กำจัดไอออนด้วยสภาวะ SC-SH โดยวิธีการทดลองมีดังนี้

- (1) วัดค่าไอออน Mg^{2+} เริ่มต้นในน้ำเกลือก่อนทำการทดลอง
 - (2) ชั่ง $Mg(OH)_2$ ปริมาณ 0.08 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 50 mL
- เทใส่ขวดรูปชมพู่ปิดปากขวดด้วยพลาสติกแรปและฝาขวด
- (3) นำขวดรูปชมพู่จุ่มลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้ว (30 - 90°C) พร้อมทั้งเขย่าเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

(4) กรองแยกของแข็งที่ไม่ละลายออกจากตัวทำละลาย

(5) นำตัวทำละลายมาวัดค่าไอออน Mg^{2+} ด้วยวิธีการไทเทรต ดังแสดงในหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 25 mL ต่อน้ำกลั่น 225 mL สำหรับน้ำเกลือดิบและน้ำเกลือกำจัดไอออนแล้ว ส่วนน้ำและสารละลาย NaCl ไม่ต้องเจือจางในน้ำกลั่น

(6) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิและชนิดของตัวทำละลาย

2.1.2) ผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน ในการศึกษาผลของการเติม

สารช่วยเร่งตกตะกอนที่มีต่อการลดลงของปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ มีวิธีการทดลอง ดังนี้

- (1) ตวงน้ำเกลือดิบปริมาตร 1 ลิตร จำนวน 4 ชุด
- (2) ทำการกำจัดไอออนในน้ำเกลือดิบที่เตรียมไว้ทั้ง 4 ชุด โดยการเติมสารเคมีด้วยสภาวะ SC-50%SH

(3) เตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนความเข้มข้น 0.1 0.5 และ 1.0 wt.%

(4) เมื่อกำจัดไอออนด้วยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้ว น้ำเกลือชุดแรกจะตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ชุดที่ 2 3 และ 4 จะตกตะกอนด้วยการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนที่ความเข้มข้น 0.1 0.5 และ 1.0 wt.% ตามลำดับ โดยปริมาณสารช่วยเร่งตกตะกอนที่เติมเท่ากับ 5 mL และการตกตะกอนจะปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(5) แยกน้ำเกลือใสออกจากตะกอน แล้วกรองซ้ำด้วยกระดาษกรองขนาด 11 μm

(6) แบ่งน้ำเกลือปริมาตร 200 mL ใส่ลงในขวดก้นกลม ปิดฝาและนำไปตั้งในเตาหลุม ปรับอุณหภูมิไปที่ระดับ 1.5 (อุณหภูมิประมาณ 110 ± 1 °C) ให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

(7) กรองน้ำเกลือที่ผ่านการอุ่นร้อนด้วยกระดาษกรองขนาด 11 μm และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 mL

(8) นำไปอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

2.1.3) ศึกษาการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่บำบัดแล้วผ่านการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ในการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ที่มีต่อการลดลงของปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ จะใช้น้ำเกลือที่มีระยะเวลาในการตกตะกอนเท่ากับ 1 3 5 และ 7 วัน มาทำการศึกษาโดยมีวิธีการทดลอง ดังนี้

- (1) ตวงน้ำเกลือที่กำจัดไอออนด้วยสภาวะ SC-SH ปริมาตร 150 mL ใส่ในขวดกั้นกลม ปิดฝาและนำไปตั้งในเตาหลุม
- (2) ปรับอุณหภูมิไปที่ระดับ 1.5 (อุณหภูมิประมาณ 110 ± 1 °C) ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที
- (3) จากนั้นกรองแยกด้วยกระดาษกรองขนาด 11 μm และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 mL
- (4) นำไปอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

2.1.4) ผลของน้ำเกลือที่เก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ ในการทดลองนี้จะเป็นการเก็บน้ำเกลือตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือมาอุ่นร้อน เพื่อหาปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ โดยจุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือ ได้แก่ (1) น้ำเกลือจากบ่อผสม/บ่อตกตะกอน (2) น้ำเกลือจากบ่อพักน้ำเกลือใส (3) น้ำเกลือขาออกจากถังกรองและ (4) น้ำเกลือขาออกจากถังอุ่นร้อน (Preheater) โดยรายละเอียดของการทดลอง มีดังนี้

- (1) ตวงน้ำเกลือตัวอย่างปริมาตร 300 mL ใส่ในขวดกั้นกลม ปิดฝาและนำไปตั้งในเตาหลุม ปรับอุณหภูมิไปที่ระดับ 1.5 (อุณหภูมิประมาณ 110 ± 1 °C) จากนั้น ให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 30 นาที
- (2) เมื่อผ่านการอุ่นร้อน ให้กรองแยกด้วยกระดาษกรองขนาด 11 μm และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 mL
- (3) นำไปอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

2.2) ศึกษาผลของการเติมตัวล่อ (Seeding) ที่มีต่อการแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ การเติมตัวล่อ (Seeding) เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวิธีการเติมตัวล่อหรือ Seeding ไปปรับใช้ในการแยกตะกอนตกค้าง พร้อมทั้งลดค่าไอออนเจือปนในน้ำเกลือ ซึ่งการเติมตัวล่อจะทำงานร่วมกับกระบวนการอุ่นร้อน และหากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแนวทางนี้สามารถกำจัดตะกอนและลดค่าปริมาณไอออนเจือปนได้ จะนำแนวทางนี้ไปปรับใช้ในถังอุ่นร้อน ดังนั้นจึงศึกษาผลของอุณหภูมิร่วมด้วย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 60 - 100 °C และสารที่นำมาใช้เป็นตัวล่อคือ

สาร CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ โดยอนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 12.32 และ 77.46 μm ตามลำดับ ซึ่งวัดขนาดของตัวล่อด้วย FBRM method (Mettler Toledo model ParticleTrack E25) โดยตัวล่อแต่ละชนิดจะใช้อย่างละ 50 wt.% ของปริมาณรวม โดยปริมาณรวมของตัวล่อที่ใช้ต่อน้ำเกลือ 100 mL คือ 0.1 และ 0.2 กรัม โดยรายละเอียดของวิธีการทดลองมีดังนี้

(1) เตรียมน้ำเกลือที่กำจัดไอออนด้วยสถานะ PC-PH พร้อมทั้งวัดค่าไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} เริ่มต้น จากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ไว้ขวดละ 250 mL

(2) ตวงน้ำเกลือที่แบ่งไว้มา 100 mL ใส่ลงในชุดเครื่องแก้วทดสอบปฏิกิริยาแบบเจ็คเกต เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิ ติดตั้งเข้ากับอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิแล้ว

(3) อุณหภูมิที่อุณหภูมิกำหนดไว้ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

(4) เติมตัวล่อที่เตรียมไว้ ลงไปในน้ำเกลือทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเริ่มเปิดน้ำเกลือเพื่อหาค่าไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยวิธีการไทเทรตทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 8 ชั่วโมง โดยวิธีการที่อ้างอิงตามวิธีในหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” แต่ใช้สัดส่วนของน้ำเกลือที่ลดลง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 5 mL ต่อน้ำกลั่น 100 mL

3.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันและการป้องกันการเกิดตะกรัน

สำหรับการทดลองนี้ ได้จำลองอุปกรณ์อย่างง่ายขึ้นมาเพื่อจำลองพฤติกรรมการเกิดของตะกรัน โดยลักษณะของอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นท่อรูปตัวยูทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย 1) การศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรัน 2) การศึกษาผลของการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) และ 3) การวิเคราะห์สมบัติของตะกรันที่เกิดขึ้นในชุดจำลอง

1) การศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรัน

ในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันบนพื้นผิวท่อเหล็กกล้าไร้สนิม โดยศึกษาผลของน้ำเกลือที่มีต่อการเกิดตะกรัน ซึ่งน้ำเกลือที่ศึกษาได้แก่ น้ำเกลือดิบ และน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนด้วยสถานะ SC-SH และสถานะ PC-PH ซึ่งมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

(1) ตวงน้ำเกลือปริมาตร 500 mL ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 mL พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.4

(2) เปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath) โดยตั้งอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ 115°C และกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

(3) เริ่มจับเวลา เมื่ออุณหภูมิของอ่างควบคุมเท่ากับค่าที่ตั้งไว้

(4) สังเกตการก่อตัวของตะกรันบนผิวของท่อ จนครบ 12 ชั่วโมง

(5) ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ปล่อยให้ชุดการทดลองเย็นลง จากนั้นนำน้ำเกลือมากรองผ่านกระดาษกรอง 2.5 μm ล้างด้วยน้ำกลั่นและปล่อยให้แห้งในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า สำหรับของแข็งที่กรองแยกได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

(6) นำน้ำเกลือที่ผ่านการกรองมาวัดค่าความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} โดยใช้วิธีตามหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” ซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำเกลือที่ลดลง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 5 mL ต่อน้ำกลั่น 100 mL

(7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ (1) ถึงข้อ (4) โดยใช้ท่อรูปตัวยูซ้ำ จากการทดลองในรอบที่ 1 สำหรับทำซ้ำอีก 4 ครั้ง โดยเปลี่ยนแค่น้ำเกลือชุดใหม่ เมื่อครบ 5 ครั้ง จะทำการฉีดล้างท่อรูปตัวยูและเก็บตัวอย่างของแข็งที่เกาะอยู่บนผิวท่อเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกรันอย่างง่าย

2) การศึกษาผลของการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling)

ในการศึกษาการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) ได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสารป้องกันการเกิดตะกรันและสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ จึงเลือกใช้

กัวร์กัม (Guar gum) ซึ่งเป็นสารที่ผลิตได้จากเมล็ดกัวร์และเป็นสารที่ใช้ในการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับอาหาร จึงนำมาใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรัน ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

(1) ตวงน้ำเกลือปริมาตร 500 mL ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 mL พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.4

(2) ละลายสารกัวร์กัมลงไปใต้น้ำเกลือโดยตรง โดยใช้ปริมาณ 0.05 wt.% ต่อปริมาตรน้ำเกลือ

(3) เปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath) โดยตั้งอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ 115 °C พร้อมกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

(4) เริ่มจับเวลา เมื่ออุณหภูมิของอ่างควบคุมเท่ากับค่าที่ตั้งไว้

(5) สังเกตการก่อตัวของตะกรันบนผิวของท่อ จนครบ 12 ชั่วโมง

(6) ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ปล่อยให้ชุดการทดลองเย็นลง เก็บน้ำเกลือเพื่อนำไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือ ด้วยวิธีตามหัวข้อ “การวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต” ซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำเกลือที่ลดลง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเกลือ 5 mL ต่อน้ำกลั่น 100 mL

(7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ (1) ถึงข้อ (4) โดยใช้ท่อรูปตัวยูซ้ำ จากการทดลองในรอบที่ 1 สำหรับทำซ้ำอีก 4 ครั้ง โดยเปลี่ยนแค่น้ำเกลือชุดใหม่ เมื่อครบ 5 ครั้ง จะทำการฉีดล้างท่อรูปตัวยูและเก็บตัวอย่างของแข็งที่เกาะอยู่บนผิวท่อเพื่อนำไปวิเคราะห์

หมายเหตุ ในการทดลองนี้จะไม่มีการกรองแยกของแข็งออกจากน้ำเกลือ เพราะใช้เวลาในการกรองที่นาน เนื่องจากสารป้องกันการเกิดตะกรันที่เติมลงไป ทำให้น้ำเกลือกรองแยกได้ยากเพราะมีลักษณะเป็นเจล

3) การวิเคราะห์สมบัติของตะกรันที่เกิดขึ้นในชุดจำลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรันในชุดจำลอง พบว่ามีตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวของชุดจำลอง จึงมีการเก็บรวบรวมตะกรันที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค XRD เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนสาเหตุของการเกิดตะกรันที่พบในหม้อไอน้ำของโรงงาน ดังที่ได้วิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อ 3.3.2

3.3.6 การเสนอวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน

ในหัวข้อนี้เป็นการเสนอแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน โดยมีทั้งวิธีที่ได้ทำและไม่ได้ทำการทดสอบ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอมีทั้งหมด 7 แนวทาง ได้แก่ 1) การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน 2) การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน 3) การใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar

ร่วมกับการอุ่นร้อน 4) การปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน 5) การเติมตัวล่อ (Seeding) เพื่อล่อให้เกิดการตกตะกอน 6) การเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) และ 7) การใช้เทคโนโลยีคอลลอยด์-เอ-ตรอน (Colloid-A-tron) โดยรายละเอียดของแต่ละแนวทางที่ศึกษา แสดงในหัวข้อที่ 4.6

3.3.7 การศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า

เนื่องจากการกำจัดไอออนด้วยวิธีทางเคมี จะกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ออกมาในรูปของตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ซึ่งงานวิจัยนี้จะเรียกตะกอนดังกล่าวว่า “กากตะกอน” เมื่อพิจารณากากตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าเป็นสารประกอบที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ จึงได้ศึกษาแนวทางเพื่อนำเอาตะกอนไปใช้ประโยชน์ โดยแนวทางที่น่าสนใจคือ การนำกากตะกอนไปผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากกากตะกอน

(1) นำตะกอนจากบ่อผสม 500 กรัม มาล้างด้วยน้ำกลั่น 1 L จากนั้นกรองเพื่อแยกเอาตะกอน

(2) นำตะกอนไปอบที่ 80°C โดยอบทิ้งไว้ข้ามคืน

(3) นำตะกอนที่อบแล้ว ไปเผาที่อุณหภูมิ 850°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ออกมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(4) นำตะกอนที่อบแล้ว จากข้อ (2) กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ จากข้อ (3) ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ TGA XRD SEM Surface analyzer และ CO_2 -TPD

2) การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยา

(1) ชั่งน้ำมันพืชใช้แล้ว 50 กรัม นำไปอุ่นให้มีอุณหภูมิ 60°C

(2) ชั่งเมทานอล 30 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม นำไปผสมกันในชุดเครื่องแก้วทดสอบปฏิกิริยาแบบมีแจ็กเกต ที่มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60°C พร้อมกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก

(3) เติมน้ำมันพืชที่อุ่นแล้วลงในชุดเครื่องแก้วทดสอบปฏิกิริยาแบบมีแจ็กเกต จากนั้นปล่อยให้ทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง

(4) เมื่อครบ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นและนำมากรองเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นทำการระเหยเมทานอลที่เหลือออกจากของผสมระหว่างกลีเซอรอลกับน้ำมันไบโอดีเซล

(5) เมื่อระเหยเมทานอลแล้ว นำของผสมที่เหลือมาแยก เพื่อแยกกลีเซอรอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซล

(6) ทำการวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ด้วย GC เพื่อหาค่าองค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester, FAME) รวมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลด้วย ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และจุดวาบไฟ

3.3.8 การประเมินราคาของวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน

เมื่อได้ศึกษาแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อเคียวด้วยวิธีต่าง ๆ ไปแล้ว ได้เลือกการป้องกันการเกิดตะกรันด้วยวิธีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} สำหรับนำเสนอให้กับทางโรงงาน พร้อมทั้งทำการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือสำหรับใช้ประกอบในการตัดสินใจของโรงงาน โดยการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือจะสร้างโปรแกรมอย่างง่ายขึ้นมา โดยใช้แผ่นงานคำนวณ (Worksheet) จากโปรแกรม Microsoft excel เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีการติดตั้งอยู่แล้วในคอมพิวเตอร์ทั่วไปและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที โดยขั้นตอนของการประเมินต้นทุน เริ่มต้นจากการวาดแผนผังแสดงภาพรวมของกระบวนการผลิตเกลือ จากนั้นรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเกลือ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเกลือเข้าหม้อเคียว กำลังการผลิตต่อวัน ต้นทุนของสารเคมีและต้นทุนด้านอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเกลือ รวมถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่จะทำการติดตั้งเพิ่มเข้าไปในโรงงาน เช่น เครื่องตกตะกอนและเครื่องรีดตะกอน เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าโปรแกรมที่สร้างขึ้นด้วยผู้ใช้งาน จากนั้นผู้ใช้งานจะเป็นผู้ควบคุมให้โปรแกรมทำการคำนวณ หลังจากผ่านกระบวนการคำนวณ ผลที่ได้จะถูกแสดงออกมาในหน้าต่างแสดงผลที่กำหนดไว้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

จากวัตถุประสงค์ในการป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคียวระบบสุญญากาศนั้น เบื้องต้นจำเป็นต้องทราบถึงสมบัติของน้ำเกลือดิบซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเกลือ โดยได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือ พร้อมทั้งศึกษาตะกรันที่เกิดขึ้นในหม้อเคียวสุญญากาศเพื่อให้ทราบถึงสมบัติของตะกรัน เพื่อป้องกันสาเหตุของการเกิดตะกรัน นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงแนวทางต่าง ๆ ที่จะใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรัน ได้แก่ การเพิ่มปริมาณสารเคมีสำหรับกำจัดไอออนเจือปนและการแยกตะกอนด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้สารช่วยเร่งตกตะกอน การอุ่นร้อน และการเติมตัวล่อ เมื่อได้ศึกษาแนวทางสำหรับป้องกันการเกิดตะกรัน ได้มีการเสนอแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกแนวทางที่เหมาะสมและดำเนินการง่ายเพื่อนำเสนอให้กับทางโรงงาน โดยได้จัดทำการประเมินต้นทุนของการผลิตเกลือเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจของโรงงาน ซึ่งการประเมินต้นทุนของการผลิตเกลือคำนวณด้วยแผ่นงานคำนวณ (Worksheet) ของ Microsoft excel ที่ได้มีการเขียนคำสั่งไว้สำหรับการคำนวณ

4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบ

เพื่อให้ทราบถึงภาพรวมขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในน้ำเกลือดิบ จึงได้ทำการวิเคราะห์น้ำเกลือดิบด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี พบว่าน้ำเกลือดิบประกอบด้วยไอออนโซเดียม (Na^+) ไอออนคลอไรด์ (Cl^-) ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.1 และเมื่อพิจารณาปริมาณของไอออนต่าง ๆ ที่พบในน้ำเกลือ จะเห็นได้ว่าปริมาณของไอออนขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเกลือ นอกจากเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟีแล้ว ได้วิเคราะห์หาไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยวิธีการไทเทรต ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการไทเทรตมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างของทั้งสองวิธีไม่เกินร้อยละ 15 ดังนั้น การวิเคราะห์หาค่าไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการไทเทรตเป็นหลัก เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและวิเคราะห์ผลได้ทันที

ตารางที่ 4.1 ปริมาณ ไอออนองค์ประกอบในน้ำเกลือดิบที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออน-โครมาโทกราฟีและปริมาณไอออนที่พบในน้ำเกลือจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งน้ำเกลือ	ปริมาณไอออนเจือปน (mg/L)				
	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺
น้ำเกลือใต้ดิน (บริษัท สยามทรัพพ์ยัมณี)	162,523.75	102,126.25	3,702.75	1,682.62	2,491.77
น้ำทะเล (Sea water) Culkin (1965) quoted in Hitchon and Holter (1971)	19,353	10,760	2,712	1,294	413
Great salt lake George et al. (1966) quoted in Hitchon and Holter (1971)	166,000	91,000	23,400	12,400	<200
Dead sea (average) Livingstone (1963) quoted in Hitchon and Holter (1971)	208,000	34,940	540	41,960	15,800

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ ไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำเกลือดิบที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรต

ไอออน	ปริมาณไอออน (mg/L)
ไอออนแมกนีเซียม (Mg ²⁺)	1,670.95
ไอออนแคลเซียม (Ca ²⁺)	2,140.99

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำเกลือดิบพบว่า น้ำเกลือดิบประกอบด้วยไอออน Na⁺ และ Cl⁻ เป็นหลักและมีไอออนอื่นเจือปนได้แก่ ไอออน Ca²⁺ ไอออน Mg²⁺ และไอออน SO₄²⁻ โดยไอออนทั้งสามชนิดล้วนเป็นสาเหตุของการเกิดตะกอน โดยตัวอย่างตะกอนที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂)

ดังที่กล่าวไว้โดย Heitmann (1990) ดังนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันในหม้อเคี้ยวสุญญากาศและเพื่อให้ได้เกลือที่มีความบริสุทธิ์ จะต้องมีการควบคุมการกำจัดไอออนเจือปนก่อนป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศ

4.2 ผลการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน

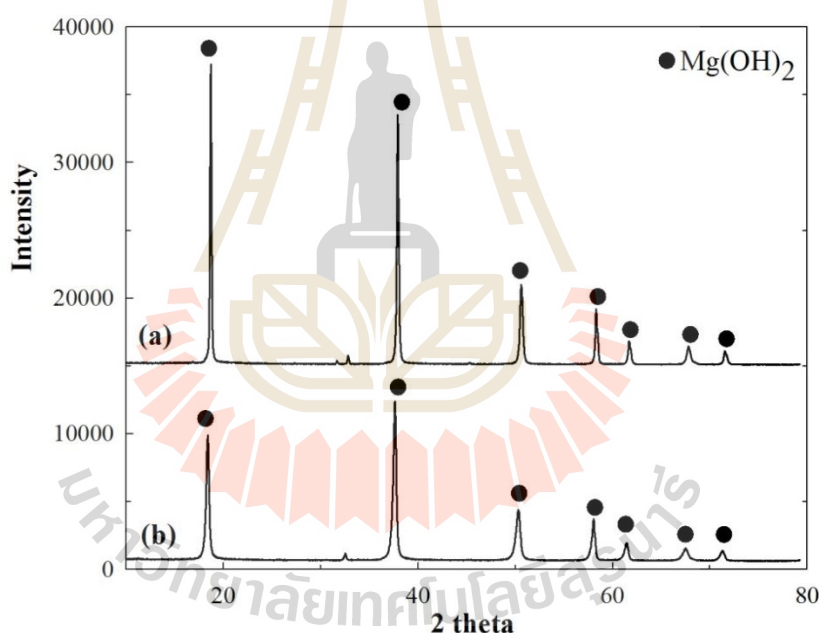
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำเกลือดิบทำให้ทราบถึงสาเหตุเบื้องต้นของการเกิดตะกรัน แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตเกลือจะมีกระบวนการทำบริสุทธิ์เกลือหรือกระบวนการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} อยู่แล้ว ทำให้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำเกลือดิบไม่สามารถบ่งชี้สาเหตุของการเกิดตะกรันที่แท้จริงได้ จึงได้มีการนำตะกรันที่ผ่านการชะล้างออกจากหม้อเคี้ยวสุญญากาศมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของสารในตะกรันด้วยเทคนิค XRD การวิเคราะห์โครงสร้างสารในตะกรันด้วยเทคนิค FTIR การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบในตะกรันด้วยเทคนิค XRF และการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตะกรันด้วยเทคนิค STA โดยลักษณะของตะกรันที่ผ่านการชะล้างออกจากหม้อเคี้ยวสุญญากาศมีลักษณะเป็นแผ่นแข็งสีขาว ซึ่งมีความหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของตะกรันที่เกิดขึ้นในหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ

4.2.1 X-ray diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารในตะกอนที่เกิดขึ้นในหม้อเกลือสุญญากาศ ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มีมุมต่าง ๆ กัน พบว่า โครงสร้างผลึกของตะกอนและโครงสร้างผลึกของ $Mg(OH)_2$ บริสุทธิ์ (เกรดทางการค้า) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD มีลักษณะที่ตรงกันและเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตะกอนกับโครงสร้างผลึกของสารในฐานข้อมูลของเครื่อง XRD ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบในตะกอนคือ $Mg(OH)_2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของตะกอนกับโครงสร้างผลึกของ $Mg(OH)_2$ แบบ Hexagonal ที่สังเคราะห์จากแร่บรูไซต์ (Brucite) ในงานวิจัยของ Pang et al. (2011) ยังมีลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ตรงกับตะกอนอีกด้วย

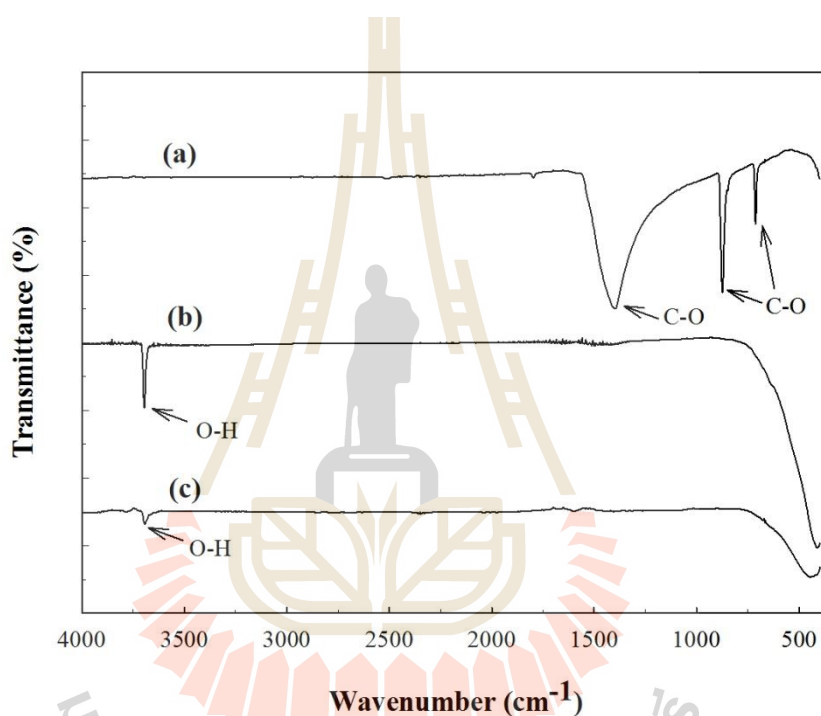


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารใน (a) ตะกอน และ (b) $Mg(OH)_2$ บริสุทธิ์

4.2.2 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบในตะกอนจะอาศัยการวัดค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารเพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาในช่วงเลขคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งผลของการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบสเปกตรัมของตะกอนกับ $Mg(OH)_2$

และ CaCO_3 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมของตะกรันตรงกับสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ บริสุทธิ์ โดยโครงสร้างสารประกอบของตะกรันมีเพียงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) และไม่พบหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) และเมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ตะกรันด้วยเทคนิค FTIR กับสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยของ Pang et al. (2011) พบว่า โครงสร้างสารประกอบของตะกรันกับสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่สังเคราะห์มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ตะกรันด้วยเทคนิค FTIR ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของตะกรันที่พบในหม้อเคี้ยวสุญญากาศคือสารประกอบ $\text{Mg}(\text{OH})_2$

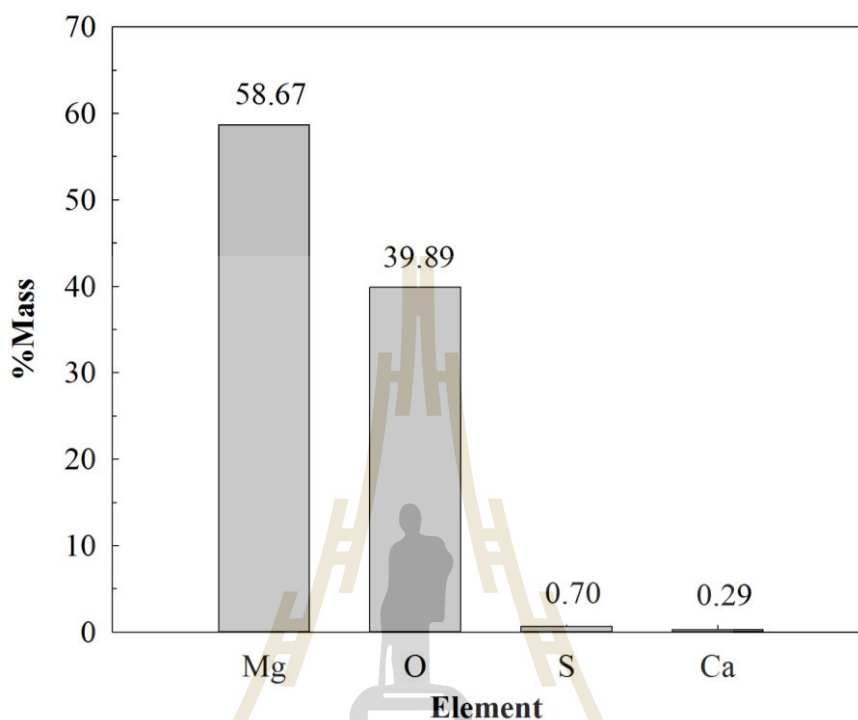


รูปที่ 4.3 โครงสร้างสารประกอบของ (a) CaCO_3 , (b) $\text{Mg}(\text{OH})_2$ และ (c) ตะกรัน

4.2.3 X-ray fluorescence (XRF)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นว่า $\text{Mg}(\text{OH})_2$ เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรัน แต่เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของสารที่เป็นต้นเหตุ จึงวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตะกรันด้วยเทคนิค XRF จากผลการวิเคราะห์พบว่าธาตุหลักในตะกรันคือธาตุแมกนีเซียม (Mg) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 58 โดยมวล และมีธาตุออกซิเจน (O) ร้อยละ 40 โดยมวล ในขณะที่ธาตุแคลเซียม (Ca) มีเพียงร้อยละ 0.3 โดยมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

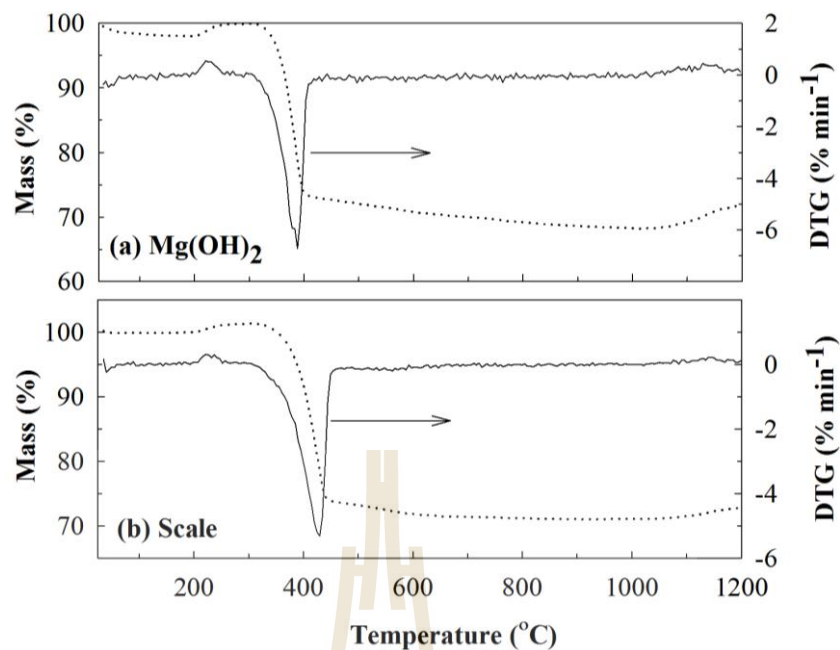
องค์ประกอบในตะกรัน แสดงให้เห็นว่าสาเหตุของการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมคือสารที่มีธาตุ Mg เป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.4 ปริมาณร้อยละของธาตุองค์ประกอบในตะกรันที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

4.2.4 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตะกรัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบและธาตุองค์ประกอบในตะกรัน พบว่าสาเหตุหลักของการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมของกระบวนการผลิตเกลือคือสาร $Mg(OH)_2$ แต่เพื่อเป็นการยืนยันและสนับสนุนผลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จึงวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของตะกรัน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของตะกรันต่ออุณหภูมิและเวลา จากผลการวิเคราะห์พบว่า สาร $Mg(OH)_2$ บริสุทธิ์และตะกรันมีการสลายตัวที่ $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีการสูญหายของมวลไปประมาณ 25 - 30% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งลักษณะการสลายตัวทางความร้อนของตะกรันยังให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการสลายตัวทางความร้อนของสาร $Mg(OH)_2$ ที่รายงานโดย APHANE (2007) และ Yan et al. (2002)



รูปที่ 4.5 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) $\text{Mg}(\text{OH})_2$ บริสุทธิ์ และ (b) ตะกรัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของธาตุของตะกรันด้วยเทคนิคต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าตะกรันมีสาเหตุมาจาก $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งที่มาจาก $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ได้แก่ ไอออน Mg^{2+} และตะกอน $\text{Mg}(\text{OH})_2$ โดยไอออน Mg^{2+} สามารถเปลี่ยนไปเป็นสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ได้ เมื่ออุณหภูมิและค่า pH ของน้ำเกลือมีค่าสูงขึ้น (Heitmann, 1990) ส่วนตะกอน $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่เป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการเกิดตะกรันนั้น เกิดจากกระบวนการกำจัดไอออนเจือปนด้วยสารเคมี ที่กำจัดไอออน Mg^{2+} ออกมาในรูปของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งมีสมบัติในการตกตะกอนที่ช้า จึงอาจเกิดการตกค้างอยู่ในน้ำเกลือที่จะป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำสุญญากาศ จากสมมติฐานของการเกิดตะกรันเนื่องจากไอออน Mg^{2+} และตะกอน $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จึงนำมาสู่การศึกษาแนวทางการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือดิบ และการแยกตะกอนตกค้างเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำสุญญากาศ

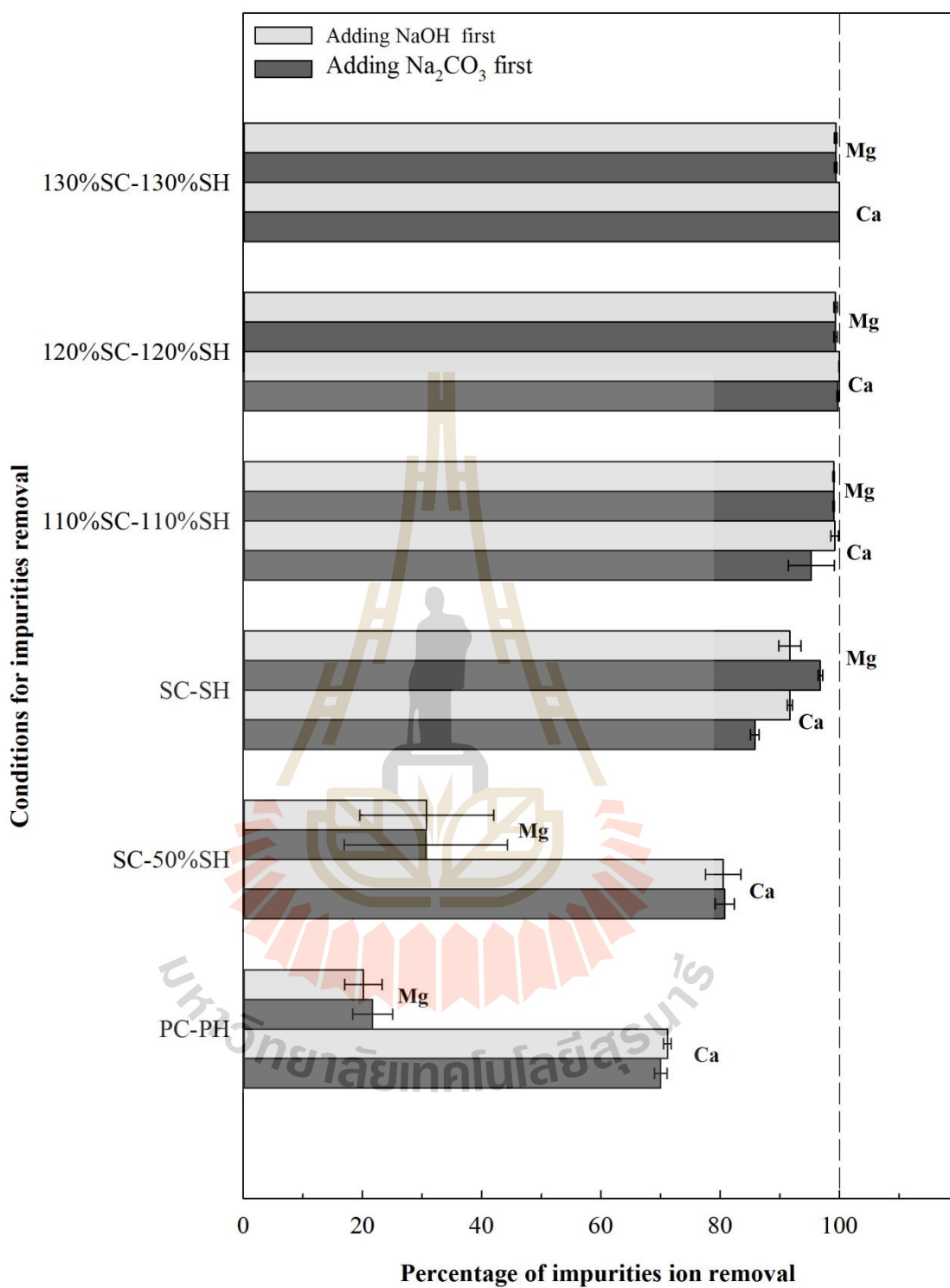
4.3 ผลการศึกษาวิธีการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบพบว่า มีไอออน Ca^{2+} Mg^{2+} และ SO_4^{2-} เป็นไอออนเจือปน ซึ่งไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะถูกกำจัดออกจากน้ำเกลือในรูปของแข็งด้วยวิธีการเติมสารเคมี ส่วนซัลเฟต SO_4^{2-} จะถูกกำจัดออกมาในรูปของสารละลายที่เรียกว่า “น้ำขม” หรือ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยจะถูกปล่อยทิ้งหลังจากที่แยกเกลือออกจากน้ำเกลือด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง สำหรับการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ จะทำให้ได้เกลือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและลด

ปัญหาการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศได้ โดยตัวแปรที่จะศึกษาในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีที่ใช้และลำดับในการเติมสารเคมี นอกจากนี้ มีการศึกษาผลกระทบของ CO_2 ที่มีต่อการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ โดยมีผลจากการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณและลำดับการเติมสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเกลือ

จากการศึกษาปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสภาวะดังแสดงในตาราง 3.2 พบว่า เมื่อกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสภาวะ PC-PH จะกำจัดไอออน Ca^{2+} ได้ประมาณร้อยละ 70 และกำจัดไอออน Mg^{2+} ได้เพียงร้อยละ 20 และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีตามสภาวะ SC-50%SH พบว่าสามารถกำจัดไอออน Ca^{2+} ได้ถึงร้อยละ 80 แต่กำจัดไอออน Mg^{2+} ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 - 40 เท่านั้น แต่เมื่อมีการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสภาวะ SC-SH พบว่า การเพิ่มปริมาณสารเคมีให้เท่ากับปริมาณไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} สามารถกำจัดไอออนทั้งสองได้มากกว่าร้อยละ 80 และหากเพิ่มปริมาณสารเคมีให้มากเกินไปจะสามารถกำจัดไอออนเจือปนทั้งสองได้เกือบทั้งหมด ดังผลที่แสดงในรูปที่ 4.6 การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออนเปรียบเสมือนการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Na_2CO_3 และ NaOH) ให้เข้าทำปฏิกิริยากับไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่อยู่ในน้ำเกลือดิบ ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสาร Na_2CO_3 และ NaOH เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และทำให้สารผลิตภัณฑ์ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ในน้ำเกลืออยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดมากขึ้น จึงส่งผลให้การตกตะกอนของ CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ มากขึ้น และไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือมีค่าลดลง



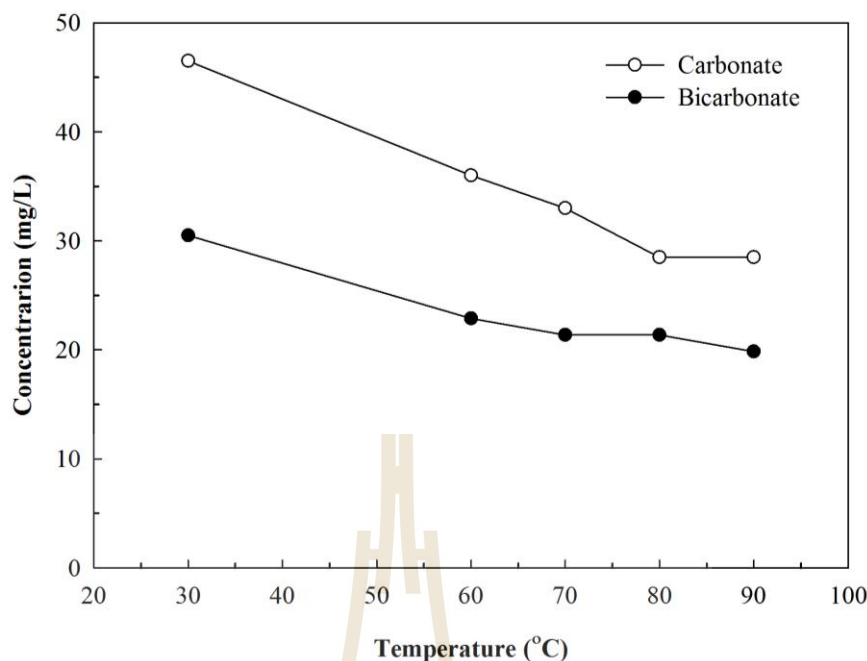
รูปที่ 4.6 ร้อยละของการกำจัดไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน

สำหรับการศึกษาผลของลำดับการเติมสารเคมีที่มีต่อการกำจัดไอออนเจือปน พบว่า ภาพรวมของลำดับการเติมสารเคมีแทบจะไม่มีผลต่อการกำจัดไอออน แต่การกำจัดไอออนด้วย สภาวะ SC-SH และ 110%SC-110%SH ที่ทำการเติมสาร NaOH ก่อนสาร Na_2CO_3 (Adding NaOH first) สามารถกำจัดไอออน Ca^{2+} ได้มากกว่าการเติมสาร Na_2CO_3 ก่อน NaOH (Adding Na_2CO_3 first) อาจเนื่องมาจากสาร NaOH ไม่เพียงแต่เข้าไปจับกับไอออน Mg^{2+} เท่านั้น แต่ยังทำให้น้ำเกลือมี ค่า pH เพิ่มขึ้นจนมีค่า pH เท่ากับ 8 ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ CaCO_3 อิ่มตัวยิ่งยวด จึงส่งผลให้ CaCO_3 เกิดการตกตะกอนได้มากขึ้น (Irving, 1926) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเติมสาร NaOH ก่อน จะ กำจัดไอออน Ca^{2+} ได้มากขึ้นเมื่อกำจัดไอออนด้วยสภาวะ SC-SH และ 110%SC-110%SH แต่มี งานวิจัยที่รายงานโดย Moritz (1980) ได้กล่าวว่า การเติมสาร NaOH ลงไปในน้ำเกลือก่อนนั้น จะ ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเบาและเหนียวทำให้กรองแยกได้ยาก แต่การเติมสาร Na_2CO_3 ก่อนจะทำให้ตะกอนจับตัวกันได้ดีและตกตะกอนได้ง่าย

จากการศึกษาผลของปริมาณและลำดับการเติมสารเคมี แสดงให้เห็นว่าการกำจัด ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสภาวะ SC-SH สามารถกำจัดไอออนทั้งสองได้มากกว่าร้อยละ 80 และ หากใช้สภาวะ 110%SC-110%SH หรือใช้สารมากกว่าสัดส่วนของไอออนประมาณร้อยละ 10 จะสามารถกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้เกือบร้อยละ 100 โดยลำดับการเติมสารที่เหมาะสมคือ การเติมสาร Na_2CO_3 ก่อนสาร NaOH (Adding Na_2CO_3 first) เนื่องจากส่งผลดีต่อการตกตะกอน และการกรองแยก

4.3.2 ผลกระทบของ CO_2 ที่มีต่อการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำสูญญากาศ

จากงานวิจัยของ Al-Rawajfeh et al. (2005) ได้สรุปผลการศึกษาผลของก๊าซ CO_2 ที่มี ต่อการเกิดตะกอนว่า การสูญเสียก๊าซ CO_2 จากการระเหย มีบทบาทต่อการเกิดตะกอน เนื่องจากการ สูญเสียก๊าซ CO_2 จะทำให้น้ำเกลือมีค่า pH สูงขึ้นจนทำให้ CaCO_3 อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดและ ตกตะกอนออกมา ดังนั้น จึงทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการสูญเสียก๊าซ CO_2 จากการ ทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำเกลือสูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียก๊าซ CO_2 ทำให้สมดุลคาร์บอเนตมีการ เปลี่ยนแปลง ดังผลที่แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งการสูญเสียก๊าซ CO_2 ได้ชักนำให้ไอออน HCO_3^- เปลี่ยนเป็นไอออน CO_3^{2-} มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของไอออน CO_3^{2-} ในน้ำเกลือมีปริมาณมากกว่า HCO_3^- ซึ่งปริมาณของไอออน CO_3^{2-} ที่มีค่าสูงกว่าไอออน HCO_3^- แสดงให้เห็นถึงโอกาสของการ เกิดตะกอนเมื่อน้ำเกลือมีการสูญเสียก๊าซ CO_2 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของไอออนคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในน้ำเกลือที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

สืบเนื่องจากการสูญเสียก๊าซ CO_2 ทำให้โอกาสของการเกิดตะกอนสูงขึ้น จึงได้ศึกษาผลของการเติมก๊าซ CO_2 ลงไปในน้ำเกลือเพื่อลดโอกาสของการเกิดตะกอน ซึ่งอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 30°C ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมก๊าซ CO_2 ลงไปในน้ำเกลือดิบจะทำให้ค่า pH ของน้ำเกลือดิบลดลง (ตารางที่ 4.3) โดยค่า pH ที่วัดได้ต่ำกว่าค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (pH 8) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (pH 10) (Irving, 1926) นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไอออน CO_3^{2-} และ HCO_3^- พบว่า น้ำเกลือดิบที่ผ่านการเติมก๊าซ CO_2 ในงานวิจัยนี้ไม่มีไอออน CO_3^{2-} มีเพียงไอออน HCO_3^- ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมก๊าซ CO_2 ลงในน้ำเกลือจะช่วยลดโอกาสของการเกิดตะกอนได้ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการเติม CO_2 จะช่วยลดโอกาสของการเกิดตะกอนได้ แต่การนำไปประยุกต์ใช้จริงอาจมีความซับซ้อน เนื่องจากจะต้องใช้ CO_2 ในปริมาณที่มากและจะต้องเติมก๊าซ CO_2 ลงในถังที่ควบคุมความดันได้ อีกทั้งการใช้ก๊าซ CO_2 จะทำให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น เพราะจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการซื้อก๊าซ CO_2 และซื้อถังที่ควบคุมความดันได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในน้ำเกลือดิบหลังเติมก๊าซ CO₂

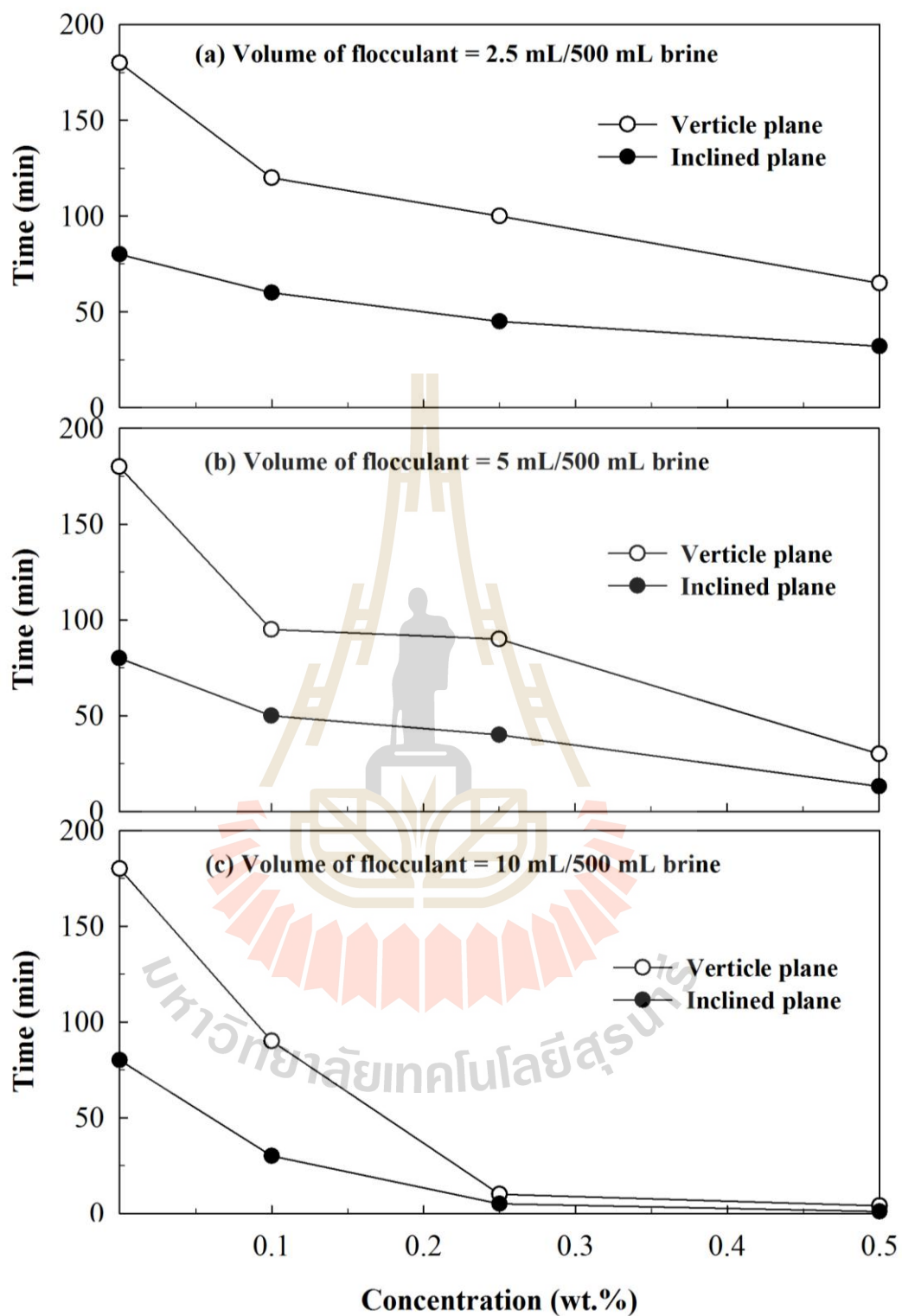
น้ำเกลือ (ปริมาณ CO ₂)	ค่า pH	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
น้ำเกลือดิบ	5.75	0.00	36.61
น้ำเกลือดิบ (150 cc)	4.31	0.00	48.82
น้ำเกลือดิบ (300 cc)	4.09	0.00	61.02

4.4 ผลการศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

จากการกำจัดไอออน Ca²⁺ และ Mg²⁺ ในน้ำเกลือดิบด้วยวิธีการเติมสารเคมี พบว่าไอออน Ca²⁺ และ Mg²⁺ จะตกตะกอนออกมาในรูปของ CaCO₃ และ Mg(OH)₂ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ตะกอนเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเกลือด้วยวิธีการตกตะกอนภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เนื่องจากวิธีการตกตะกอนจะใช้เวลาค่อนข้างนาน ซึ่งอาจใช้เวลานานถึง 24 ชั่วโมง จึงได้ศึกษาผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียงที่มีต่อการตกตะกอน นอกจากนี้มีการศึกษาวิธีการแยกตะกอนขนาดเล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือด้วยวิธีการอุ่นร้อนและการเติมตัวล่อ ซึ่งผลของการศึกษาในหัวข้อนี้มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ผลการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียง

การแยกตะกอนโดยใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนเป็นวิธีการที่ช่วยลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้ เนื่องจากสารช่วยเร่งตกตะกอนที่เติมลงไปจะรวมตะกอนขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตะกอนตกได้เร็วขึ้น จากการศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเร่งตกตะกอนที่ใช้และผลของการตกตะกอนในท่อเอียงที่อุณหภูมิ 30 °C (รูปที่ 4.8) พบว่า เมื่อใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนปริมาตร 2.5 mL โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยเร่งตกตะกอนจาก 0.1 - 0.5 wt.% จะสามารถลดระยะเวลาในการตกตะกอนจาก 170 นาที เหลือเพียง 60 นาที และเมื่อมีการเพิ่มปริมาตรของสารช่วยเร่งตกตะกอนจาก 2.5 - 10 mL จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้น 0.1 wt.% ระยะเวลาในการตกตะกอนไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.25 - 0.5 wt.% ระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนจะลดลง



รูปที่ 4.8 ผลการใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนที่มีต่อการลดระยะเวลาในการตกตะกอน

จากการศึกษาสรุปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นและปริมาณของสารช่วยเร่งตกตะกอน จะทำให้ระยะเวลาในการตกตะกอนลดลง เนื่องจากความเข้มข้นและปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ โอกาสในการจับตะกอนมีเพิ่มขึ้น ทำให้ตะกอนรวมตัวกันและตกตะกอนได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การใช้ สารช่วยเร่งตกตะกอนจะช่วยลดระยะเวลาในการตกตะกอนแล้ว การตกตะกอนในท่อเอียงยังสามารถลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้ เนื่องจากการตกตะกอนในท่อเอียงจะมีแรงต้านของของเหลว น้อย และมีระยะทางในการตกตะกอนลงสู่ผิวของท่อเอียงสั้นกว่าท่อตรง เมื่อตะกอน สะสมที่ผิวของท่อเอียงเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ตะกอนตกลงได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ การใช้สารช่วยเร่ง ตกตะกอนร่วมกับการตกตะกอนในท่อเอียง จะลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้มากยิ่งขึ้น

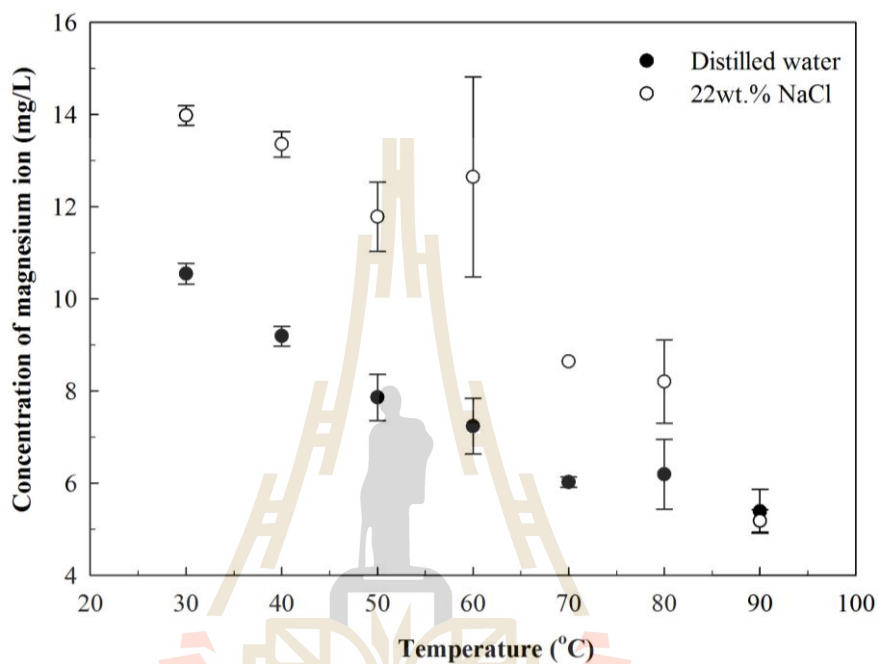
4.4.2 ผลของการอุ่นร้อนน้ำเกลือต่อการแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ

สำหรับการแยกตะกอนขนาดเล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือด้วยวิธีการอุ่นร้อน มีสมมติฐานของการทดลองคือ สารต้นเหตุของการเกิดตะกอนจะแยกตัวออกมาในรูปของแข็งเมื่อน้ำเกลือมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากสมมติฐาน ได้ศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำ กลั่น น้ำเกลือสังเคราะห์ (22 wt.% NaCl) และน้ำเกลือที่มีไอออน Mg^{2+} ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ $Mg(OH)_2$ ในตัวทำละลายเมื่อมีการอุ่นร้อน และหาอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับนำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน โดยอุณหภูมิที่ศึกษาความสามารถในการละลายอยู่ในช่วง 30 - 90 °C เมื่อได้ข้อมูลจากการศึกษาความสามารถในการละลาย จึงทำการศึกษาการอุ่นร้อน น้ำเกลือ เพื่อดูผลกระทบของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน และผลของน้ำเกลือที่สุ่มเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานที่มีต่อการลดปริมาณตะกอน ตกค้างในน้ำเกลือ ซึ่งมีผลจากการทดลองดังนี้

1) ผลการศึกษาความสามารถในการละลายของสารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

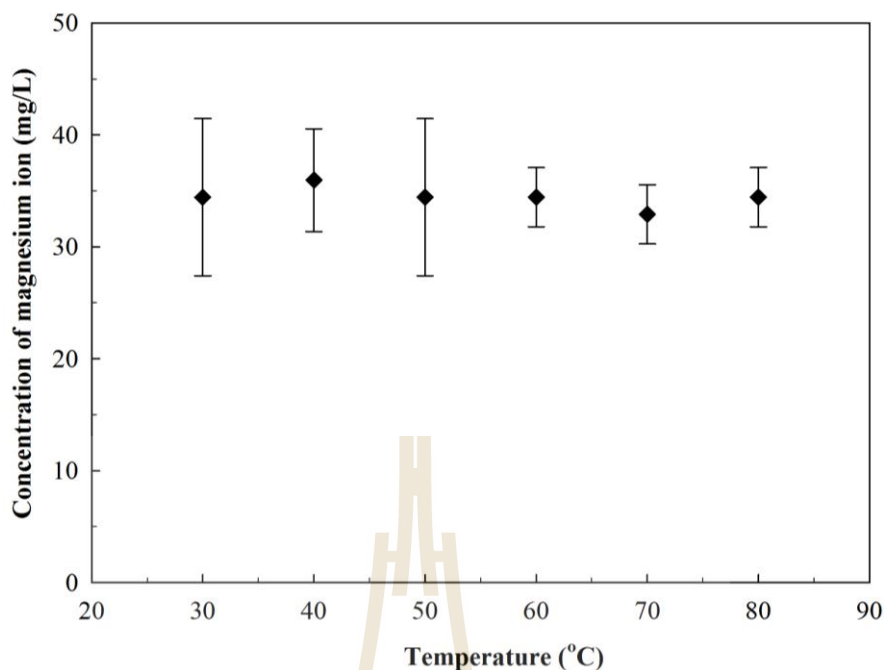
จากผลการวิเคราะห์สมบัติของตะกอนทำให้ทราบว่าสาเหตุของการเกิดตะกอน คือ $Mg(OH)_2$ จึงนำมาสู่การศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ ที่มีค่าความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของการศึกษา ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือสังเคราะห์ (22 wt.% NaCl) ซึ่ง สาเหตุที่ใช้ความเข้มข้นของน้ำเกลือนี้ เนื่องจากต้องการให้มีความเข้มข้นของ NaCl ใกล้เคียงกับ น้ำเกลือที่ใช้ในกระบวนการผลิตของบริษัท สยามทรีพีมณี จากผลการทดลองพบว่า $Mg(OH)_2$ สามารถละลายได้ในน้ำเกลือสังเคราะห์ได้ดีกว่าในน้ำกลั่น เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างไอออน Na^+ และ Cl^- กับ $Mg(OH)_2$ มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับ $Mg(OH)_2$ (Willey, 2004) และการเติมเกลือชนิดอื่นที่ไม่มีไอออนชนิดเดียวกับตัวทำละลาย ลงไปในน้ำเกลือจะทำให้ ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเสมอ (Karkins, 1911)

และเมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ พบว่า ค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวทำละลายสูงขึ้น เพราะ $Mg(OH)_2$ มีสมบัติเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายได้ที่น้อยลงเมื่ออุณหภูมิของตัวทำละลายสูงขึ้น หรือเรียกว่า Inverse solubility



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือสังเคราะห์

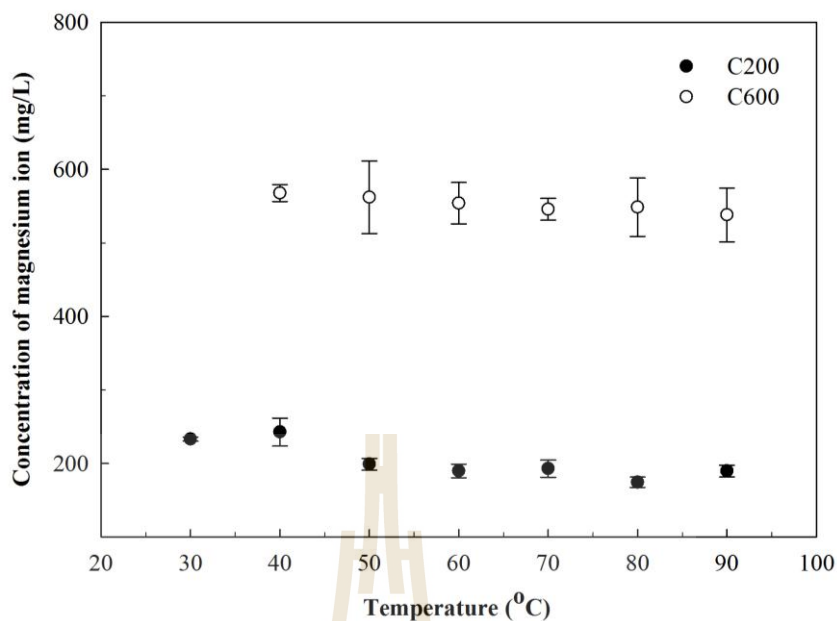
นอกจากนี้ ได้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ที่มีต่อความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือ โดยความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือที่ศึกษา ได้แก่ $Mg^{2+} = 43.59 \text{ mg/L}$ (รูปที่ 4.10) $Mg^{2+} = 239.15 \text{ mg/L}$ (C200) และ 596.7 mg/L (C600) (รูปที่ 4.11) และ $Mg^{2+} = 1,440 \text{ mg/L}$ และ $1,666.7 \text{ mg/L}$ (รูปที่ 4.12)



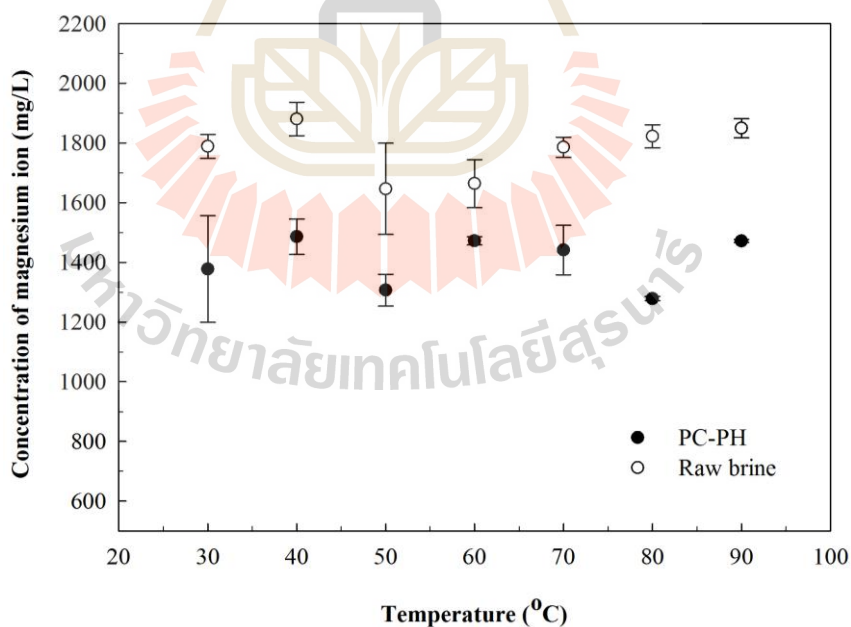
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือ
ที่มีไอออน Mg^{2+} เท่ากับ 43.59 mg/L

จากรูปที่ 4.10 พบว่า อุณหภูมิของน้ำเกลือไม่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือ และเมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} สูงขึ้น (รูปที่ 4.11 และ 4.12) พบว่าแนวโน้มของค่าการละลายได้ของ $Mg(OH)_2$ ก็ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่จะมีการแกว่งของค่าความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นของไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือ

จากผลการศึกษาความสามารถในการละลายแสดงให้เห็นว่า สาร $Mg(OH)_2$ จะมีสมบัติเป็นสารที่ละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือ Inverse solubility ซึ่งสมบัตินี้เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ ในขณะที่ผลจากการศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่มีค่าไอออน Mg^{2+} สูงขึ้น พบว่าค่าไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากผลกระทบของไอออน Mg^{2+} ที่มีอยู่ในน้ำเกลือ (Effect of common ion)



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้วมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Mg^{2+} เท่ากับ 239.15 mg/L (C200) และ 596.7 mg/L (C600)



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้วด้วยสภาวะ PC-PH และน้ำเกลือดิบ (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Mg^{2+} เท่ากับ 1,440 และ 1,666.7 mg/L ตามลำดับ)

นอกจากการทดลองเพื่อหาค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำกลั่น น้ำเกลือสังเคราะห์ (22 wt.% NaCl) และน้ำเกลือที่มีค่าความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} ที่แตกต่างกัน แล้ว ในงานวิจัยนี้ ยังมีการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ซึ่งน้ำเกลือมีค่าความเข้มข้นของไอออน Mg^{2+} เท่ากับ 239.15 mg/L โดยศึกษา ในช่วงอุณหภูมิ 305.15 - 353.15 K (32-80 °C) ด้วยสมการ โพลีโนเมียลโดยใช้สมมติฐานของ Zhange et al. (2011) และสมการของ van't Hoff (Prapasawat et al., 2014) ดังสมการ (4-1) และ (4-2) ตามลำดับ

$$\text{สมการ โพลีโนเมียล} \quad X_1 = A + BT + CT^2 \quad (4-1)$$

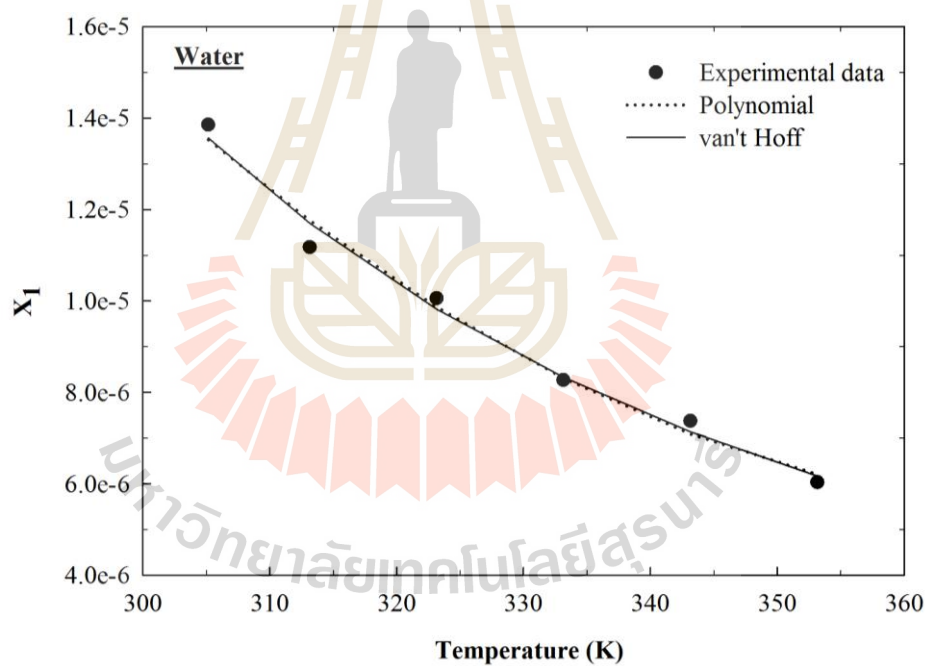
$$\text{สมการของ van't Hoff} \quad \ln X_1 = A + \frac{B}{T} \quad (4-2)$$

โดยที่ X_1 คือ สัดส่วน โมลของ $Mg(OH)_2$ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสารละลาย
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 A, B, C คือ พารามิเตอร์ของสมการ

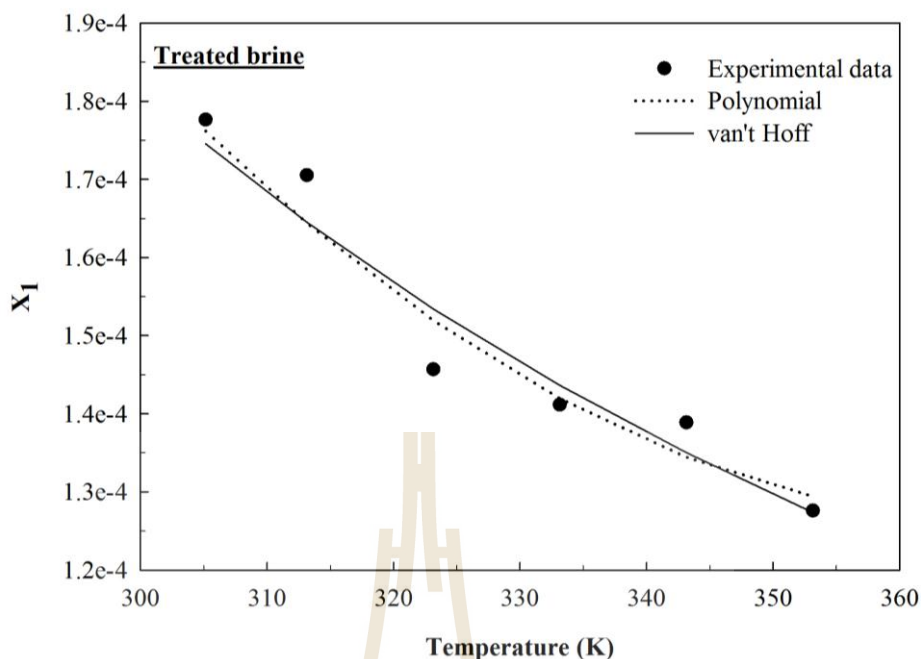
จากการคำนวณ จะได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการ โพลีโนเมียลและสมการ van't Hoff ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดลอง เมื่อนำมาคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ พบว่า ผลจากการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ซึ่งสมการ โพลีโนเมียลและสมการ van't Hoff สามารถอธิบายความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำได้แม่นยำกว่า ดังจะเห็นได้จากค่า R^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.98 แต่หากต้องการเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือที่มีไอออน Mg^{2+} จะต้องมีการคำนวณด้วยสมการที่มีพารามิเตอร์สำหรับผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างไอออนต่าง ๆ รวมถึงความเข้มข้นของไอออนรวม (Ionic strength) ในน้ำเกลือด้วย

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์จากสมการ โพลีโนเมียลและสมการ van't Hoff

สมการแบบจำลอง	พารามิเตอร์	ตัวทำละลาย	
		น้ำกลั่น	น้ำเกลือกำจัดไอออนแล้ว
สมการ โพลีโนเมียล	A	2.43×10^{-4}	1.81×10^{-3}
	B	-1.27×10^{-6}	-9.14×10^{-6}
	C	1.69×10^{-9}	1.24×10^{-8}
	R ²	0.9848	0.9459
สมการ van't Hoff	A	-17.01	-10.97
	B	1,769.6	707.55
	R ²	0.9991	0.9386



รูปที่ 4.13 สัดส่วน โมลของ $Mg(OH)_2$ ที่ละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.14 สัดส่วนโมลของ $Mg(OH)_2$ ที่ละลายได้ในน้ำเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ สามารถคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการละลาย (Enthalpy change of dissolution, ΔH°_{Diss}) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงค่าความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการละลายของ $Mg(OH)_2$ โดยค่า ΔH°_{Diss} สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ van't Hoff ดังสมการที่ (4-3) ดังปรากฏในงานวิจัยของ Prapasawat et al. (2014) และ Zhi et al. (2013)

$$\Delta H^\circ_{Diss} = -R \left(\frac{\partial \ln X_1}{\partial (1/T)} \right) \quad (4-3)$$

โดยที่ X_1 คือ สัดส่วนโมลของ $Mg(OH)_2$ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสารละลาย

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

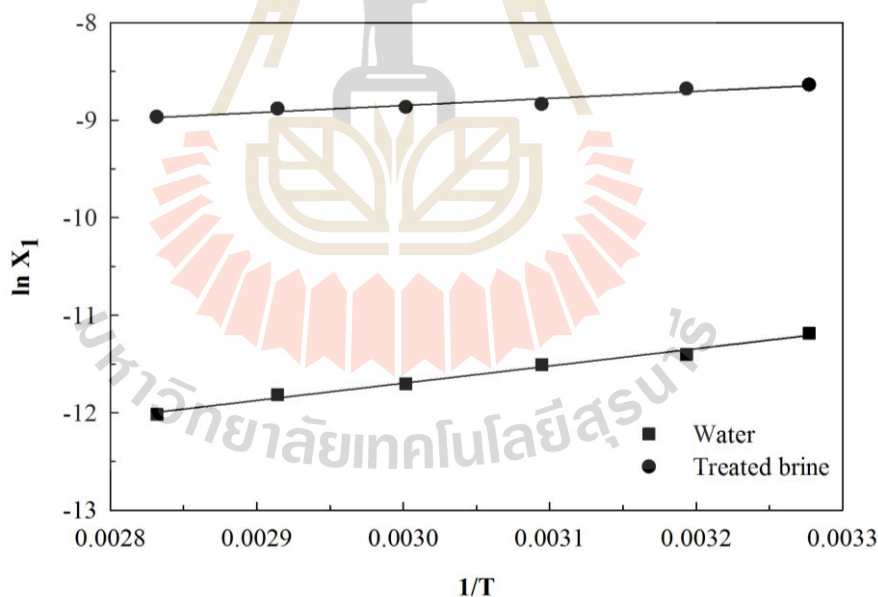
$R = 8.314 \text{ J/mol K}$

เมื่อคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการละลาย ($\Delta H^\circ_{\text{Diss}}$) แล้ว สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการละลายได้ ($\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$) จากสมการที่ (4-4)

$$\ln X_1 = - \frac{\Delta H^\circ_{\text{Diss}}}{RT} + \frac{\Delta S^\circ_{\text{Diss}}}{R} \quad (4-4)$$

โดยค่า $\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$ สามารถคำนวณได้จากจุดตัดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln X_1$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และเมื่อทราบค่า $\Delta H^\circ_{\text{Diss}}$ และ $\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย ที่คำนวณในช่วงอุณหภูมิ 305.15 ถึง 353.15 K จะสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ ($\Delta G^\circ_{\text{Diss}}$) ได้ ด้วยสมการที่ (4-5) โดยที่ $T_{\text{mean}} = 329.15 \text{ K}$

$$\Delta G^\circ_{\text{Diss}} = \Delta H^\circ_{\text{Diss}} - \Delta S^\circ_{\text{Diss}} \cdot T_{\text{mean}} \quad (4-5)$$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln X_1$ และ $1/T$ จากสมการของ van't Hoff จากการละลายของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือที่มี Mg^{2+} เท่ากับ 239.15 mg/L

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ประกอบด้วยค่า $\Delta H^\circ_{\text{Diss}}$, $\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$ และ $\Delta G^\circ_{\text{Diss}}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการ

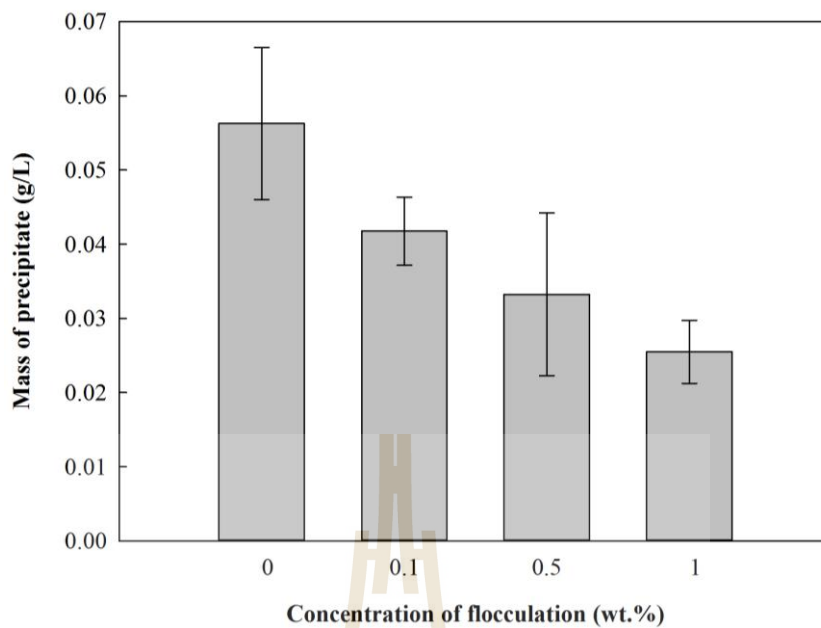
ละลาย $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ในน้ำและน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ($\Delta H^\circ_{\text{Diss}}$) มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงกระบวนการละลายที่เกิดขึ้นมีการคายความร้อนออกมา ส่วนค่าพลังงานอิสระกิบส์ ($\Delta G^\circ_{\text{Diss}}$) ที่มีค่าเป็นบวกแสดงถึงกระบวนการละลายของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ไม่สามารถที่จะละลายได้ ส่วนค่า $\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$ ที่มีค่าเป็นลบหมายถึง $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ในสารละลายส่งผลต่อความเป็นระเบียบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการจัดเรียงตัวของไอออนต่าง ๆ และ โมเลกุลของน้ำ มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการละลาย $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 329.15 K

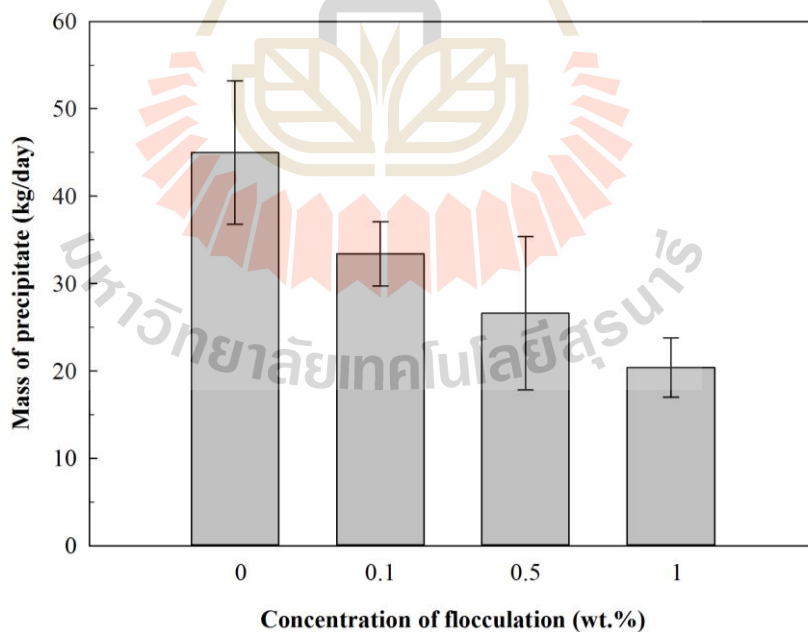
พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์	ตัวทำละลาย	
	น้ำกลั่น	น้ำเกลือ
$\Delta H^\circ_{\text{Diss}}$ (J/mol)	-14,712.45	-5,882.57
$\Delta S^\circ_{\text{Diss}}$ (J/mol K)	-141.39	-91.22
$\Delta G^\circ_{\text{Diss}}$ (J/mol)	31,828.10	24,142.89

อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ด้วยสมการโพลีโนเมียลและสมการของ van't Hoff ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อดูแนวโน้มของความสามารถในการละลาย ดังนั้น หากต้องการนำข้อมูลในส่วนนี้ไปใช้ในการอ้างอิง ควรมีการทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

2) ผลของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน จากการนำน้ำเกลือที่ผ่านการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกและการใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันมาอุ่นร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยเร่งตกตะกอน ทำให้ปริมาณตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือมีปริมาณลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เนื่องจากสารช่วยเร่งตกตะกอนจะช่วยให้การรวมตะกอนขนาดเล็กจึงทำให้มีตะกอนตกค้างในน้ำเกลือน้อยลง และเมื่อมีการคาดคะเนถึงปริมาณตะกอนที่จะเกิดในหม้อเคียวจากปริมาณของแข็งที่กรองแยกได้หลังจากอุ่นร้อน พบว่าหากป้อนน้ำเกลือที่ตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงเข้าหม้อเคียวด้วยปริมาตร 800 m³/day โดยไม่ผ่านการอุ่นร้อนและการกรองแยกก่อน จะมีตะกอนที่ได้เกิดขึ้นในหม้อเคียวสุญญากาศมากกว่า 40 kg/day ดังแสดงในรูปที่ 4.17

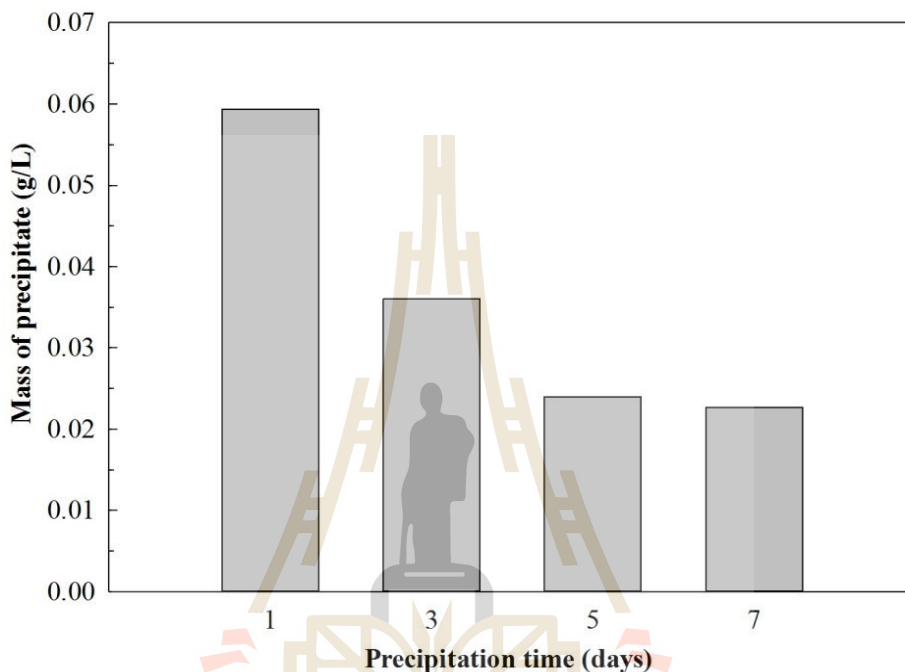


รูปที่ 4.16 ปริมาณตะกอนจากการอุ่นน้ำเกลือที่ใช้สารช่วยเร่งตกตะกอน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 ปริมาณตะกอนที่ได้คาดว่าจะเกิดขึ้นในหม้อเคี้ยวเมื่อใช้น้ำเกลือที่มีสถานะเดียวกัน การทดลองในห้องปฏิบัติการป้อนเข้าหม้อเคี้ยวด้วยอัตรา 800 m³/day

3) ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงที่มีต่อการลดปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนมากขึ้น ปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือที่กรองแยกได้จากการอุ่นร้อนจะมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.18

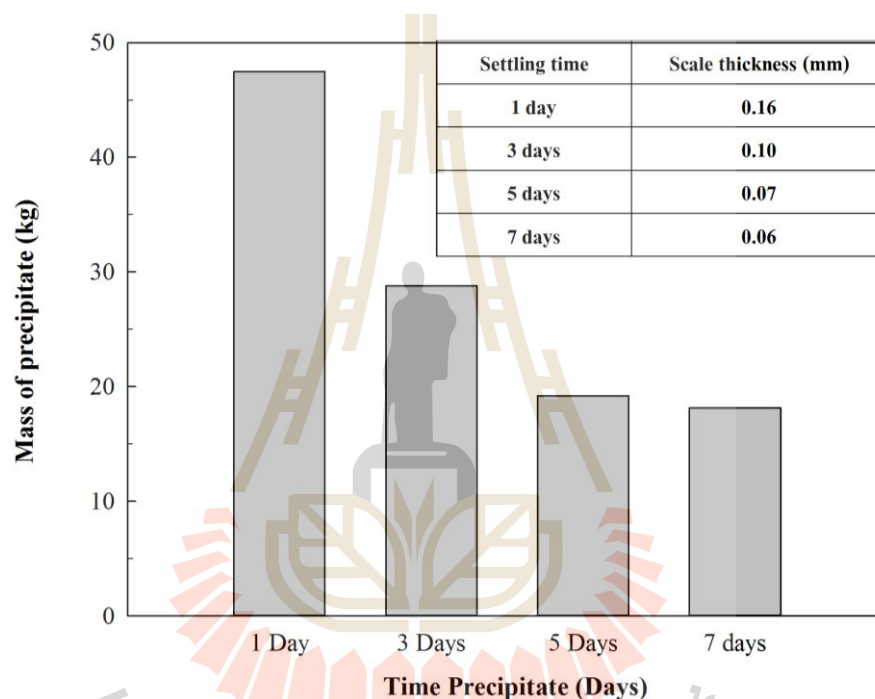


รูปที่ 4.18 ปริมาณตะกอนที่ได้จากการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่ผ่านการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

ซึ่งจากปริมาณตะกอนที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อคำนวณและเทียบเป็นตะกอนที่จะสะสมในหม้อเคียวสุญญากาศ พบว่าหากป้อนน้ำเกลือที่ผ่านการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงด้วยระยะเวลาเพียง 1 วัน เข้าสู่หม้อเคียวด้วยปริมาตร $800 \text{ m}^3/\text{day}$ จะมีปริมาณตะกอนประมาณ 48 กิโลกรัม นอกจากนี้ ได้ทำการประมาณความหนาของตะกอนที่จะเกิดขึ้นในหม้อเคียวสุญญากาศจากค่าปริมาณตะกอน โดยตั้งสมมติฐานให้ปริมาณตะกอนทั้งหมดก่อตัวเป็นตะกอนซึ่งพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดในหม้อเคียวสุญญากาศกำหนดให้เท่ากับ 124.4 m^2 และความหนาแน่นของตะกอนเท่ากับ $2,344.6 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีปริมาณตะกอนและความหนาของตะกอนที่คาดคะเนว่าจะเกิดในหม้อเคียวแสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 โดยความหนาของตะกอนที่จะเกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-6)

$$\text{Scale thickness (mm)} = \frac{M_{\text{precipitate}}}{\rho_{\text{scale}} \times S_{\text{evaporator}}} \times 1000 \quad (4-6)$$

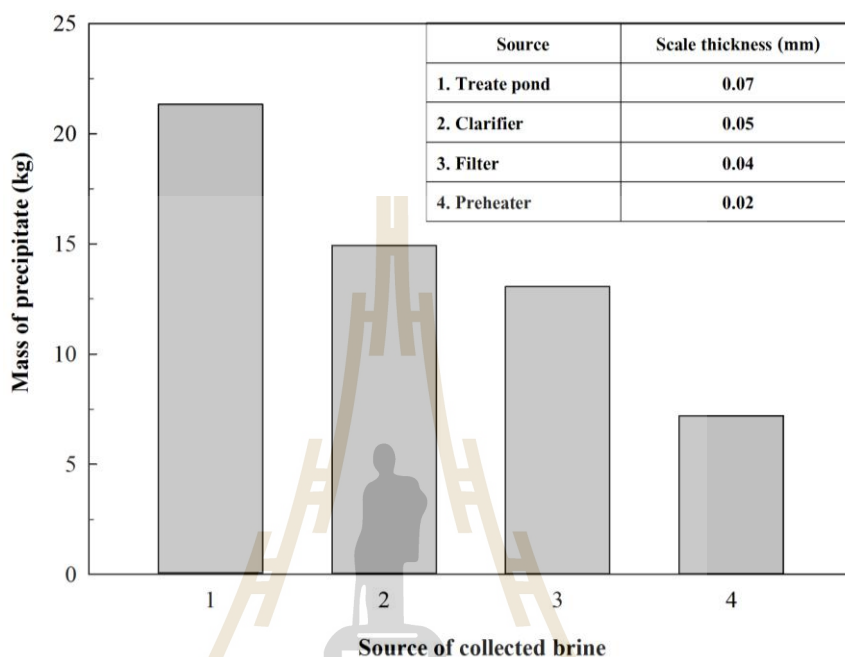
โดยที่ $M_{\text{precipitate}}$ คือ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นใน 1 วัน (kg)
 ρ_{scale} คือ ความหนาแน่นของตะกอน (kg/m^3)
 $S_{\text{evaporator}}$ คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อเคียว (m^2)



รูปที่ 4.19 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณตะกอนและความหนาของตะกอนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น
 เมื่อป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศปริมาตร $800 \text{ m}^3/\text{day}$

4) ผลของน้ำเกลือที่เก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ
 ในการศึกษาเป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบปริมาณตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ ซึ่งเป็นน้ำเกลือที่
 สุ่มเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ ซึ่งประกอบด้วย บ่อบำบัด/บ่อผสม บ่อ
 พักน้ำเกลือใส ถังกรองทราย และถังอุ่นร้อน ซึ่งปริมาณตะกอนที่ได้จากการอุ่นร้อนน้ำเกลือตัวอย่าง
 ในระดับห้องปฏิบัติการ เมื่อคำนวณหาปริมาณตะกอนและความหนาของตะกอนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น
 ในหม้อเคียวสุญญากาศ เมื่อใช้น้ำเกลือจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ป้อนเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศด้วย

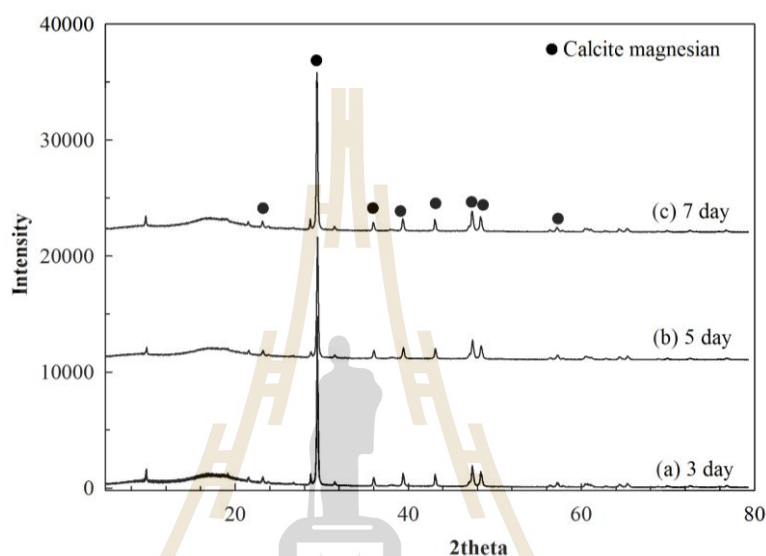
ปริมาตร $800 \text{ m}^3/\text{day}$ จากการทดลองพบว่า หากป้อนน้ำเกลือจากบ่อบำบัดเข้าหม้อเคียวโดยตรง จะมีตะกอนสะสมประมาณ $23 \text{ kg}/\text{day}$ หรือใน 1 วัน ความหนาของตะกรันจะหนาถึง 0.07 mm ดังรูปที่ 4.20



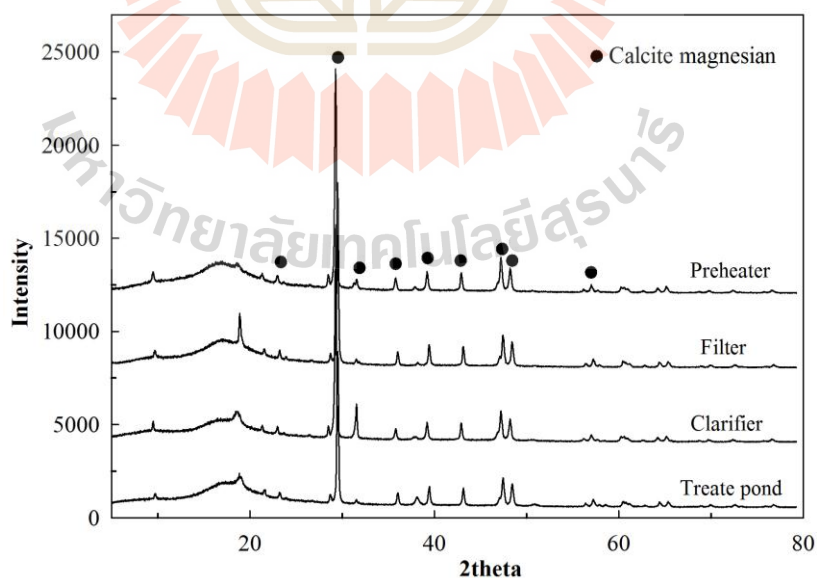
รูปที่ 4.20 ผลของน้ำเกลือจากโรงงานต่อปริมาณตะกอนและความหนาของตะกรันที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศปริมาตร $800 \text{ m}^3/\text{day}$

5) ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากการอุ่นร้อนน้ำเกลือ จากการศึกษาการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่มีระยะเวลาในการตกตะกอนแตกต่างกันและน้ำเกลือที่สูมเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ พบว่าน้ำเกลือจะขุ่นขึ้นหลังจากมีการอุ่นร้อน เนื่องจากมีตะกอนสีขาวเกิดขึ้น ซึ่งเบื้องต้นสันนิษฐานว่าตะกอนดังกล่าวอาจเป็นสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งเป็นสารตัวเดียวกับที่พบในตะกรันของหม้อเคียวสุญญากาศ เพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานจึงวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกของตะกอนเป็นสารประกอบกลุ่มแคลไซต์-แมกนีเซียม (Calcite magnesian) ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกของตะกรัน สำหรับสารแคลไซต์แมกนีเซียมประกอบด้วยธาตุ Ca ธาตุ Mg ธาตุ C และธาตุ O โดยสูตรโมเลกุลของสารที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกคือ $(\text{Mg}_x \text{Ca}_y)(\text{CO}_3)$ โดยที่ X และ Y แสดงถึงปริมาณของธาตุนั้น ๆ

การศึกษาการอุ่นร้อนน้ำเกลือ เพื่อกรองแยกตะกอนตกค้างขนาดเล็กออกจากน้ำเกลือ เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดปริมาณตะกอนตกค้างขนาดเล็กในน้ำเกลือ และเป็นการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการแยกตะกอนตกค้างด้วยวิธีการอุ่นร้อน ดังนั้น หากต้องการศึกษาการแยกตะกอนด้วยการอุ่นร้อนควรทำการศึกษาเพิ่มเติม



(a) ผลของระยะเวลาในการตกตะกอน



(b) ผลของน้ำเกลือที่สูมเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ

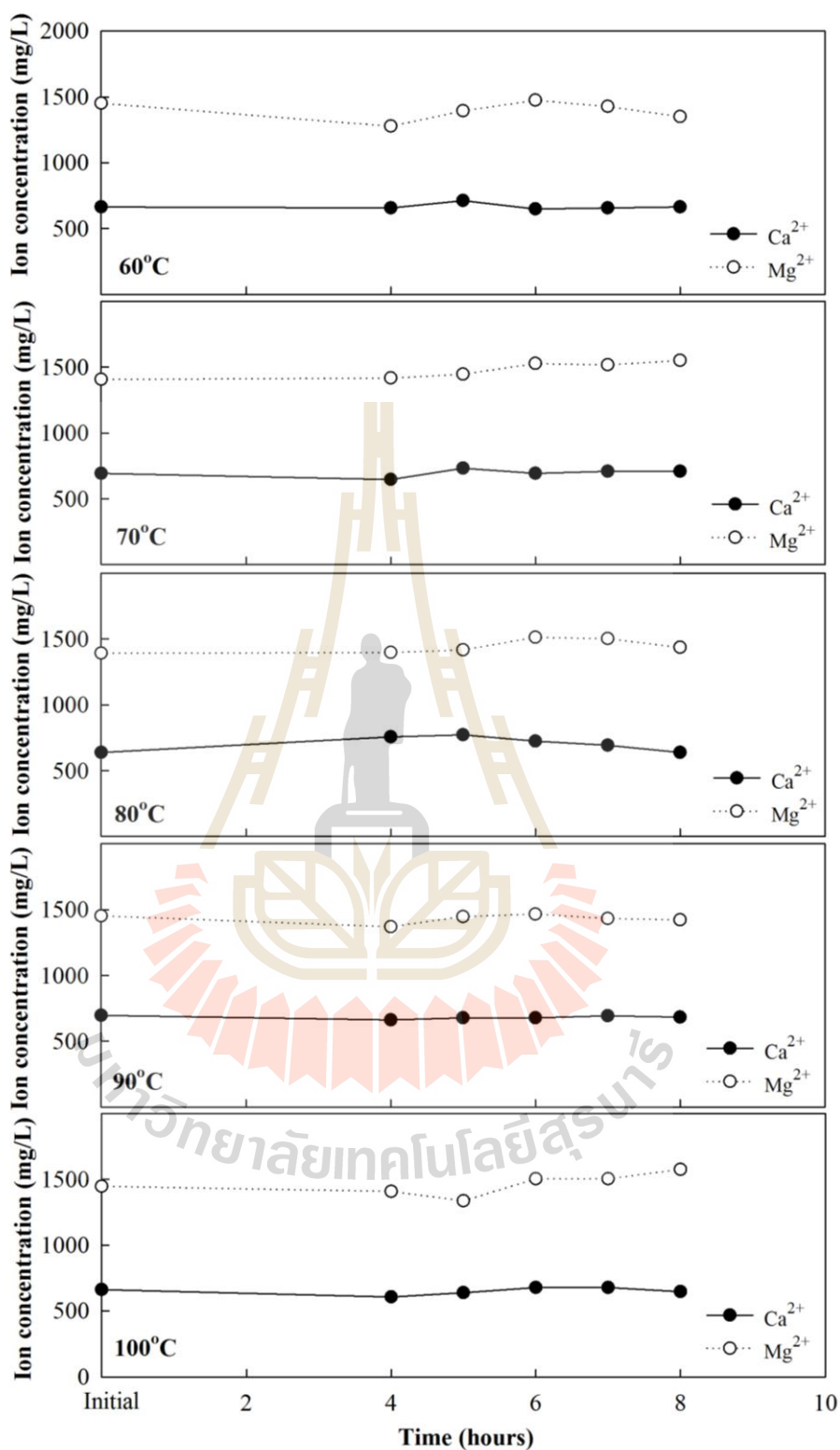
รูปที่ 4.21 XRD pattern ของตะกอนที่เกิดขึ้นในการอุ่นร้อนน้ำเกลือ

4.4.3 ผลการศึกษาการเติมตัวล่อ (Seeding) ที่มีต่อการตกตะกอน

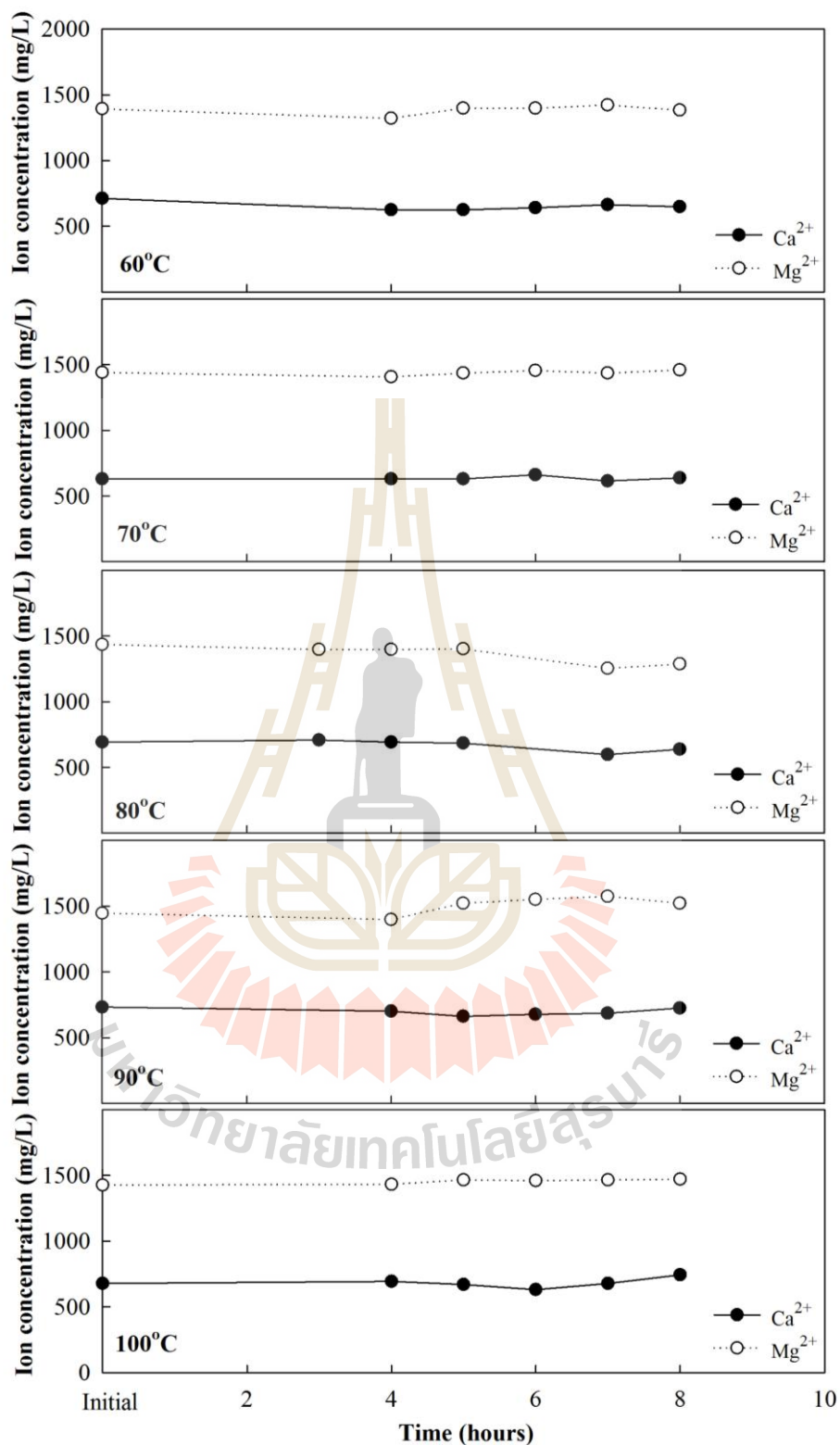
จากการทดลองเติมตัวล่อ (Seeding) ลงไปในน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนด้วยสถานะ PC-PH (ใช้สารเคมีตามสัดส่วนของโรงงาน) โดยมีการศึกษาผลของอุณหภูมิร่วมด้วย ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อกำจัดตะกอนและลดปริมาณ ไอออนเจือปนในน้ำเกลือภายในถังอุ่นร้อนก่อนป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศ พบว่า ปริมาณของแข็งที่กรองได้หลังจากเติมตัวล่อมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวล่อที่เติมเข้าไป และการเติมตัวล่อยังให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองการหาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำเกลือ เนื่องจากค่าปริมาณไอออนในน้ำเกลือหลังการเติมตัวล่อ $CaCO_3$ และ $Mg(OH)_2$ ที่มีขนาด 12.32 และ 77.46 μm ตามลำดับ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้น ดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมตัวล่อไม่สามารถกำจัดตะกอนและลดปริมาณไอออนเจือปนในน้ำเกลือได้ เพราะสถานะของไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเกลือไม่อยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวดที่มากพอ จึงทำให้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ไม่มากพอต่อการเพิ่มอัตราการเติบโตของผลึก สำหรับสถานะอิ่มตัวของไอออน Mg^{2+} และ Ca^{2+} พิจารณาได้จากค่าความเข้มข้นของไอออนทั้งสอง ณ เวลาต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่ออุ่นน้ำเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ ก่อนทำการเติมตัวล่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของไอออนทั้งสองไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น จากนั้นเมื่อเติมตัวล่อและแกะเก็บค่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ จะพบว่าค่าความเข้มข้นของไอออนมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปใกล้เคียงกับค่าไอออนเริ่มต้นในน้ำเกลือ ดังนั้น วิธีการเติมตัวล่อจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแยกตะกอนและลดค่าไอออนเจือปนในน้ำเกลือ

ตารางที่ 4.6 ปริมาณตัวล่อที่เติมลงในน้ำเกลือและของแข็งที่ได้จากการแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือปริมาตร 150 mL

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณตัวล่อ 0.1 กรัม		ปริมาณตัวล่อ 0.2 กรัม	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
60	0.1032	0.1056	0.2071	0.1980
70	0.1031	0.1001	0.2127	0.2157
80	0.1018	0.0953	0.2050	0.2143
90	0.1093	0.0984	0.2075	0.1925
100	0.1035	0.0978	0.2126	0.2062



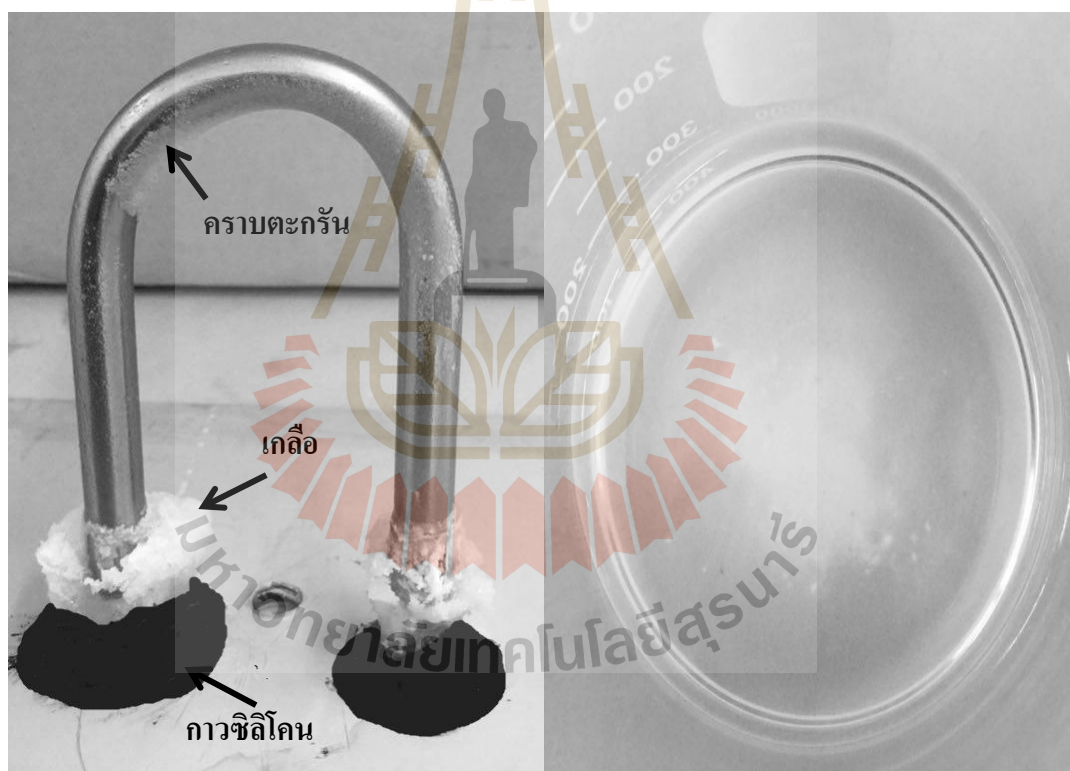
รูปที่ 4.22 ค่าความเข้มข้นของไอออนหลังการเติมตัวล่อ ปริมาณ 0.1 กรัม
 ต่อน้ำเกลือที่กำลังจัดไอออนแล้ว ปริมาตร 150 mL ณ เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.23 ค่าความเข้มข้นของไอออนหลังการเติมตัวล่อ ปริมาณ 0.2 กรัม
 ต่อน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้ว ปริมาตร 150 mL ณ เวลาต่าง ๆ

4.5 ผลการศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดและการป้องกันการเกิดตะกรัน

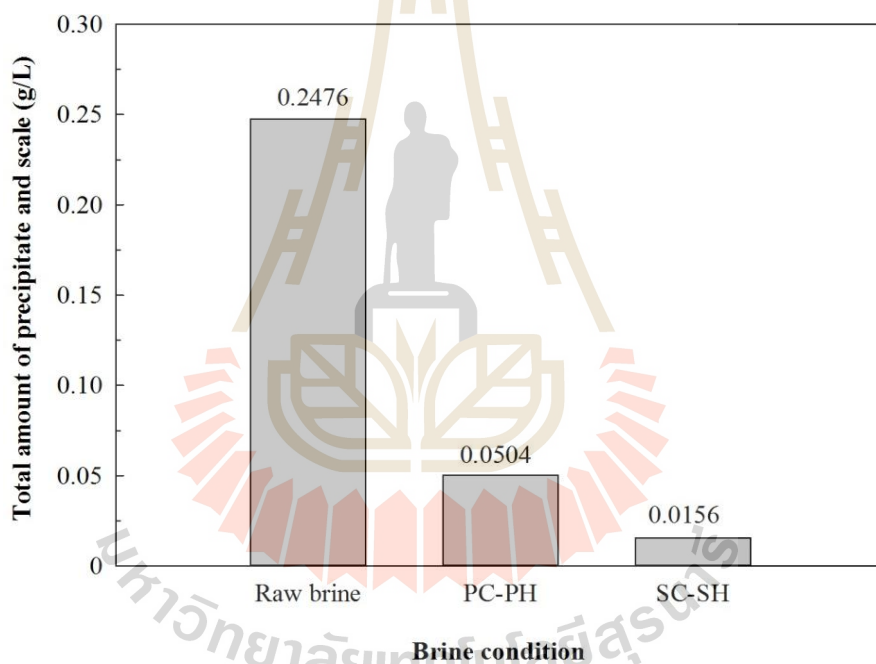
4.5.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดตะกรัน เมื่อมีการให้ความร้อนแก่น้ำเกลือดิบ น้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนด้วยสภาวะ PC-PH (น้ำเกลือ PC-PH) และน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนด้วยสภาวะ SC-SH (น้ำเกลือ SC-SH) พบว่าจะมีของแข็งเกาะติดอยู่ที่ผิวท่อรูปตัวยู โดยมีลักษณะเป็นคราบสีขาวและในขณะเดียวกันก็จะมีของแข็งตกตะกอนออกมาสะสมอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์หลังจากที่ให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งปริมาณของแข็งที่กรองแยกได้กับปริมาณตะกอนที่แยกได้จากท่อรูปตัวยู เมื่อทดลองโดยใช้น้ำเกลือดิบ น้ำเกลือ PC-PH และน้ำเกลือ SC-SH จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเกลือแตกต่างกันได้ผลดังนี้ น้ำเกลือดิบ > น้ำเกลือ PC-PH > น้ำเกลือ SC-SH ดังที่แสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ตะกรันที่ก่อตัวบนผิวท่อรูปตัวยูและของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ด้านล่างของชุดการทดลอง เมื่อไม่มีการใช้สารป้องกันการเกิดตะกรัน

จากผลการศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดตะกรันจากน้ำเกลือที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า น้ำเกลือที่มีค่าความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่สูง จะมีโอกาสในการเกิดตะกรันมากกว่า

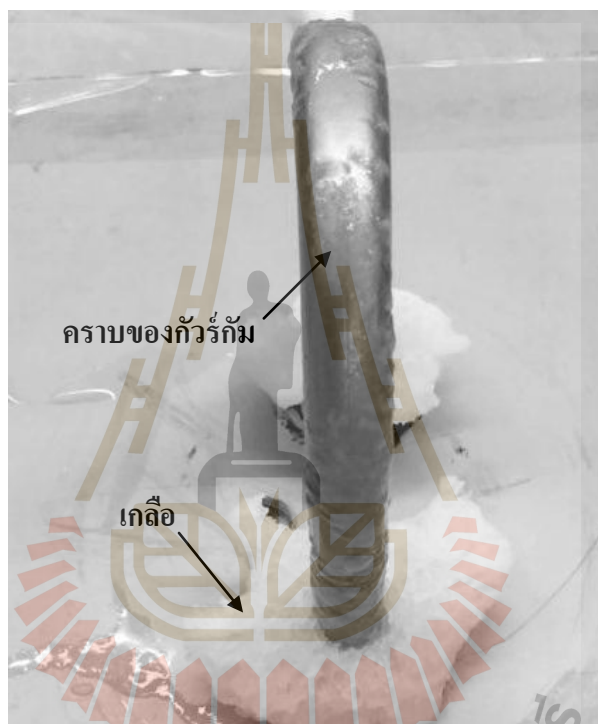
เนื่องจากน้ำเกลือที่มีไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} สูง จะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดมากขึ้นเมื่อมีการระเหยของน้ำบางส่วน โดยตะกอนที่เกิดจากไอออนเหล่านี้ได้แก่ CaSO_4 , CaCO_3 , Mg(OH)_2 ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือ Inverse solubility (Garrett-Price, 1985) ทำให้เกิดการตกตะกอนและเกิดเป็นตะกอนเกาะที่ผิวของท่อรูปตัวยูที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันร้อนกับน้ำเกลือ ดังนั้น การลดค่าความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำเกลือเป็นแนวทางเบื้องต้นที่สามารถป้องกันการเกิดตะกอนได้ สำหรับการศึกษาศึกษาพฤติกรรมเกิดตะกอนด้วยชุดจำลองที่สร้างขึ้นนี้ จะใช้เวลาในการทดลองในแต่ละสภาวะที่ค่อนข้างนาน ดังนั้นผลที่ได้จากการศึกษาที่แสดงนี้จึงเป็นผลของการศึกษาเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ผลจากการทดลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกอนได้



รูปที่ 4.25 ปริมาณของแข็งและตะกอนที่เกิดขึ้นจากการศึกษาศึกษาพฤติกรรมเกิดตะกอนจากน้ำเกลือที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นที่ท่อรูปตัวยู

4.5.2 ผลการศึกษาค้นคว้าของการเติมสารป้องกันการเกิดตะกอน จากการศึกษาการใช้กำมะถันเป็นสารป้องกันการเกิดตะกอน โดยการละลายกำมะถันปริมาณ 0.05 wt.% ต่อปริมาณน้ำเกลือ ลงในน้ำเกลือโดยตรงนั้น เมื่อนำน้ำเกลือที่มีกำมะถันละลายอยู่ในน้ำเกลือไปศึกษาศึกษาพฤติกรรมเกิดตะกอนในชุดจำลองพบว่า ที่บริเวณผิวท่อจะไม่มีคราบของตะกอนสีขาวดังที่พบในรูปที่ 4.24 แต่จะ

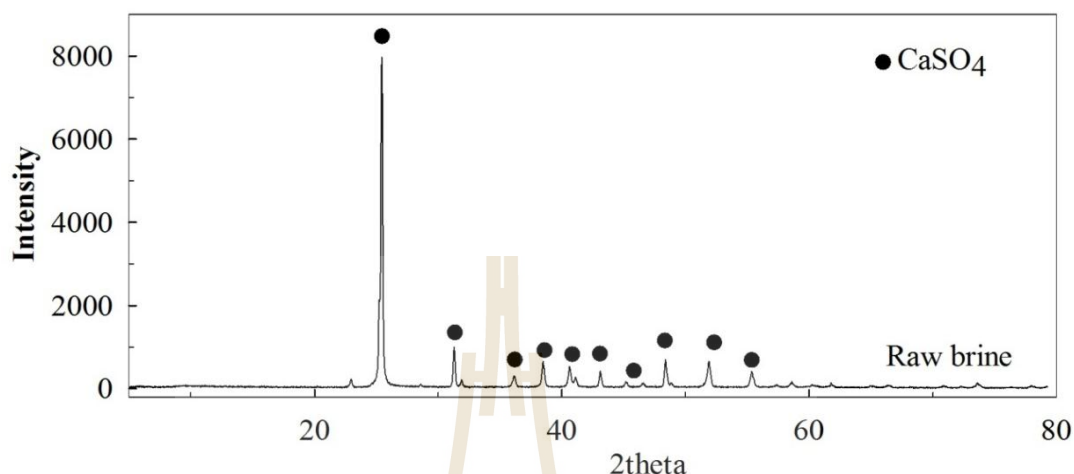
เป็นคราบลักษณะนุ่มลื่นเกาะอยู่ที่ผิวท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การใช้แก้วกำ เป็นสารป้องกันการเกิดตะกรันจะสามารถป้องกันการก่อตัวของตะกรันบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนได้ แต่การเติมสารป้องกันการเกิดตะกรันลงไปใต้น้ำเกลือจะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของ น้ำเกลือมีค่าต่ำลง เนื่องจากสารป้องกันการเกิดตะกรันที่ใช้ในการทดลองนี้จะตกตะกอนลงมาเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นและมีความเหนียวทำให้กรองแยกออกได้ค่อนข้างยาก ดังนั้น แก้วกำอาจไม่เหมาะ กับการนำไปใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อเคียวสุญญากาศ



รูปที่ 4.26 การเกาะตัวของของแข็งบนผิวท่อเมื่อมีการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน

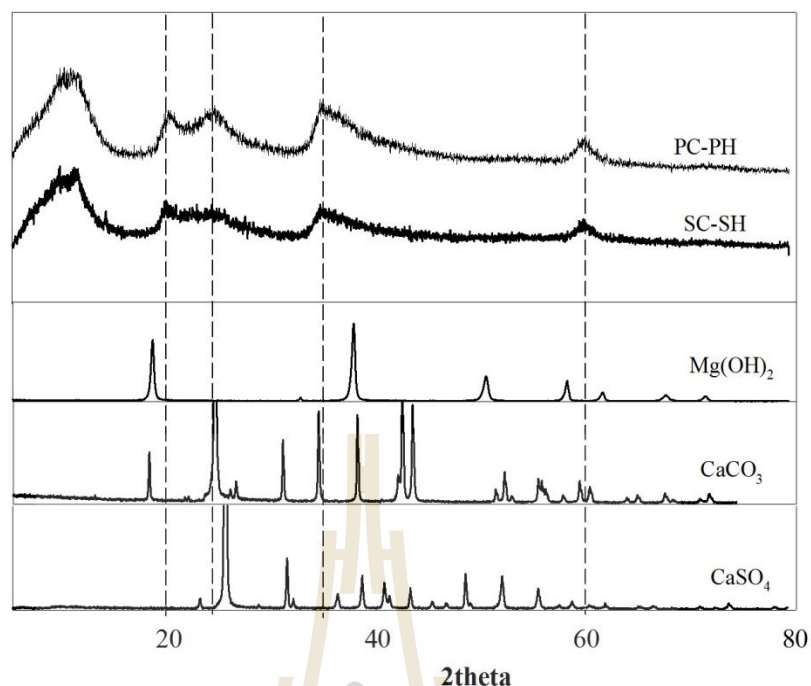
4.5.3 ผลการวิเคราะห์ตะกรันที่เกิดขึ้นในชุดจำลองการเกิดตะกรัน ในการวิเคราะห์ตะกรัน ที่เกิดขึ้นในชุดจำลองแบบท่อรูปตัวยูด้วยเทคนิค XRD พบว่า ตะกรันที่เกิดขึ้นบนผิวท่อเมื่อใช้ น้ำเกลือดิบจะมีโครงสร้างผลึกของสารตรงกับสาร CaSO_4 ดังรูปที่ 4.27 โดยตะกรันชนิดนี้มักจะพบ ในอุตสาหกรรมเกลือ (Kaufmann, 1960) สำหรับการเกิดตะกรัน CaSO_4 ในชุดจำลองการเกิด ตะกรัน เกิดจากสมบัติของการเป็น Inverse solubility ของสาร CaSO_4 ที่จะละลายได้น้อยลงเมื่อ น้ำเกลือมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนและก่อตัวเป็นตะกรันบนผิวท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน (Heitmann, 1990) ซึ่งการก่อตัวของตะกรัน CaSO_4 สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของ

ไอออน Ca^{2+} และ SO_4^{2-} ที่มีอยู่ในน้ำเกลือดิบ แต่ตะกอนที่เกิดขึ้น ไม่มีสารประกอบที่เกิดจากไอออน Mg^{2+} อาทิ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ อาจเนื่องมาจากสถานะของค่า pH ในน้ำเกลือต่ำกว่า 10 (Irving, 1926)



รูปที่ 4.27 โครงสร้างผลึกของตะกอนที่เกิดขึ้นในชุดจำลองเมื่อใช้น้ำเกลือดิบในการศึกษา

สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตะกอนที่เกิดขึ้นในชุดจำลองเมื่อมีการใช้น้ำเกลือที่ผ่านกระบวนการกำจัดไอออนด้วยสถานะ PC-PH และ SC-SH พบว่า พิกของกราฟ XRD มีฐานกราฟที่กว้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถระบุชนิดของโครงสร้างผลึกได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน แต่เพื่อทำนายถึงความเป็นไปได้ของชนิดสารประกอบที่อยู่ภายในตะกอน ได้เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตะกอนกับโครงสร้างผลึกของสาร $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 และ CaSO_4 โดยพบว่าพิกของกราฟ XRD ของตะกอนใกล้เคียงกับบางพิกของสารเปรียบเทียบ ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.28 อาจคาดได้ว่าตะกอนประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งในการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า แม้จะใช้น้ำเกลือที่มีการกำจัดไอออนแล้วแต่ก็ยังคงมีตะกอนเกิดขึ้น เนื่องจากในน้ำเกลือยังมีกลุ่มไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} และ SO_4^{2-} หลงเหลืออยู่ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้วจะช่วยให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง (ดังรูปที่ 4.25)



รูปที่ 4.28 โครงสร้างผลึกของตะกอนที่เกิดขึ้นในชุดจำลองเมื่อใช้น้ำเกลือที่ผ่านกระบวนการกำจัดไอออนด้วยสภาวะ PC-PH และ SC-SH

4.5.4 กลไกการเกิดขึ้นของตะกอน จากการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกอนด้วยท่อรูปตัวยู พบว่า การให้ความร้อนแก่น้ำเกลือโดยการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำมันร้อนสู่น้ำเกลือผ่านผนังท่อรูปตัวยู จะเกิดฟองขึ้นที่พื้นผิวของท่อรูปตัวยู ซึ่งการเกิดฟองบนพื้นผิวให้ความร้อนแสดงถึงจุดเริ่มต้นของน้ำเกลือหรือที่เรียกว่า Nucleate boiling และจากการทดลองพฤติกรรมของการเกิดตะกอน สังเกตได้ว่าเมื่อท่อรูปตัวยูมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีฟองเกาะที่ผิวท่อ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นนั้น ในน้ำเกลือจะมีเฟสของแก๊ส (ฟอง) และของเหลว (น้ำเกลือ) ดังรูปที่ 4.29 แต่เมื่อมีการให้ความร้อนแก่น้ำเกลือด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น พบว่าที่พื้นผิวระหว่างฟองและน้ำเกลือจะมีของแข็งสีขาวเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งของแข็งที่เกิดขึ้นนั้นคาดว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดตะกอน สำหรับปรากฏการณ์ที่พบในการทดลองนี้สอดคล้องกับกลไกของการเกิดตะกอนภายใต้สภาวะ Nucleate boiling โดยฟองจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวให้ความร้อนและเมื่อเกิดฟองขึ้นแล้วจะมีบริเวณของพื้นผิวระหว่างฟอง พื้นผิวให้ความร้อนและสารละลายเกิดขึ้น (Triple interface) ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่าการระเหยจะเกิดขึ้นที่ฐานของฟองหรือเกิดขึ้นที่ Triple interface โดยการระเหยที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสภาวะอ้อมตัวยวบและชักนำให้เกิดการตกตะกอน ดังรูปที่ 4.31 แต่ Hospeti and Mesler (1965) ที่ได้ถูกกล่าวถึงใน

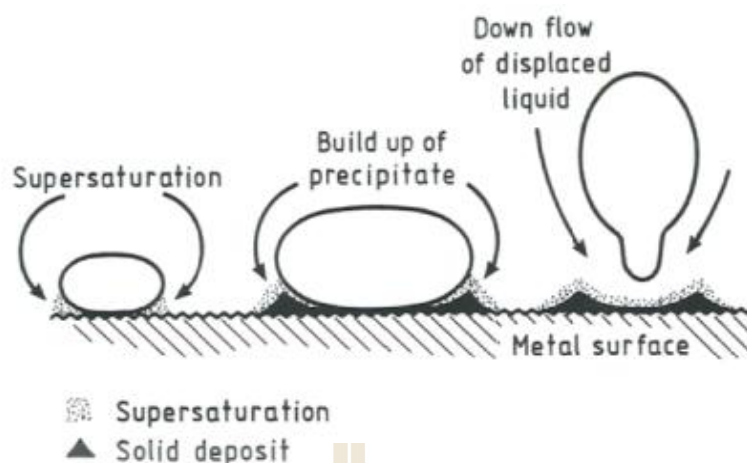
Bott (1995) ได้สรุปว่าตะกรัน CaSO_4 จะตกตะกอนอยู่ที่ฐานของฟอง เนื่องจากมีการระเหยได้ฐานของฟองมากกว่าที่ Triple interface



รูปที่ 4.29 การเกิด Nucleate boiling บนพื้นผิวที่รูปตัวยูของชุดจำลองการเกิดตะกรัน

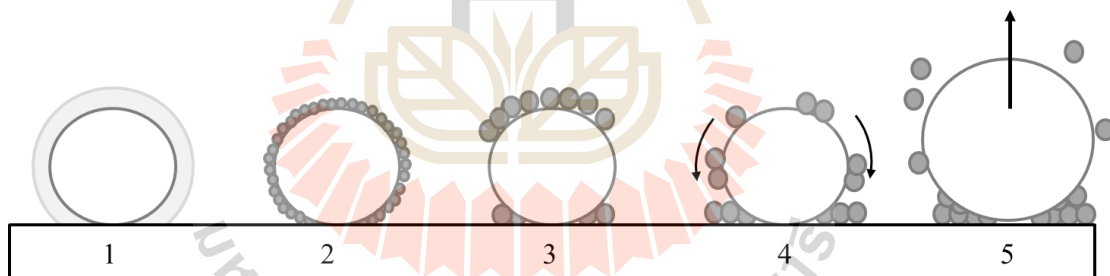


รูปที่ 4.30 การเกิดตะกรันบนพื้นผิวที่รูปตัวยูของชุดจำลองการเกิดตะกรัน



รูปที่ 4.31 การเกิดฟองและการเกิดตะกรัน (Bott, 1995)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรันบนท่อรูปตัวยูในงานวิจัยนี้ จะเป็นการเกิดตะกรันภายใต้สภาวะ Nucleate boiling เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้แล้วเบื้องต้น แต่กลไกทั้งหมดของการเกิดตะกรัน ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กลไกการเกิดตะกรันจากชุดจำลองการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรัน

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ขั้นที่ 1 เมื่ออุณหภูมิที่พื้นผิวของท่อรูปตัวยูร้อนขึ้น น้ำบริเวณผิวท่อเริ่มระเหยกลายเป็นไอและเกิดเป็นฟองแก๊สขึ้น ซึ่งรอบ ๆ ฟองจะมีความเข้มข้นของสารในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) และเมื่อน้ำระเหยมากยิ่งขึ้นก็จะเข้าสู่ขั้นที่ 2 คือเกิดการตกผลึกของสารละลาย ซึ่งในตอนแรกการตกผลึกอาจจะเกิดรอบ ๆ ฟอง แต่เนื่องจากโมเลกุลต่าง ๆ ภายในน้ำเคลื่อนที่เพราะได้รับความร้อน ตะกอนจึงมีการรวมตัวกันตั้งขั้นที่ 3 จากนั้นขั้นที่ 4 ตะกอนจะหลุดออกจากผิวฟองและสะสมที่พื้นผิวของท่อรูปตัวยูและก่อตัวเป็นตะกรัน และขั้นที่ 5 เมื่อมีการระเหยของน้ำอย่างต่อเนื่อง ฟองจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนถึงจุดวิกฤต จากนั้นฟองก็จะ

หลุดออกจากผิวท่อ ซึ่งในขณะที่ฟองเคลื่อนที่ขึ้นไปนั้น ก็จะมีตะกอนบางส่วนที่ติดไปกับฟองหลุดออก และกลายเป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำเกลือจึงทำให้มองเห็นน้ำเกลือมีความขุ่นเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดตะกอนพบว่า เมื่อมีการเดือดแบบฟองหรือ Nucleate boiling เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน จะทำให้เกิดสภาวะอิมพัลชันจนนำมาสู่การตกตะกอนและก่อตัวเป็นตะกอน ดังนั้น จึงควรมีการป้องกันการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling) ที่พื้นผิวท่อรูปตัวยูเพื่อลดโอกาสในการเกิดตะกอน

4.6 ข้อเสนอแนะทางการป้องกันการเกิดตะกอน

จากการศึกษาการกำจัดไอออนและการแยกตะกอนในระดับห้องปฏิบัติการ ได้นำเอาผลการทดลองที่ได้ศึกษามาเป็นต้นแบบแนวคิดในการป้องกันการเกิดตะกอน ซึ่งวิธีการที่จะสามารถป้องกันการเกิดตะกอนมีทั้งหมดดังนี้

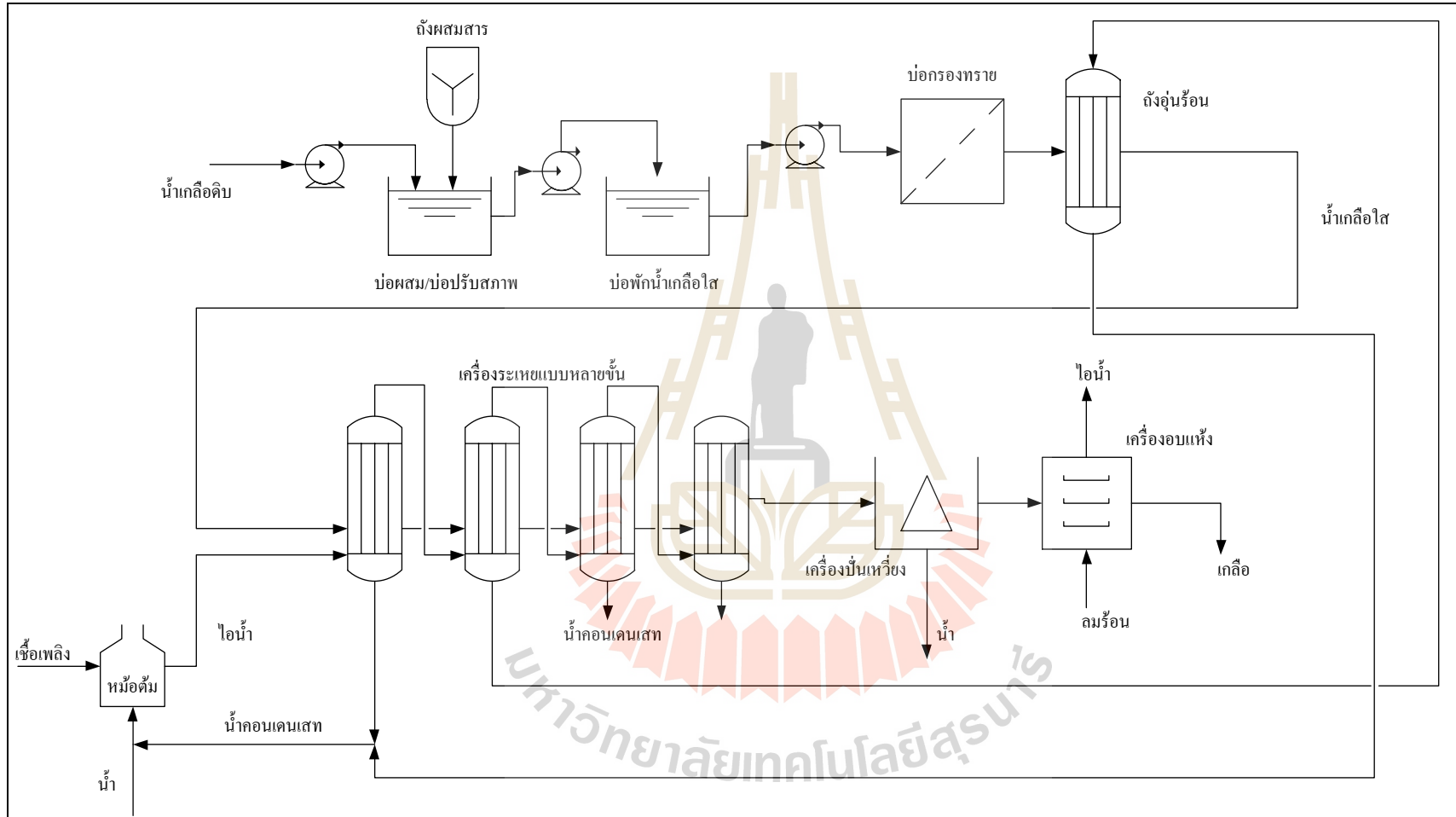
4.6.1 การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน สำหรับการแก้ปัญหาการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศนั้น วิธีการแก้ปัญหอย่างง่ายคือการกำจัดไอออนที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกอน ซึ่งไอออนที่เป็นสาเหตุของตะกอนประกอบด้วย ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} โดยแนวทางที่ใช้คือการเพิ่มปริมาณสารเคมี ซึ่งจากผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า การใช้สารเคมีในสัดส่วนที่เท่ากับค่าความเข้มข้นของไอออน สามารถลดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ลงได้มากกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน นอกจากจะส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตเกลือเพิ่มมากขึ้นแล้ว ยังมีกากตะกอนที่อยู่ในรูปของ CaCO_3 และ Mg(OH)_2 จำนวนมาก ดังนั้น หากเลือกใช้วิธีการเพิ่มปริมาณสารเคมีสำหรับการป้องกันการเกิดตะกอน จำเป็นที่จะต้องมีการหาแนวทางเพิ่มเติมในการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า โดยในงานวิจัยนี้ขอเสนอให้มีการติดตั้งถังตกตะกอน (Thickener) และเครื่องรีดตะกอน (Decanter) สำหรับใช้ในการแยกตะกอนออกจากน้ำเกลือ เพื่อลดการสูญเสียน้ำเกลือไปกับกากตะกอนและเพื่อนำกากตะกอนไปเพิ่มมูลค่า ซึ่งในการเสนอให้มีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออนสำหรับป้องกันการเกิดตะกอนนั้น ได้มีการจัดทำการประเมินต้นทุนการผลิตเกลือร่วมด้วย เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการที่จะเลือกนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการผลิตเกลือ

4.6.2 การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน เนื่องจากกระบวนการกำจัดไอออนด้วยวิธีทางเคมี จะกำจัดไอออนออกมาในรูปของแข็ง ซึ่งการตกตะกอนใช้ระยะเวลาาน หากยังมีตะกอนตกค้าง ในน้ำเกลือปะปนเข้าไปในหม้อเคี้ยวสุญญากาศก็จะส่งผลให้เกิดตะกรันขึ้นได้ ดังนั้น การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการลดสาเหตุของการเกิดตะกรันและลดระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอีกด้วย โดยแนวทางนี้สามารถนำไปปรับใช้กับโรงงานได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการเดิมของโรงงาน แต่อาจมีการออกแบบถังผสมสำหรับเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนเพิ่ม ซึ่งหากเลือกใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการเดิมของโรงงาน เพื่อลดสาเหตุของการเกิดตะกรันที่เกิดจากการตกค้างของตะกอนขนาดเล็กนั้น จะใช้ถึงสำหรับเตรียมสารละลาย Na_2CO_3 และสารละลาย NaOH ดังรูปที่ 4.33 สำหรับเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอน ซึ่งสารช่วยเร่งตกตะกอนจะถูกเติมลงในบ่อผสมเป็นสัดส่วนโดยมีการกวนร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอน อย่างไรก็ตาม การใช้ถึงเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนร่วมกับถังเตรียมสารละลายอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอน เนื่องจากระยะเวลาในการกวนผสมอาจไม่เพียงพอ ดังนั้น เพื่อให้ได้สารช่วยเร่งตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสำหรับเร่งการตกตะกอนจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบถังเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนเพิ่ม

โดยการออกแบบในงานวิจัยนี้จะอาศัยผลการทดลองในการใช้สารช่วยเร่งตกตะกอนในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการออกแบบถังเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนจะใช้ผลของปริมาณสารช่วยเร่งตกตะกอนที่น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อคิดคำนวณออกมาแล้วจะต้องเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนประมาณ 2 m^3 ต่อน้ำเกลือปริมาตร 400 m^3 ดังนั้น จึงเลือกที่จะออกแบบถังขนาด 4 m^3 เนื่องจากอัตราการปรับสภาพน้ำเกลือเท่ากับ $800 \text{ m}^3/\text{day}$ โดยลักษณะของถังเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอนที่จะถูกออกแบบสำหรับนำไปใช้ในการเตรียมสาร มีรายละเอียดของแหล่งข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.7

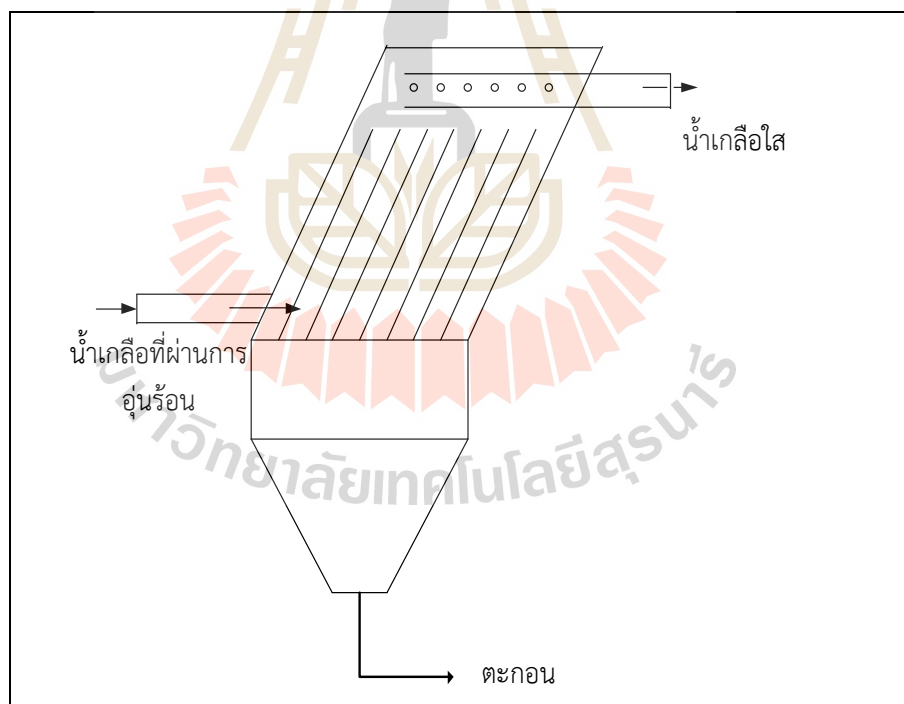
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมสารช่วยเร่งตกตะกอน

อุปกรณ์	วัสดุ	ขนาด	ที่มาข้อมูล
1) ถังผสมสำเร็จรูป	Stainless steel	ตามสั่ง	http://www.siamcentergreentech.com
2) ถังผสมสารแบบพลาสติก	Polyethylene	4500 L	http://www.safefiberglassstank.com
3) ชุดใบกวน	Stainless steel	ตามสั่ง	http://www.siamcentergreentech.com



รูปที่ 4.33 แผนผังกระบวนการผลิตเกลือของบริษัทสยามทรัพย์มณี

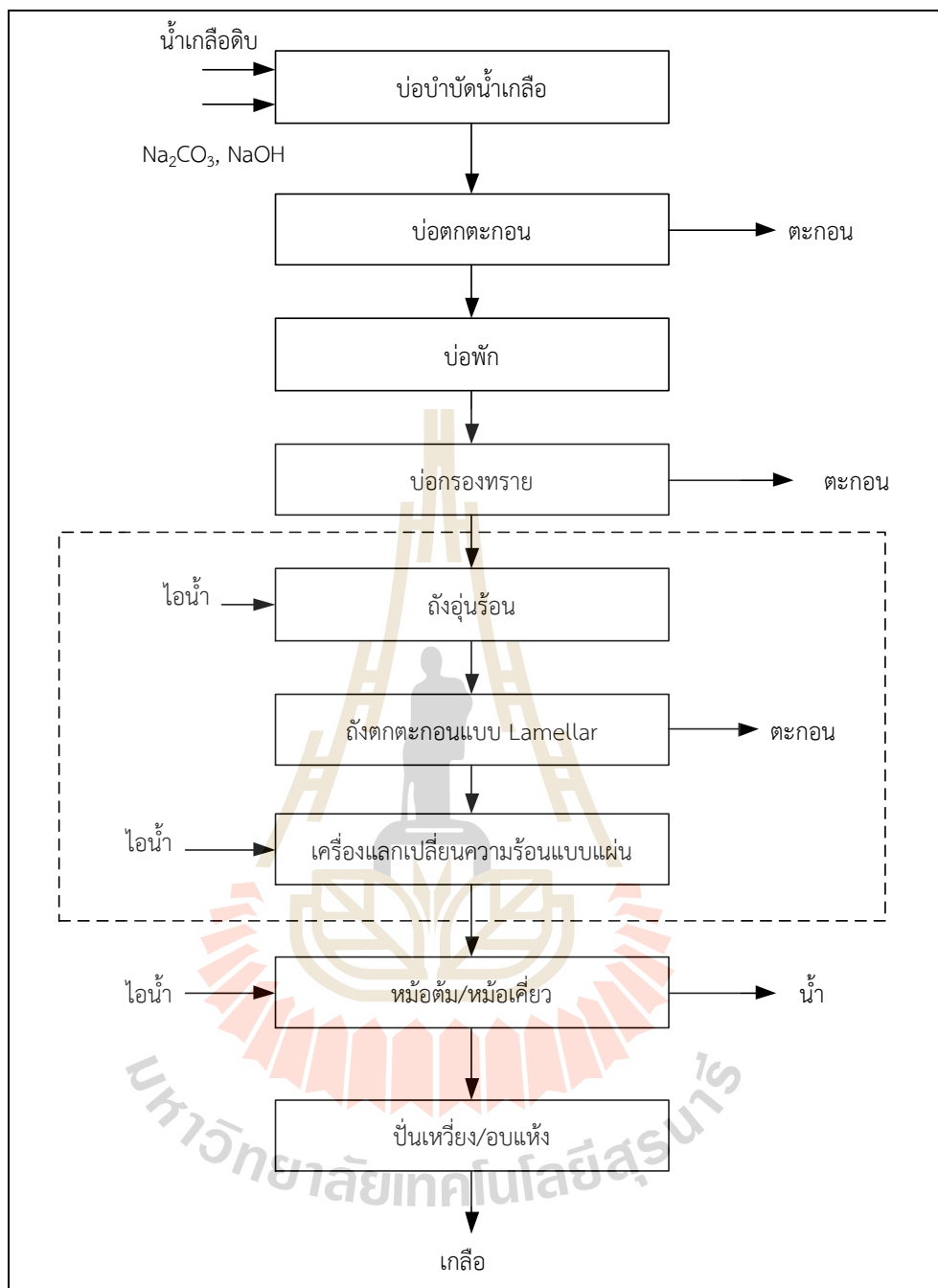
4.6.3 การใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน สำหรับแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศอีกหนึ่งแนวทางคือการใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน ซึ่งแนวทางนี้เป็นการกำจัดตะกอนขนาดเล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือไส ก่อนที่จะป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศ โดยน้ำเกลือจากบ่อพักไสจะถูกส่งเข้าสู่ถังอุ่นร้อน เมื่อน้ำเกลือมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะพบว่ามีตะกอนขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เกิดขึ้น ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นคือ CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ที่ละลายอยู่ในน้ำเกลือ โดยตะกอนเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการละลายได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเกลือสูงขึ้น เมื่อน้ำเกลือไสผ่านการอุ่นร้อนแล้วจะส่งผลให้น้ำเกลือมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดตะกอนสีขาวขึ้น จากนั้นจะป้อนของผสมเหล่านี้เข้าทางด้านล่างของถังตกตะกอนแบบ Lamellar โดยลักษณะของถังตกตะกอนแบบนี้จะมีแผงท่อเอียงทำมุม 60° กับระนาบติดตั้งอยู่ภายใน เมื่อตะกอนสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นตกตะกอนก็จะไหลลงสู่ก้นถัง ส่วนน้ำเกลือไสจะไหลเข้ารูพรุนของท่อทางด้านบนของถังเพื่อออกทางด้านบนของถัง ซึ่งลักษณะของถังตกตะกอนแบบ Lamellar แสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ลักษณะของถังตกตะกอนแบบ Lamellar

ข้อดีของการใช้เหล็กใช้ถักตะกอนแบบ Lamellar คือการตกตะกอนในพื้นที่เอียงจะทำให้ตะกอนตกได้เร็วขึ้น เนื่องจากตะกอนตกลงมาเป็นระยะทางสั้น ๆ ก็จะกระทบกับผนังของท่อเอียง เมื่อตะกอนตกมารวมกันที่ผนังของพื้นเอียงมากขึ้นก็จะค่อย ๆ ไหลตกลงสู่ด้านล่างได้โดยง่าย ซึ่งการตกตะกอนที่เร็วขึ้นจะทำให้ใช้พื้นที่ในการตกตะกอนที่น้อยลง จึงทำให้ขนาดของถังเล็กลง นอกจากนี้ การตกตะกอนในถังแบบ Lamellar ยังไม่มีการใช้พลังงานจากภายนอก เนื่องจากกลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในถังจะอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเท่านั้น

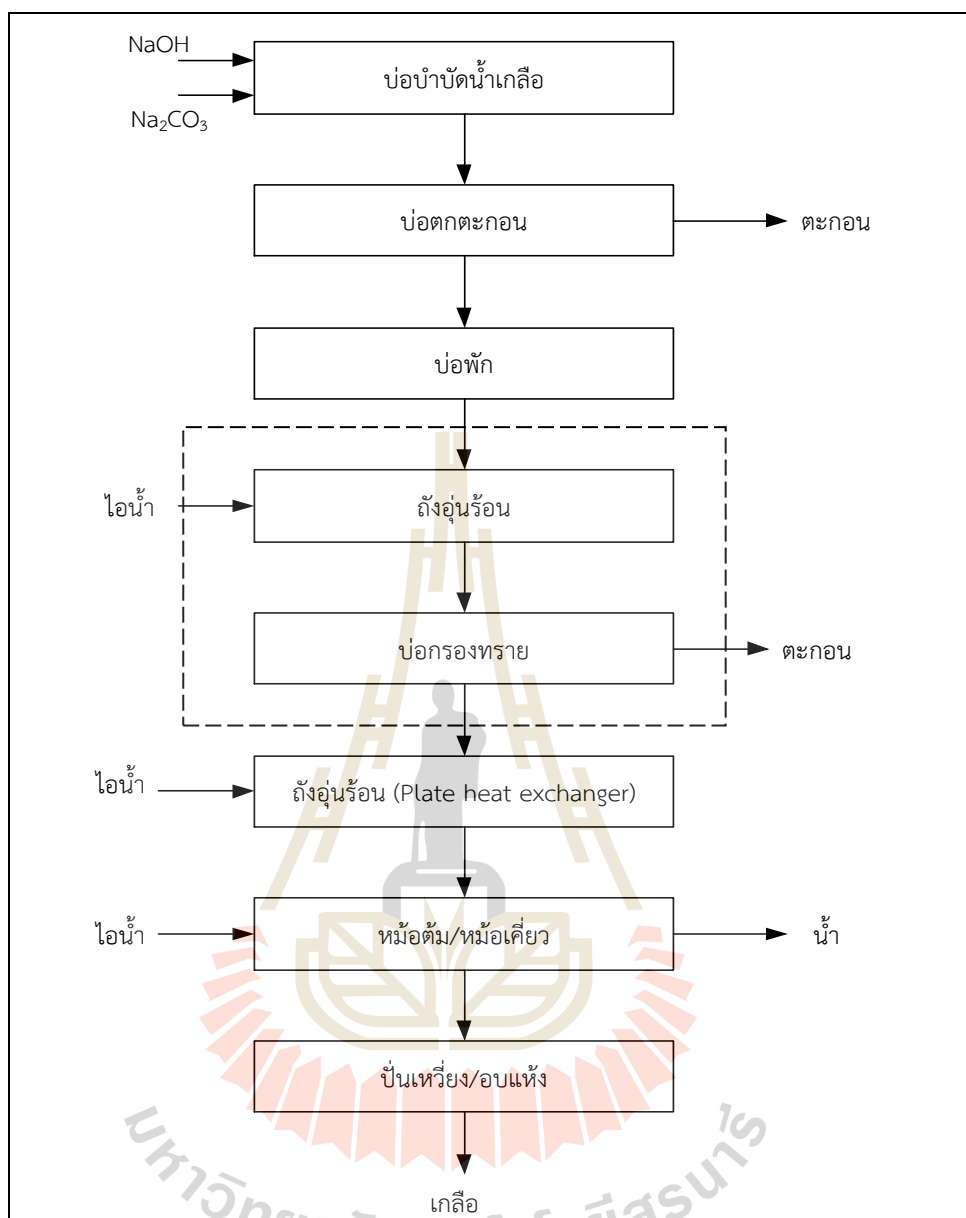
อย่างไรก็ตาม การใช้ถักตะกอนแบบ Lamellar กับกระบวนการผลิตเกลือก็มีข้อเสีย เช่นเดียวกัน กล่าวคือ ถ้าหากวัสดุที่นำมาใช้ในการทำแผ่นเอียงไม่สามารถทนต่อน้ำเกลือได้ ก็จะเกิดการกัดกร่อนจากน้ำเกลือได้ และจากการออกแบบแผ่นเอียงที่ติดกัน ก็จะส่งผลให้การทำความสะอาดแผ่นเอียงทำได้ยาก แต่ก็สามารถแก้ปัญหาได้โดยการติดตั้งเป็นแบบแผ่นที่แยกจากกันได้ และอีกหนึ่งข้อเสียของการใช้แนวทางนี้คือ การสิ้นเปลืองพลังงานที่มากขึ้น เนื่องจากต้องเพิ่มปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ในกระบวนการเนื่องจากต้องใช้ในถังอุ่นร้อน สำหรับการนำเอาถักตะกอนแบบ Lamellar เข้าไปประยุกต์ใช้ จะต้องมีการติดตั้งถักตะกอนเข้าไปตั้งรูปที่ 4.35 โดยถักตะกอนแบบ Lamellar จะติดตั้งอยู่ระหว่างถังถึงอุ่นร้อนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ปรากฏอยู่ในแผนผังนี้เป็นอุปกรณ์เดิมที่ทางโรงงานมีอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีการจัดซื้ออุปกรณ์ตัวใหม่ ถึงแม้แนวทางนี้จะสามารถแยกตะกอนได้เร็วขึ้น แต่ปัญหาการเกิดตะกรันก็จะยังคงมีอยู่ หากน้ำเกลือที่ป้อนเข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศมีความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ยังคงมีค่าสูง



รูปที่ 4.35 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน

4.6.4 การปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน ในการเสนอแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรัน โดยการปรับตำแหน่งระหว่างถังอุ่นร้อนกับบ่อกรองทราย สืบเนื่องจากกระบวนการเตรียมน้ำเกลือก่อนเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศนั้น จากเดิมจะสูบน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนและผ่านการตกตะกอนแล้ว ป้อนเข้าสู่ถังกรองทรายเพื่อคัดตะกอนที่อาจปะปนมากับน้ำเกลือ จากนั้นน้ำเกลือจึงจะไหลผ่านถังอุ่นร้อนก่อนที่จะเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศ ซึ่งกระบวนการเดิมนั้นจะยังมีตะกอนขนาดเล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือถูกป้อนเข้าสู่หม้อเคี้ยวอยู่ เนื่องจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อนำน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วมาทำการอุ่นร้อนจะพบว่าน้ำเกลือจะขุ่นขึ้น อันเนื่องมาจากสารประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำเกลือมีความสามารถในการละลายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลให้สารประกอบเหล่านั้นแยกตัวออกมา เมื่อน้ำเกลือที่มีของแข็งปะปนถูกส่งเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศ ของแข็งเหล่านั้นก็จะตกตะกอนและเกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อเคี้ยวสุญญากาศ ดังนั้น เพื่อลดสาเหตุของการเกิดตะกรัน ควรมีการปรับตำแหน่งของถังอุ่นร้อนกับบ่อกรองทราย โดยให้น้ำเกลือจากบ่อพักไหลผ่านถังอุ่นร้อนก่อนจากนั้นค่อยผ่านเข้าสู่บ่อกรองทราย และเมื่อน้ำเกลือผ่านบ่อกรองทรายจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเกลือลดต่ำลง ดังนั้นควรให้ความร้อนแก่น้ำเกลืออีกครั้ง โดยการผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่โรงงานมีอยู่แล้วก่อนป้อนน้ำเกลือเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศ ดังรูปที่ 4.36

สำหรับข้อดีของการออกแบบนี้ คือเป็นการออกแบบที่ไม่มีการเพิ่มต้นทุนในการติดตั้งเครื่องมือใหม่ อีกทั้งขั้นตอนในกระบวนการไม่แตกต่างไปจากเดิม เพราะหน้าที่หลักของแต่ละหน่วยปฏิบัติการยังคงเดิม เพียงแต่เปลี่ยนลำดับในการทำงานเท่านั้น ส่วนข้อเสียของการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้คือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อน เนื่องจากต้องใช้ไอน้ำทั้งในถังอุ่นร้อนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น อย่างไรก็ตาม การปรับตำแหน่งระหว่างถังอุ่นร้อนและบ่อกรองทรายจะไม่สามารถลดการเกิดตะกรันในหม้อเคี้ยวสุญญากาศได้ หากน้ำเกลือที่ถูกป้อนเข้าสู่หม้อเคี้ยวสุญญากาศมีค่าไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่สูงเกินไป ดังนั้น ควรมีการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสารเคมีในปริมาณ SC-SH ก่อนเสมอด้วย



รูปที่ 4.36 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน

4.6.5 การเติมตัวล่อเพื่อให้เกิดการตกตะกอน สำหรับแนวทางการป้องกันการเกิดตะกอน โดยการเติมตัวล่อ (Seeding) สำหรับล่อให้ผลึกของสารประกอบที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกอน ซึ่งประกอบไปด้วย CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ที่ละลายอยู่ในน้ำเกลือให้ตกผลึกและแยกตัวออกมานั้น ทำได้ยากสำหรับกระบวนการผลิตเกลือ เนื่องจากการเติมตัวล่อ (Seeding) ลงไปในน้ำเกลือนั้น ไม่สามารถตกตะกอน CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ที่มากพอต่อการเพิ่มอัตราการเติบโตของผลึก และหาก

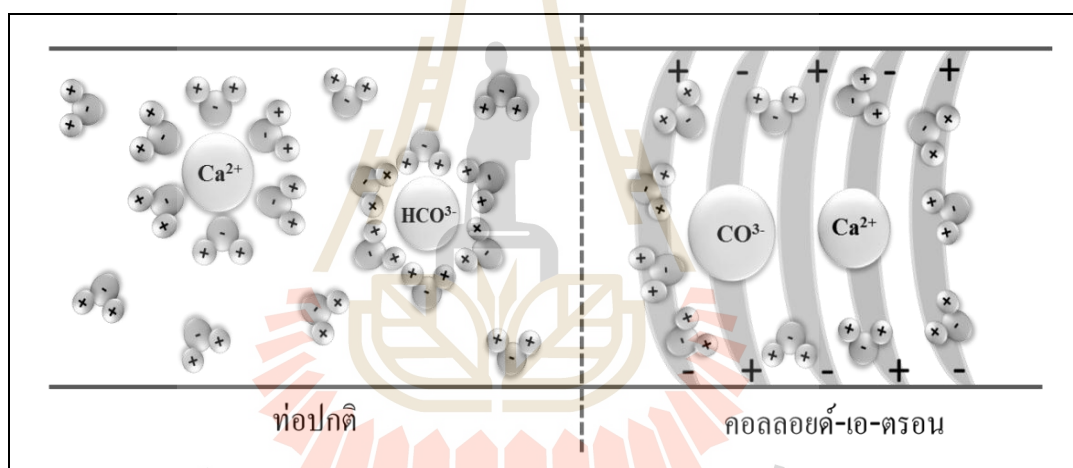
เติมตัวล่อลงในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของไอออน ไม่อิ่มตัว จะทำให้น้ำเกลือมีความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวล่อเกิดการละลาย อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวล่อเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ถ้าน้ำเกลือมีความเข้มข้นของไอออนที่อิ่มตัวยิ่งยวดที่มากพอ เพราะไม่มีการใช้สารเคมีในการกำจัดไอออน แต่แนวทางนี้อาจจะดำเนินการได้ยาก เนื่องจากต้องมีการควบคุมระบบไม่ให้ NaCl ตกผลึกมาพร้อมกับ CaCO_3 และ Mg(OH)_2

4.6.6 การเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) สำหรับแนวทางป้องกันการเกิดตะกรันโดยการเติมสารป้องกันการเกิดตะกรันหรือ Anti-scaling จะเป็นการเติมสารที่สามารถเข้าไปยับยั้งการเกิดตะกรัน โดยสารที่เติมลงไปนั้นจะเข้าไปก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ๆ รอบผลึกของตะกอนเอาไว้เพื่อหน่วงการเติบโตของผลึกและไม่ก่อให้เกิดตะกรัน แต่ยังคงให้แขวนลอยอยู่ในน้ำเกลือ โดยสารป้องกันการเกิดตะกรันที่จะสามารถนำมาใช้ป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อเคียวสุญญากาศของกระบวนการผลิตเกลือจะต้องเป็นเกรดอุตสาหกรรมอาหาร และเมื่อเติมลงไปน้ำเกลือแล้วจะต้องไม่ส่งผลต่อคุณภาพและมาตรฐานของเกลือบริโภค จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อเติมสารกัวร์กัมเป็นสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) ซึ่งเป็นสารเพิ่มความหนืดหยุ่นให้กับอาหาร จะสามารถป้องกันการเกาะตัวของกลุ่มตะกรันบนผิวท่อได้ โดยกัวร์กัมจะเข้าไปจับตะกรันและสร้างเป็นชั้นเจลขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงเข้าไปเกาะยังผิวท่อ ทำให้ตะกรันที่เกาะที่ผิวท่ออยู่ในลักษณะลื่น อย่างไรก็ตาม แมื่วกัวร์กัมสามารถป้องกันการเกิดตะกรันได้ แต่จากพฤติกรรมของการละลายได้ของกัวร์กัมในน้ำเกลืออาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเกลือ ดังนั้น แนวทางนี้อาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของกัวร์กัมที่มีต่อคุณภาพเกลือ รวมไปถึงการวิจัยเพื่อหาชนิดของสารป้องกันตะกรันที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมการผลิตเกลือ ถึงแม้ว่าแนวทางนี้จะยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อเคียวสุญญากาศได้ แต่แนวทางนี้สามารถนำไปปรับใช้เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อต้มไอน้ำได้ เพื่อลดการสูญเสียของเชื้อเพลิงที่มากเกินไปเมื่อเกิดตะกรันในหม้อต้มไอน้ำ

4.6.7 การใช้เทคโนโลยีคอลลอยด์-เอ-ตรอน (Colloid-a-tron) สำหรับคอลลอยด์-เอ-ตรอนเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันและช่วยนำพาตะกรันเก่าที่มีอยู่แล้วออกมาด้วย ซึ่งเป็นวิธีทางกายภาพที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำ หลักการทำงานของคอลลอยด์-เอ-ตรอน คือ อัลลอยด์จะทำหน้าที่ปล่อยประจุอิเล็กตรอนออกมา เมื่อมีน้ำไหลผ่านจะทำให้บริเวณนั้นมีความเป็นด่างสูงขึ้น จึงไปเร่งให้ไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} รวมตัวกับ CO_3^{2-} เกิดเป็นผลึก CaCO_3 และ MgCO_3 โดยที่ยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำเกลือและจะไม่เกาะเป็นตะกรันแข็งตามผิวท่อ (nbainter, www, n.d.)

ข้อดีของแนวทางนี้คือสามารถนำเอาอุปกรณ์คอลลอยด์-เอ-ตรอนเข้ามาติดตั้งกับท่อส่งน้ำเกลือที่เชื่อมต่อจากบ่อพักน้ำเกลือใส่เข้าสู่หม้อเคียวสุญญากาศได้โดยตรง โดยที่กระบวนการ

ผลิตเกลือยังคงเหมือนเดิม รวมถึงเป็นวิธีการที่ไม่มีการใช้สารเคมีและไม่มีการใช้พลังงาน จึงทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ มีเพียงแต่ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเท่านั้น ส่วนข้อเสียที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อเลือกใช้การป้องกันการเกิดตะกรันด้วยวิธีนี้คือ วัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์นี้ อาจไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของน้ำเกลือได้ และหากน้ำเกลือผ่านท่อคอลลอยด์-เอ-ตรอน อาจทำให้ไอออน Na^+ และ Cl^- เกิดการรวมตัวกันและแยกตัวออกมาแขวนลอยในน้ำเกลือ ซึ่งจะส่งผลให้กำลังการผลิตเกลือลดลงได้ เนื่องจากลักษณะการละลายได้ในน้ำของไอออน Na^+ และ Cl^- คล้ายกับไอออนเจือปนในน้ำเกลือ อย่างไรก็ตาม หากต้องการที่จะเลือกใช้แนวทางนี้สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานจริง จะต้องมีการติดต่อขอข้อมูลของเทคโนโลยีคอลลอยด์-เอ-ตรอน จากผู้จัดจำหน่าย เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ได้ถูกสร้างขึ้นและมีการนำไปใช้งานแล้วในการป้องกันตะกรัน แต่ยังไม่พบข้อมูลที่น่าไปใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือ



รูปที่ 4.37 ลักษณะของไอออนในน้ำก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) ผ่านคอลลอยด์-เอ-ตรอน

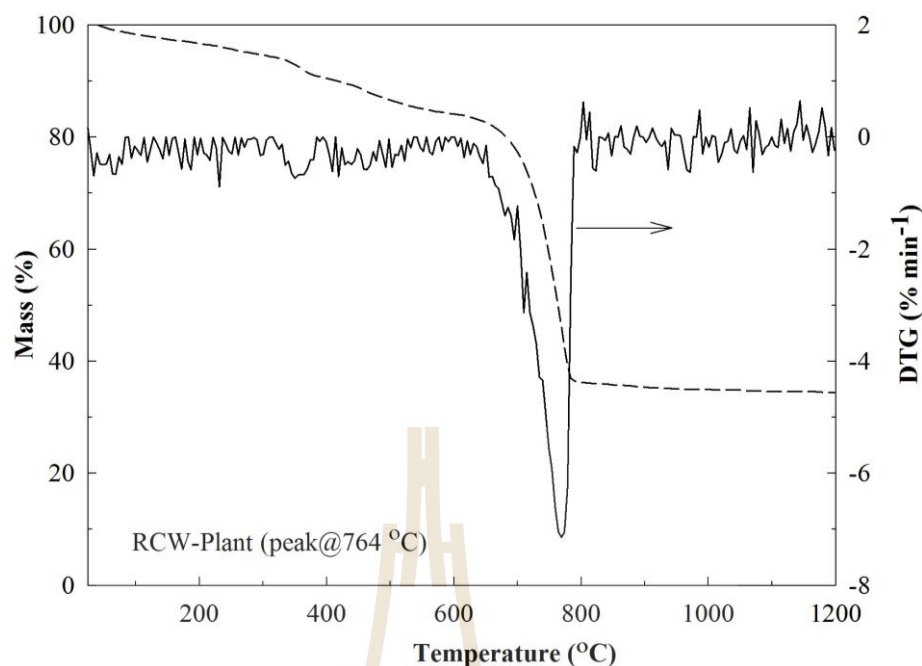
(nbainter, www, n.d.)

4.7 การศึกษาการนำกากตะกอนมาเพิ่มมูลค่า

จากการศึกษาแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน โดยการกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ด้วยสารเคมีในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้น นอกจากจะทำให้ต้นทุนของการผลิตเกลือสูงขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้มีกากตะกอน (ตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2) ที่มากขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะนำกากตะกอนเหล่านี้มาเพิ่มมูลค่า โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO/MgO สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) จากกากตะกอน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำกากตะกอนที่อบแห้งแล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อไล่ความชื้นและก๊าซต่าง ๆ จะได้ออกมาเป็นสารประกอบออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้จะเรียกสารประกอบออกไซด์ที่ได้จากการเผากากตะกอนว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา” โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นได้นี้ ได้ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี รวมทั้งมีการนำไปทดลองใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วอีกด้วย ซึ่งผลของการศึกษาและทดลองมีดังนี้

1) การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเผากากตะกอนเพื่อไล่ความชื้นและก๊าซต่าง ๆ ออกจากกากตะกอน จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.38 พบว่ากากตะกอนเริ่มมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาโดโลไมต์เพื่อให้ได้ CaO (Jaiyen et al., 2015) และเมื่อนำ CaO ที่ได้จากการเผาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าจะสามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ได้สูงถึง 98.6% (Ngamcharussrivichai et al., 2010)

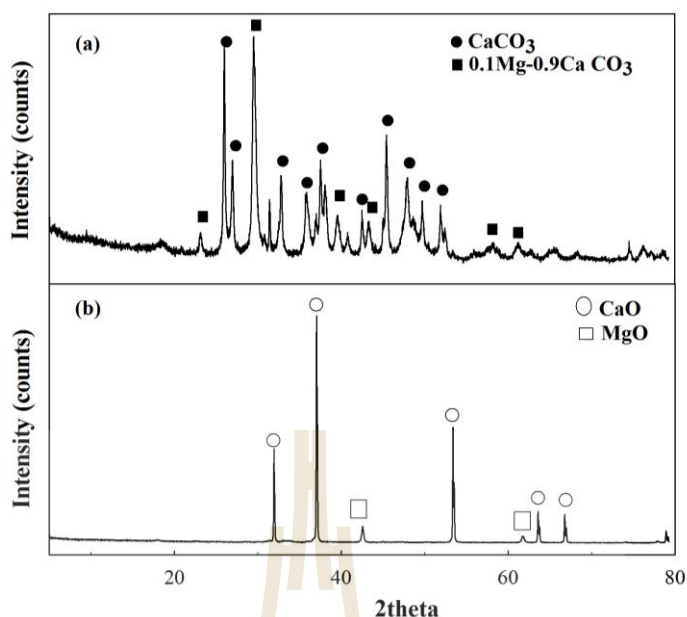
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ CaO ที่ได้จากการเผาโดโลไมต์ด้วยอุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสารประกอบออกไซด์เป็นหลัก จึงเลือกเผากากตะกอนด้วยอุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งกากตะกอนที่เผาด้วยอุณหภูมิสูง ก็สามารถนำไปผลิตไบโอดีเซลที่มีองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 90% ได้ดังเช่นงานวิจัยของ Kouzu et al. (2008) ที่ได้สรุปว่า CaO ที่ได้จากการเผาหินปูนที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจะได้ไบโอดีเซลที่มีองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ประมาณ 93% ดังนั้นอุณหภูมิที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเผากากตะกอน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนแสดงให้เห็นว่ากากตะกอนจากโรงงาน (RCW-Plant) มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากพีคของเส้นกราฟ DTG อยู่ในช่วง $620 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 ในงานวิจัยของ Halikia et al. (2001) และ Li et al. (2013)



รูปที่ 4.38 ผลการสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนจากบ่อผสม

2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD

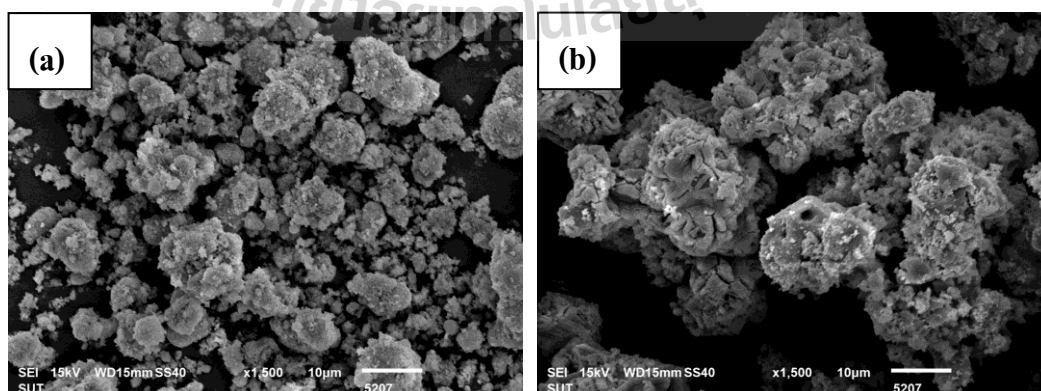
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.39 พบว่าองค์ประกอบหลักของตะกอนมีโครงสร้างผลึกที่ตรงกับ CaCO_3 และเมื่อทำการเผา กากตะกอนที่อุณหภูมิ 850°C จะได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งการวิเคราะห์พบ MgO ในตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เนื่องจากน้ำเกลือดิบมีไอออน Mg^{2+} ปะปนอยู่ เมื่อมีการเติมสารเคมีในการ กำจัดไอออนเจือปนจึงทำให้ไอออน Mg^{2+} เกิดการตกตะกอนออกมาในรูปของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ และ ปะปนอยู่กับตะกอน CaCO_3 อย่างไรก็ดี ถึงแม้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะมี MgO ปะปนอยู่กับ CaO แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา Transesterification ได้ เนื่องจากมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำ MgO ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล (Di Serio et al., 2006; Dossin et al., 2006)



รูปที่ 4.39 โครงสร้างผลึกของกากตะกอน (a) ก่อนเผา และ (b) หลังเผา

3) การวิเคราะห์ลักษณะของผลึกด้วยเทคนิค SEM

เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลึกเมื่อผ่านกระบวนการเผา จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.40 พบว่ารูปร่างผลึกมีลักษณะเป็นทรงกลม แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 °C พบว่า รูปร่างและขนาดของผลึกมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเผาทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ในกากตะกอนหายไปและเกิดการเชื่อมกันติดกันระหว่างผลึก ส่งผลให้ผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีขนาดใหญ่มากขึ้น (Lee et al., 2015; Xie and Zhao, 2013; Marinković et al., 2016)



รูปที่ 4.40 ลักษณะผลึกของ (a) กากตะกอนที่อบแห้งแล้ว กับ (b) ตัวเร่งปฏิกิริยา

4) การวิเคราะห์พื้นผิวของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย Surface analyzer

ในการวิเคราะห์พื้นผิวของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการดูดซับก๊าซ N_2 ที่อุณหภูมิ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K) ร่วมกับการประยุกต์ใช้สมการของ BET จากผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 4.8) พบว่า กากตะกอนจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $14.56\text{ m}^2/\text{g}$ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $1.71\text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่ง CaO/MgO ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณของพื้นผิวที่จำเพาะใกล้เคียงกับ CaO ที่เตรียมจากกากอุตสาหกรรม (Viriya-Empikul et al., 2012) สำหรับสาเหตุที่พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากากตะกอนสูงเกินไป จึงส่งผลให้เกิดการเชื่อมติดกันระหว่างผลึกขนาดเล็กและก่อตัวเป็นผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตะกอนที่ลดลงแสดงถึงค่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic activity) ที่ลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Marinković et al. (2016) ที่สรุปว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (973 K) อาจส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง

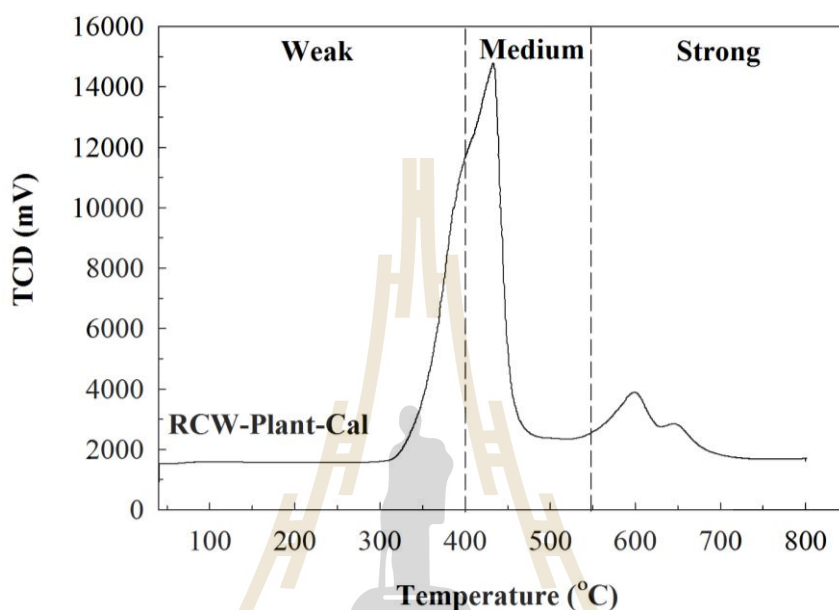
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในงานวิจัยนี้เทียบกับสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ของงานวิจัยอื่น ๆ

ชื่อตัวอย่าง	S_{BET} (m^2/g)	Pore diameter (\AA)	Pore volume (cm^3/g)
กากตะกอน	14.56	255.65	0.0930
ตัวเร่งปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้	1.71	133.55	0.0057
CaO จากกากอุตสาหกรรม (Viriya-Empikul et al., 2012)	0.9 - 1.1	-	0.005
CaO บริสุทธิ์ (Tan et al., 2015)	36.8	6.83	0.0126

5) การวิเคราะห์ตำแหน่งเบส (Basic site)

ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งเบสบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการคายซับก๊าซ CO_2 ($\text{CO}_2\text{-TPD}$) โดยอ้างอิงวิธีการวิเคราะห์และคำอธิบายตามงานวิจัยของ Viriya-empikul et al. (2012) จากงานวิจัยที่อ้างถึงนี้ ได้อธิบายถึงความแรงของค่าเบสในตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ คือ Weak basic site ที่อุณหภูมิช่วง $400\text{-}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ คือ Moderate basic site และที่อุณหภูมิมากกว่า $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ คือ Strong basic site จากการวิเคราะห์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้

เริ่มคายก๊าซ CO₂ ที่ดูดซับไว้ เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 300 °C และมีการคายซับต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิเข้าใกล้ 700 °C ดังรูปที่ 4.41 ดังนั้น ความแรงของค่าเบสในตัวเร่งปฏิกิริยานี้ประกอบด้วย Weak basic site, Moderate basic site และ Strong basic site ซึ่งปริมาณของค่าเบสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะมี Moderate basic site > Weak basic site > Strong basic site (ตารางที่ 4.8)



รูปที่ 4.41 การคายซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-TPD) บนตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้ มีการเปรียบเทียบปริมาณของค่าเบสรวมบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้กับ CaO ที่เตรียมได้จากงานวิจัยอื่น ๆ (ตารางที่ 4.9) พบว่า ปริมาณของค่าเบสรวมของ CaO ที่เตรียมได้จาก หอยจู้บแฉงยอดทู่ (Obtuse horn shell) จากงานวิจัยของ Lee et al. (2015) มีปริมาณมากกว่า CaO/MgO ที่เตรียมจากกากตะกอน ในขณะที่ CaO ที่เตรียมจากเปลือกไข่ไก่ (Eggshell) จากงานวิจัยของ Viriya-Empikul et al. (2012) มีปริมาณของค่าเบสรวมน้อยที่สุด จากการเปรียบเทียบสรุปได้ว่า CaO ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้สมบัติพื้นผิวที่ของ CaO มีค่าแตกต่างกัน (Petitjean et al., 2010)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณและความแรงของหมู่เบสบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ชื่อตัวอย่าง	Amount of basicity (mmol/g)			Total basicity (mmol/g)
	Weak <math><400^{\circ}\text{C}</math>	Medium $400\text{-}550^{\circ}\text{C}$	Strong $>550^{\circ}\text{C}$	
ตัวเร่งปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้	0.301	0.641	0.263	1.205
Eggshell (Viriya-Empikul et al., 2012)	0.01	0.023	0.161	0.194
Obtuse horn shell (Lee et al., 2015)	-	-	-	2.508 \pm 0.011

6) การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของ CaO/MgO จากกากตะกอน

หลังจากที่ได้ศึกษาสมบัติทางกายและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นแล้ว ได้นำ CaO/MgO ที่เตรียมจากกากตะกอนไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว จากการศึกษาค้นคว้าการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO/MgO จากกากตะกอนพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ประกอบด้วยกรดไลโนเลอิก (C18:2) 57.18% กรดปาล์มิติก (C16:0) 22.64% กรดโอเลอิก (C18:1) 12.92% กรดสเตียริก (C18:0) 3.2% และกรดชนิดอื่น ๆ 4.06% ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (C18:2 และ C18:1) มากกว่ากรดไขมันอิ่มตัว (C18:0 และ C16:0) ส่งผลให้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำและเป็นไขได้ง่าย และผลจากการวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า สมบัติความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน อาจเนื่องมาจากมีน้ำมันพืชที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาและกลีเซอรอลตกค้างอยู่ เพราะไบโอดีเซลที่ผลิตได้ยังไม่ผ่านกระบวนการทำบริสุทธิ์ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นและจุดวาบไฟที่วิเคราะห์ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO/MgO ที่ได้จากกากตะกอนของกระบวนการกำจัดไอออนก็สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา CaO/MgO สำหรับผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซล

Comp.	UCO		Mohammed-Dabo et al. (2012)		Biodiesel in this work
	This study	Omar et al. (2011)	Raw J. curcas oil	Biodiesel	
C14:0	1.28	0	0	0.17	1.35
C14:1	0.000	0	0	0	0.02
C15:0	0.05	0	0	0	0.05
C16:0	22.20	29.49	15.86	20.01	22.64
C16:1	2.13	0	0	2.83	1.38
C18:0	9.54	0	9.76	11.51	3.21
C18:1	42.58	61.43	37.13	17.86	12.92
C18:2	18.32	9.08	37.24	44.95	57.18
Trace	3.90	0	0	2.67	1.25

ตารางที่ 4.11 สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เทียบกับงานวิจัยอื่น

สมบัติที่วิเคราะห์	น้ำมันไบโอดีเซล ที่ผลิตได้	EN 14214	Çetinkaya et al. (2004)
ความหนืด ที่ 40 °C (cSt)	8.01	3.5-5.0	5.29 - 6.46
ความหนาแน่น ที่ 25 °C (g/ml)	0.8600	0.86 - 0.9	0.8823 - 0.8874
จุดวาบไฟ (°C)	172	>120	176

4.8 การประเมินต้นทุนการผลิตเกลือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน

จากแนวทางการป้องกันการเกิดตะกรันที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.6 การเพิ่มปริมาณสารเคมีสำหรับกำจัดไอออน ได้ถูกเลือกเป็นแนวทางที่เสนอให้โรงงานนำไปประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันการเกิดตะกรัน เนื่องจากการกำจัดไอออนด้วยสารเคมีเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบกับปัจจุบันทางโรงงานดำเนินการอยู่แล้ว จึงเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยแผนผังกระบวนการผลิตเกลือเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการกำจัดไอออนแสดงในรูปที่ 4.42 สำหรับการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือด้วยแผ่นงานคำนวณ (Worksheet) จากโปรแกรม Microsoft excel เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีสำหรับกำจัดไอออน เพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับนำไปประกอบการตัดสินใจในการนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงานจะใช้ข้อมูลพื้นฐานดังนี้

4.8.1 ข้อมูลสำหรับการประเมินต้นทุนการผลิตเกลือ

1) ข้อมูลของอุปกรณ์ที่จะติดตั้งเพิ่ม

ถังตกตะกอน (Clarifier) :

ขนาดของถังเท่ากับ 35 m^3

อัตราการไหลของน้ำเกลือเข้าถังเท่ากับ $25 \text{ m}^3/\text{h}$

ระยะเวลาในการปล่อยตะกอน 1 ชั่วโมง

เครื่องรีดตะกอน (Decanter) :

น้ำเกลือในกากตะกอน 5%

2) ข้อมูลสำหรับการหาต้นทุนการผลิตเกลือ (ข้อมูลจากบริษัทสยามทรัพย์มณี)

กำลังการผลิตเกลือ :

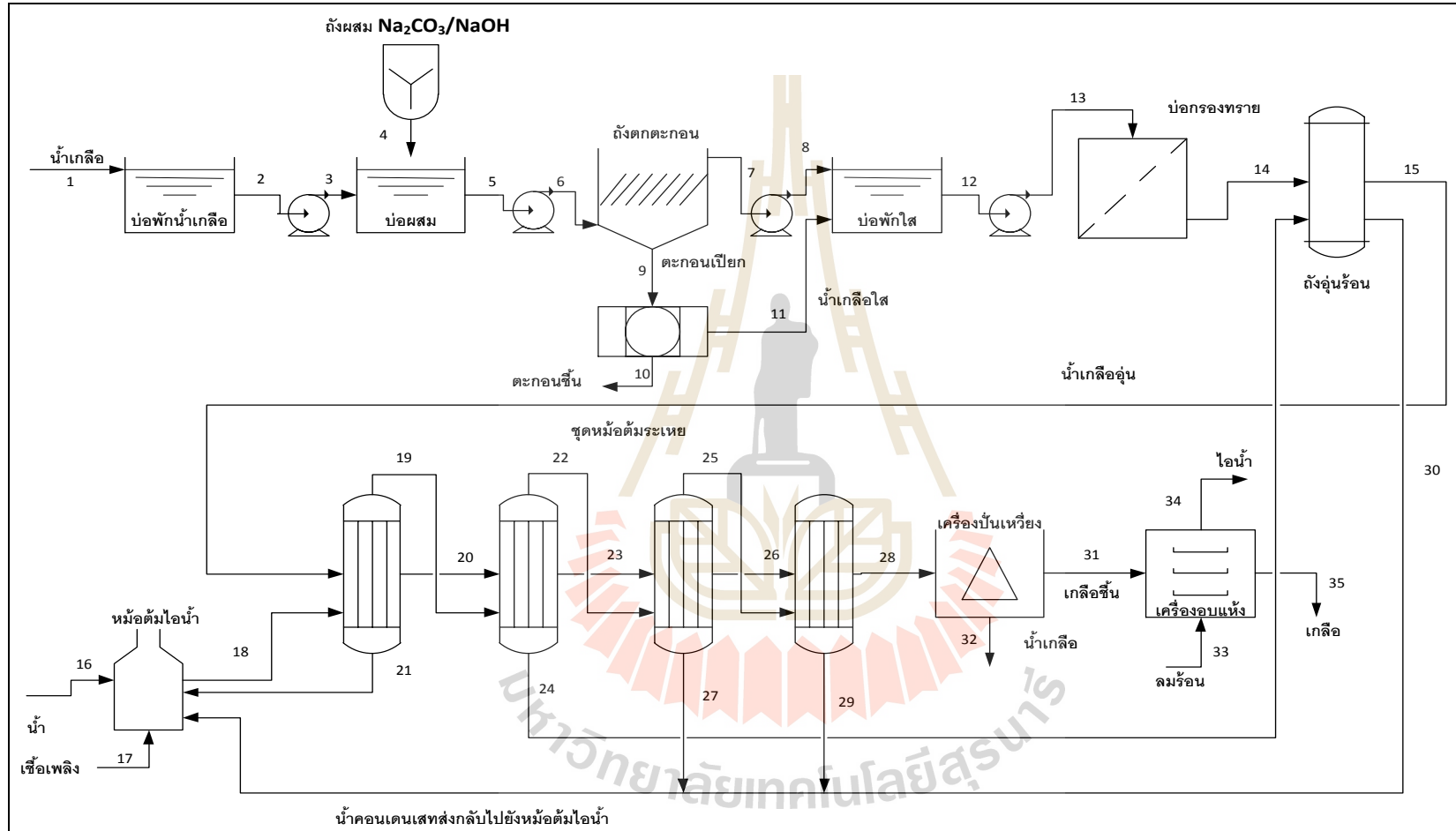
กำลังการผลิตเกลือของบริษัทสยามทรัพย์มณีเท่ากับ 40,000 ตันต่อปี

รายละเอียดของน้ำเกลือและสารเคมีที่ใช้ :

1) น้ำเกลือดิบจากแหล่งน้ำใต้ดิน มีปริมาณไอออน $\text{Ca}^{2+} = 1,682.62 \text{ mg/L}$
 $\text{Mg}^{2+} = 2,491.77 \text{ mg/L}$ และ $\text{SO}_4^{2-} = 3,702.75 \text{ mg/L}$

2) สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 50 wt.% ความหนาแน่น 1.52 g/mL
 ราคา 7.25 บาทต่อกิโลกรัม

3) สาร Na_2CO_3 เกรดอุตสาหกรรม ราคา 8.80 บาทต่อกิโลกรัม



รูปที่ 4.42 กระบวนการผลิตเกลือที่มีการเพิ่มสารเคมีในการกำจัดไอออนเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนในหม้อเคียวสุญญากาศ

กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ :

น้ำเกลือดิบจะถูกสูบเข้าบ่อ 400 m³ ต่อการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ 1 ครั้ง

อัตราการป้อนน้ำเกลือเข้าสู่กระบวนการผลิตเกลือ:

น้ำเกลือขาเข้าถึงอุ่นร้อนมีอัตราการไหลเท่ากับ 25 m³/h

ต้นทุนต่าง ๆ :

ต้นทุนไอน้ำเท่ากับ 573 บาทต่อตันเกลือ

ต้นทุนอื่น ๆ เท่ากับ 1,000 บาทต่อตันเกลือ

สถานะในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ:

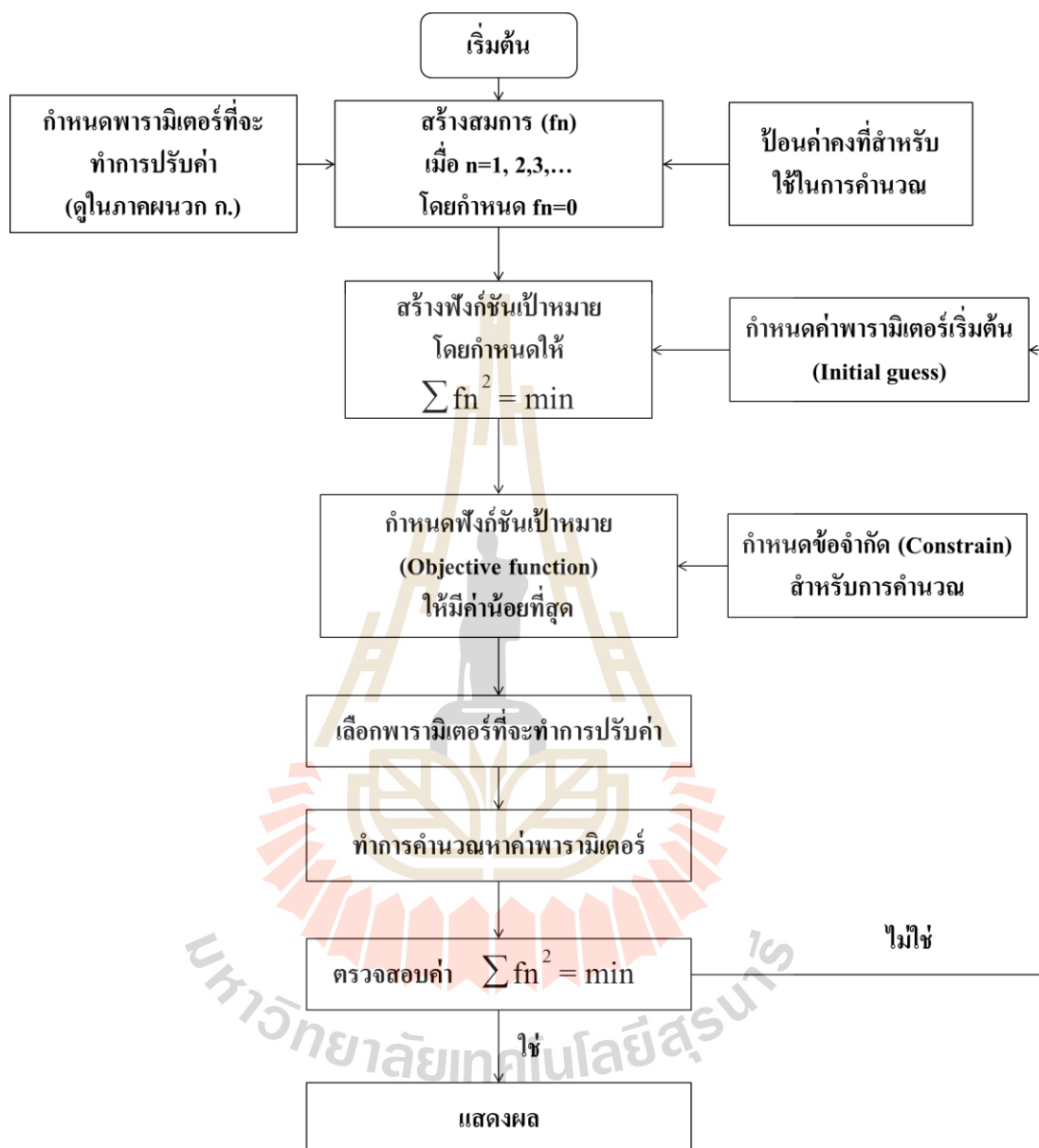
สถานะที่เลือกใช้ในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือคือสถานะ SC-SH (การใช้สารเคมีในปริมาณที่เท่ากับสัดส่วนของไอออน Ca²⁺ และ Mg²⁺) โดยสถานะนี้สามารถกำจัดไอออนทั้งสองได้ร้อยละ 80

4.8.2 การสร้างแบบจำลองในการคำนวณห้อยู่เกี่ยวข้อง โดยใช้โปรแกรม Excel

ขั้นตอนของการคำนวณห้อยู่เกี่ยวข้อง เป็นการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งกับกระบวนการต้มระเหยน้ำเกลือ โดยการคำนวณจะใช้ Linear optimization model tools ของโปรแกรม Microsoft excel ที่ชื่อว่า Solver โดยขั้นตอนของการคำนวณมีดังนี้

- (1) นำข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณมาสร้างเป็นตารางใน Worksheet "Solver"
- (2) กำหนดพารามิเตอร์คงที่ ที่ใช้ในการคำนวณ
- (3) กำหนดพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้ สำหรับการคำนวณโดยโปรแกรม Solver
- (4) พิมพ์สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณลงใน Worksheet "Solver" โดยกำหนดให้ $f_n=0$ (f_n คือ สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ)
- (5) ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Solver จะต้องเลือกฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ซึ่งเป็นค่าที่ผู้คำนวณต้องการ อาจกำหนดให้มีค่าสูงสุด (Max) มีค่าน้อยสุด (Min) หรือมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ โดยงานวิจัยนี้ เลือกผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งกำหนดให้มีค่าน้อยที่สุด ($f_n^2=\min$) เนื่องจากต้องการได้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
- (6) เมื่อกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายแล้ว จะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Changing variable) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) เป็นไปตามที่ตั้งไว้
- (7) กำหนดข้อจำกัดต่าง ๆ เพื่อให้การคำนวณด้วยการ Optimization ให้คำตอบที่สมเหตุสมผล

จากขั้นตอนของการคำนวณทั้งหมด สามารถอธิบายได้ด้วยแผนผัง ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 แผนผังแสดงวิธีการทำ Optimization ของแบบจำลองการคำนวณหม้อเคียวสุญญากาศ

4.8.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณต้นทุนการผลิตเกลือ มีขั้นตอนดังนี้

(1) ป้อนข้อมูลน้ำเกลือดิบ ได้แก่ ปริมาณน้ำเกลือดิบที่เข้าบ่อ ค่าปริมาณ ไอออน Ca^{2+} ไอออน Mg^{2+} ไอออน SO_4^{2-} และค่าความเค็มของน้ำเกลือ (หน่วยโบเม) ลงในช่องสีขาวของชีท Production เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ ดังรูปที่ 4.44

(2) เมื่อกรอกข้อมูลแล้ว ดังรูปที่ 4.44 แล้ว ให้กดปุ่ม “คำนวณ” เพื่อทำการคำนวณ ด้วยคำสั่ง VBA ที่เขียนไว้แล้ว เมื่อคำนวณเสร็จแล้ว หน้าจอจะแสดงผลดังรูปที่ 4.45

(3) เมื่อคำนวณส่วนของกระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลบางส่วนจะถูกส่งมายังส่วนกระบวนการผลิตเม็ดเกลือ ซึ่งอยู่ในชีท Production แต่เนื่องจากน้ำเกลือที่เข้ามาในแต่ละวัน จะมีความเค็มไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงต้องมีการคำนวณชุดหม้อเคี้ยวก่อน โดยกดที่ปุ่ม “คำนวณชุดหม้อเคี้ยว”

(4) เมื่อกดปุ่ม “คำนวณชุดหม้อเคี้ยว” โปรแกรมจะลิงก์ไปยังชีท Solver เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชุดหม้อเคี้ยว ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องกรอกลงใน “ข้อมูลในส่วนที่ 1. ข้อมูลที่ต้องการกรอกค่าจากผู้ใช้งาน” เมื่อกรอกข้อมูลเสร็จแล้ว ให้กดปุ่ม “ลบข้อมูล” ตามด้วยกดปุ่ม “คัดลอกค่าเริ่มต้น” 2 ครั้ง จากนั้นกดปุ่ม “คำนวณ” โปรแกรมจะเริ่มคำนวณ และเมื่อขึ้นหน้าต่าง Solver results ดังรูปที่ 4.47 ให้กด OK

(5) เมื่อกด OK แล้ว ให้เลือกชีท Report ซึ่งชีทนี้จะรวบรวมผลที่แสดงในชีท Production ซึ่งข้อมูลจะเรียงตาม Stream number โดยหน้าต่างแสดงผลของชีท Report แสดงในรูปที่ 4.48

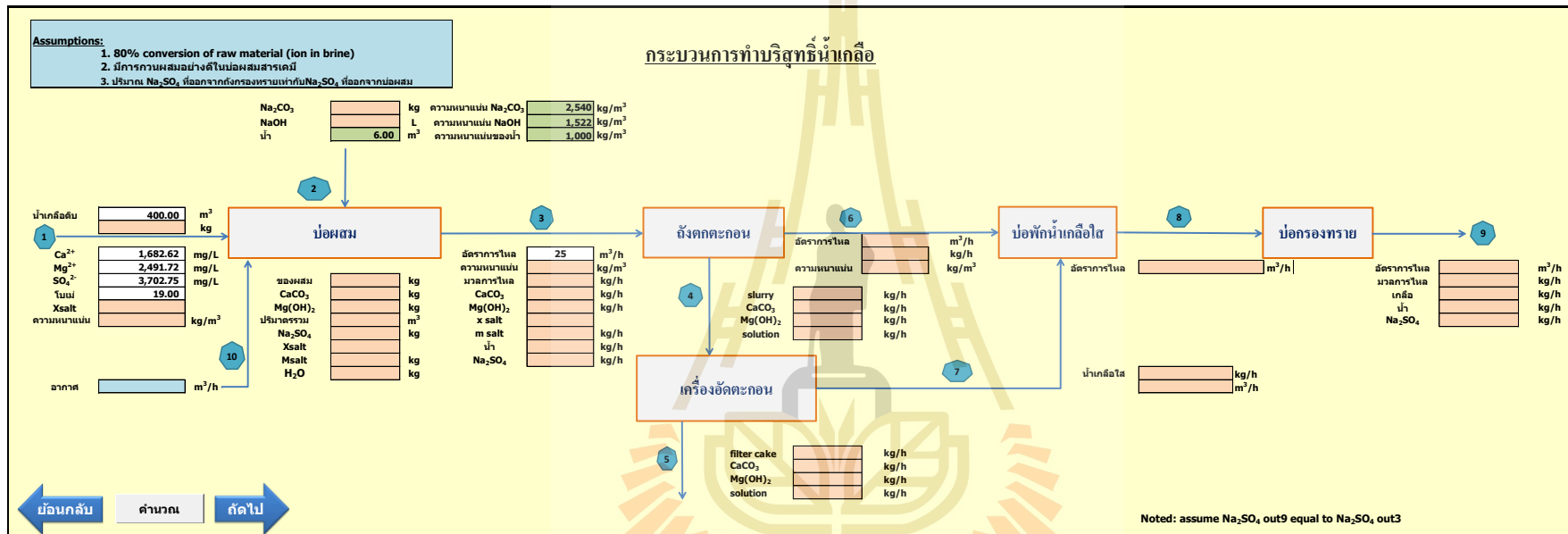
(6) เมื่อต้องการทราบต้นทุนในการผลิตเกลือ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน ให้เลือกชีท Cost ซึ่งจะแสดงผลการประเมินต้นทุนต่าง ๆ ที่ใช้ ตลอดจนจรรยาบรรณที่ได้จากการจำหน่ายเกลือ ในระยะเวลา 1 ปี ดังรูปที่ 4.49

4.8.4 ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ

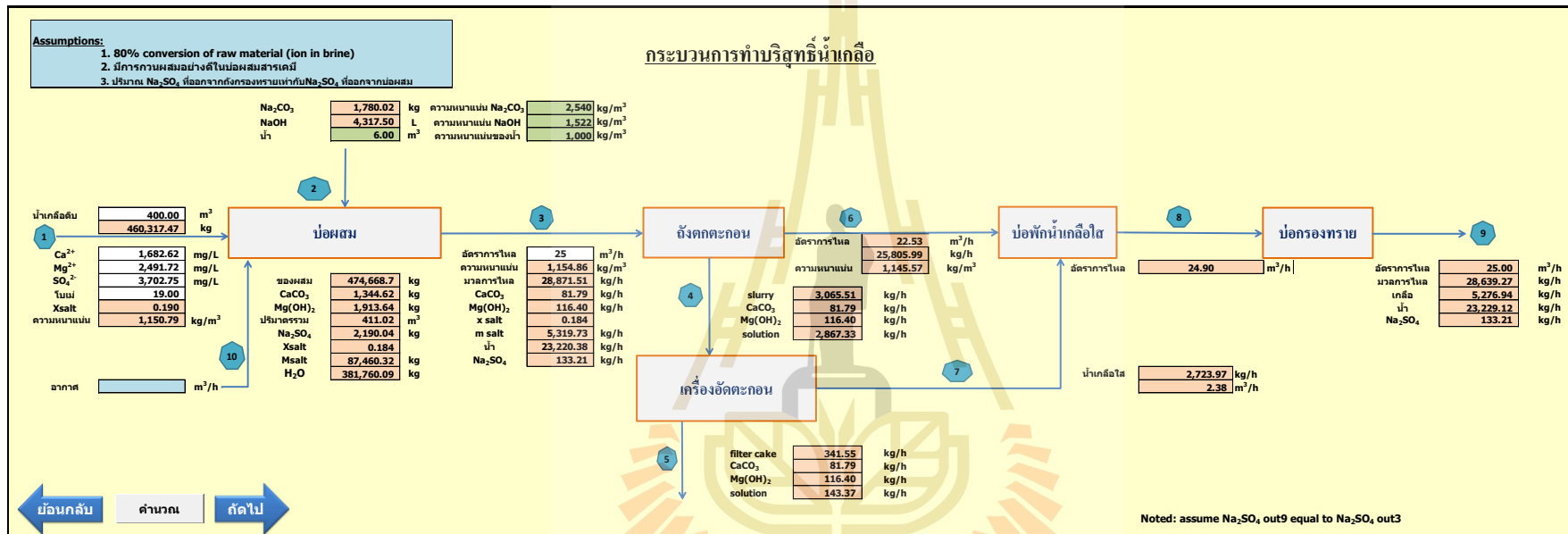
จากการคำนวณหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชุดหม้อเคี้ยวด้วยโปรแกรม Solver พบว่า มีค่าความคาดเคลื่อนจากการแก้สมการอยู่ 1 จุด มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 13% ซึ่งถือว่าไม่ผลต่อความน่าเชื่อถือของโปรแกรมพอสมควร แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการคำนวณ พบว่าโปรแกรมนี้ยอมรับได้สำหรับการประมาณค่าต้นทุนในการผลิตเกลือ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์หลักที่ได้จากการคำนวณขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตเป็นหลัก ซึ่งกำลังการผลิตเป็นค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้น ผลของการประเมินต้นทุนด้วยโปรแกรมนี้สามารถให้ผลที่ยอมรับได้ ดังนั้น จากตัวอย่างการประเมินต้นทุนในการผลิต

และรายได้สุทธิที่ได้จากการขายเกลือภายใน 1 ปี พบว่า การผลิตเกลือจากน้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไอออนด้วยปริมาณสารเคมีที่เพิ่มขึ้น จะช่วยลดปัญหาของการเกิดตะกอนได้โดยที่ไม่เกิดการขาดทุน

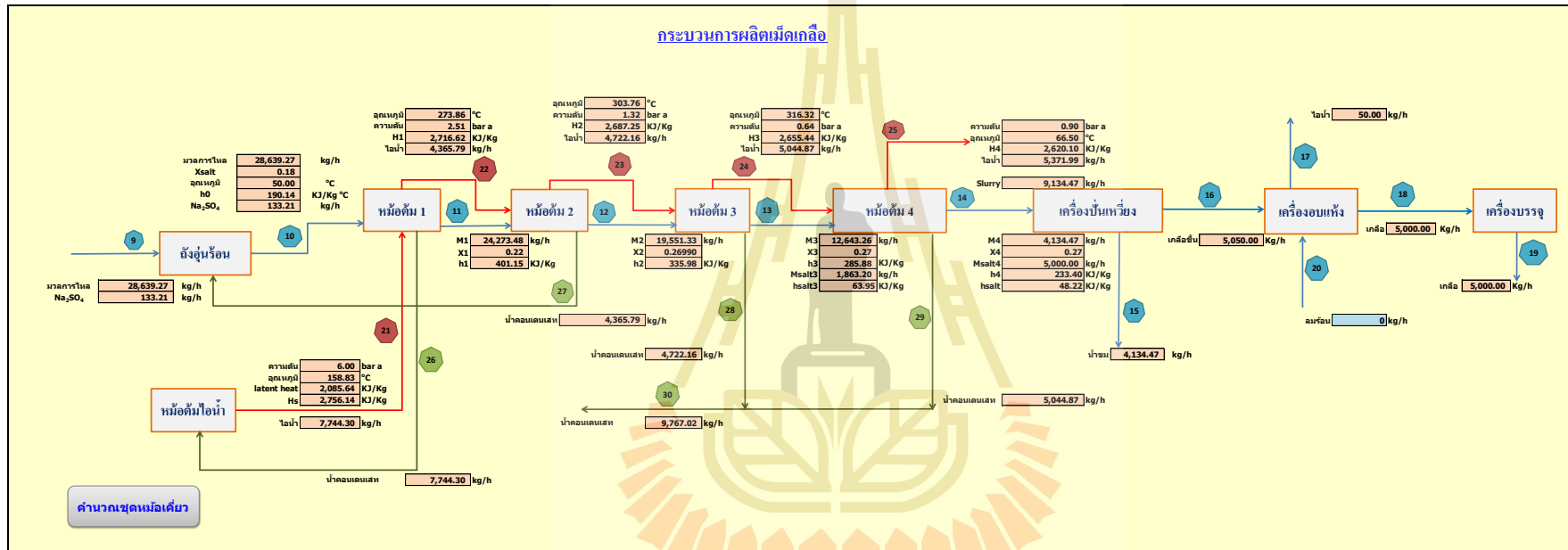




รูปที่ 4.44 การกรอกข้อมูลสำหรับคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออนตามสภาวะ SC-SH



รูปที่ 4.45 การแสดงผลการคำนวณของส่วนกระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ



รูปที่ 4.46 หน้าต่างแสดงผลของการคำนวณชุดหม้อต้มเดี่ยวของส่วนกระบวนการผลิตเม็ดเกลือ

1. ข้อมูลที่ต้องกรอกค่าจากผู้ใช้งาน

ความถี่ของโรงงาน	Ps
อุณหภูมิน้ำเกลือขาเข้า	T0
ความถี่ของน้ำเกลือขาเข้า	P0
ปริมาณเกลือของเกลือขาออก E4	X4
ความถี่ขาออก E4	P4
สิ้นประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม E1	U1
E2	U2
E3	U3
E4	U4
อุณหภูมิขาออกหน่วย 1	T1
อุณหภูมิขาออกหน่วย 2	T2
อุณหภูมิขาออกหน่วย 3	T3

2. ข้อมูลจากการคำนวณ

Solver Results

Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.

Keep Solver Solution

Restore Original Values

Return to Solver Parameters Dialog

Outline Reports

OK Cancel Save Scenario...

Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.

When the GRG engine is used, Solver has found at least a local optimal solution. When Simplex LP is used, this means Solver has found a global optimal solution.

ปริมาณเกลือของจากหน่วย 4 Msalt4 5000.00 kg/h

3. การคำนวณ

Unknowns	Value	unit	Functions	Value	Value
V0	7744.30	kg/h	f1	0.00	0.0000
M1	24273.48	kg/h	f2	0.02	0.0004
M2	19551.33	kg/h	f3	0.02	0.0004
M3	12643.26	kg/h	f4	0.02	0.0004
M4	4134.47	kg/h	f5	0.00	0.0000
A1	296.54	m ²	f6	0.02	0.0004
A2	273.86	m ²	f7	0.02	0.0004
A3	303.76	m ²	f8	0.02	0.0004
A4	316.32	m ²	f9	0.00	0.0000
X1	0.22		f10	0.02	0.0004
X2	0.27		f11	0.02	0.0004
Msalt3	1863.20	kg/h	f12	0.02	0.0004
V1	4365.79	kg/h	f13	0.00	0.0000
V2	4722.16	kg/h	f14	-839.42	704634.2418
V3	5044.87	kg/h	f15	0.02	0.0004
V4	5371.99	kg/h	f16	0.02	0.0004
			error	-839.20	704634.25

initial guess

V0	9381.62
M1	22798.69
M2	16958.11
M3	10118.82
M4	276.94
A1	359.24
A2	366.37
A3	375.70
A4	366.22
X1	0.20
X2	0.22
Msalt3	998.70
V1	5840.58
V2	5840.58
V3	5840.58
V4	5840.58

วิธีการหา initial guess

$\Delta T1 = (T3 - T4) / 4$

$\Delta T1 = \Delta T2 = \Delta T3 = \Delta T4$

10118.82

$\Delta T1 = T3 - T1$ 23.08

$\Delta T2 = T1 - T2$ 23.08

$\Delta T3 = T2 - T3$ 23.08

$\Delta T4 = T3 - T4$ 23.08

$V_{tot} = M0 - M4 - Msalt$

$V_{tot} = 23362.33$

ลบข้อมูล คัดลอกค่าเริ่มต้น คำนวณ ย้อนกลับ

รูปที่ 4.47 การคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชุดหม้อไอน้ำด้วยวิธีการ Optimization ด้วยโปรแกรม Solver

Basis : น้ำเกลือดิบ 400 m ³				Stream No.	รายการ	ค่า	หน่วย	Stream No.	รายการ	ค่า	หน่วย
ตารางที่ 1 สรุปภาพรวมต้นทุนในการผลิตเกลือและรายได้รวมสุทธิ				11	อัตราการไหลเชิงมวล	24,273.48	kg/h	26	น้ำคอนเดนเสท	7,744.30	kg/h
					สัดส่วนมวลของเกลือ	0.22		27	น้ำคอนเดนเสท	4,365.79	kg/h
Stream No.	รายการ	ค่า	หน่วย	12	ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	401.15	kJ/kg	28	น้ำคอนเดนเสท	4,722.16	kg/h
1	ปริมาณน้ำเกลือดิบเข้าบ่อ	400.00	m ³		อัตราการไหลเชิงมวล	19,551.33	kg/h	29	น้ำคอนเดนเสท	5,044.87	kg/h
	ค่าไอออนแคลเซียม	1,682.62	mg/L		สัดส่วนมวลของเกลือ	0.27		30	น้ำคอนเดนเสท	9,767.02	kg/h
	ค่าไอออนแมกนีเซียม	2,491.72	mg/L		ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	335.98	kJ/kg				
	ค่าไอออนซัลเฟต	3,702.75	mg/L	13	อัตราการไหลเชิงมวล	12,643.26	kg/h				
	ค่าโบรมีน (ค่าความเข้มข้น)	19.00	Be ^o		สัดส่วนมวลของเกลือ	0.27					
	ค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือ	1,150.79	kg/m ³		ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	285.88	KJ/Kg				
	ค่าสัดส่วนมวลของเกลือ	0.19			ปริมาณเกลือจากหม้อ 3	1,863.20	kg/h				
2	ปริมาณสารโซเดียมคลอไรด์บอหนด	1,780.02	kg		ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	63.95	KJ/Kg				
	ปริมาณสารโซเดียมไฮดรอกไซด์	4,317.50	L	14	อัตราการไหลเชิงมวล	4,134.47	kg/h				
3	อัตราการไหล	25.00	m ³ /h		สัดส่วนมวลของเกลือ	0.27					
	อัตราการไหลเชิงมวล	28,871.51	kg/h		ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	5,000.00	kg/h				
	ความหนาแน่น	1,154.86	kg/m ³		ปริมาณเกลือ	233.40	KJ/Kg				
	ปริมาณตะกอนแคลเซียมคลอไรด์บอหนด	81.79	kg/h		ค่าเอนทัลปีของเกลือ	48.22	KJ/Kg				
	ปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	116.40	kg/h	15	น้ำขม	4,134.47	°C				
	ค่าสัดส่วนมวลของเกลือ	0.18	kg/h		เกลือขึ้น	5,050.00	kJ/kg				
Stream No.	รายการ	ค่า	หน่วย	16	เกลือขึ้น	5,050.00	kJ/kg				
4	ปริมาณตะกอนแคลเซียมคลอไรด์บอหนด	81.79	kg/h		ไอ้หน้า	50.00	bar a				
	ปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	116.40	kg/h		เกลือขึ้นเครื่องบรรจุ	5,000.00	kJ/kg				
	ปริมาณน้ำเกลือที่ปนกับตะกอน	2,867.33	kg/h	17	เกลือออกจากเครื่องบรรจุ	5,000.00	kg/h				
5	ปริมาณของผสมรวม	341.55	kg/h		Stream No.	รายการ	ค่า	หน่วย			
	ปริมาณตะกอนแคลเซียมคลอไรด์บอหนด	81.79	kg/h	21	ความดัน	6.00	bar a				
	ปริมาณตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	116.40	kg/h		อุณหภูมิ	158.83	°C				
	ปริมาณน้ำเกลือที่ปนกับตะกอน	2,867.33	kg/h		ค่าความร้อนแฝงของสารกลายเป็นไอ	2,085.64	KJ/Kg				
6	อัตราการไหล	22.53	m ³ /h		ค่าเอนทัลปีของไอ้หน้า	2,756.14	KJ/Kg				
	อัตราการไหลเชิงมวล	25,805.99	kg/h		ปริมาณไอ้หน้าที่ใช้	7,744.30	kg/h				
	ความหนาแน่น	1,145.57	kg/m ³	22	อุณหภูมิ	273.86	°C				
7	อัตราการไหล	2.38	m ³ /h		ความดัน	2.51	bar a				
	อัตราการไหลเชิงมวล	2,723.97	kg/h		ค่าเอนทัลปีของไอ้หน้า	2,716.62	KJ/Kg				
8	อัตราการไหล	24.90	m ³ /h	23	อุณหภูมิ	303.76	°C				
	อัตราการไหลเชิงมวล	28,639.27	kg/h		ความดัน	1.32	bar a				
9	อัตราการไหล	25.00	m ³ /h		ค่าเอนทัลปีของไอ้หน้า	2,687.25	KJ/Kg				
	อัตราการไหลเชิงมวล	28,639.27	kg/h	24	อุณหภูมิ	316.32	°C				
	ปริมาณน้ำเกลือ	28,506.06	kg/h		ความดัน	0.64	bar a				
	ปริมาณโซเดียมซัลเฟต	133.21	kg/h		ปริมาณไอ้หน้า	4,722.16	kg/h				
10	อัตราการไหลเชิงมวล	28,639.27	kg/h	25	อุณหภูมิ	0.90	°C				
	ค่าสัดส่วนมวลของเกลือ	0.18			ความดัน	66.50	bar a				
	อุณหภูมิ	50.00	°C		ค่าเอนทัลปีของไอ้หน้า	2,620.10	KJ/Kg				
	ค่าเอนทัลปีของน้ำเกลือ	133.21	kJ/kg		ปริมาณไอ้หน้า	5,371.99	kg/h				

รูปที่ 4.48 หน้าต่างแสดงผลจากการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากซีท Production

ตารางที่ 2 ข้อมูลสารเคมีและค่าใช้จ่ายอื่นๆ			ตารางที่ 4 ต้นทุนและรายได้สุทธิ สำหรับน้ำเกลือดิบ 400 m ³			หมายเหตุ กำหนดให้ 1 ปี สามารถผลิตเกลือได้ <input type="text" value="350"/> วัน หรือ <input type="text" value="8400"/> ชั่วโมง
รายการ	ราคา	ราคา/หน่วย	รายการ	ราคา	หน่วย	
สารโซดาแอซ (Na ₂ CO ₃)	8.80	บาท/กิโลกรัม	ค่าสารโซเดียมคาร์บอเนต	15,664.15	บาท	น้ำเกลือ <input type="text" value="400"/> m ³ ผลิตเกลือได้ <input type="text" value="16"/> ชั่วโมง
สารโซดาไฟ (NaOH)	7.25	บาท/กิโลกรัม	ค่าสารโซเดียมไฮดรอกไซด์	47,641.51	บาท	
ต้นทุนไอน้ำ	573.00	บาท/ตันเกลือ	ค่าไอน้ำ	45,840.00	บาท	ดังนั้น <input type="text" value="1"/> ปี จะต้องบำบัดน้ำเกลือ <input type="text" value="210,000.00"/> m ³
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	1,000.00	บาท/ตันเกลือ	ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	80,000.00	บาท	
ราคาเกลือ	3,000.00	บาท/ตันเกลือ	รวมค่าใช้จ่ายในการผลิตเกลือ	189,145.66	บาท	
ราคาตะกอนเปียก	500.00	บาท/ตันเกลือ	รายได้จากการขายเกลือ	240,000.00	บาท	
			รายได้จากการขายตะกอน	1,629.13	บาท	
			รายได้สุทธิ	52,483.47	บาท	
ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรสำหรับคำนวณต้นทุน			ตารางที่ 5 สรุปต้นทุนและรายรับสุทธิต่อปี (ค่าประมาณ)			
รายการ	ค่า	หน่วย	รายการ	ราคา	หน่วย	
น้ำเกลือดิบเข้าบ่อ	400.00	m ³	ค่าสารโซเดียมคาร์บอเนต	8,223,679.52	บาท/ปี	
ปริมาณเกลือสกัดจากน้ำเกลือดิบ	87,460.32	kg	ค่าสารโซเดียมไฮดรอกไซด์	25,011,791.51	บาท/ปี	
ปริมาณเกลือที่ผลิตได้จริง	80,000.00	kg	ค่าไอน้ำ	24,066,000.00	บาท/ปี	
โซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้	1,780.02	kg	ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	42,000,000.00	บาท/ปี	
โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้	6,571.24	kg	รวมค่าใช้จ่ายในการผลิตเกลือ	99,301,471.02	บาท/ปี	
ปริมาณตะกอนรวม	3,258.26	kg	รายได้จากการขายเกลือ	126,000,000.00	บาท/ปี	
ไอน้ำที่ใช้	123,908.81	kg	รายได้จากการขายตะกอน	855,293.06	บาท/ปี	
**หมายเหตุ : ข้อมูลในตารางที่ 3 คำนวณจากน้ำเกลือ 400 m ³			รายได้สุทธิ	27,553,822.04	บาท/ปี	

รูปที่ 4.49 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาการเกิดตะกรันในหม้อต้มน้ำสุญญากาศของกระบวนการผลิตเกลือ นำมาสู่การศึกษา สาเหตุของการเกิดตะกรันและศึกษาแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน พร้อมทั้งเสนอแนะวิธีการป้องกัน สำหรับนำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน และทำการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือ โดยผลของการศึกษาและทดลองสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเกลือดิบ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำเกลือดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเกลือ พบว่าประกอบด้วยไอออนโซเดียม (Na^+) และคลอไรด์ (Cl^-) เป็นหลัก และมีไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) เป็นไอออนเจือปน ซึ่งไอออนทั้งสามชนิดนี้ ล้วนเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรัน ได้ทั้งหมด

5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรัน

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกรันพบว่า ตะกรันที่เกิดในหม้อต้มน้ำสุญญากาศ มีสาเหตุมาจากสารประกอบของแมกนีเซียม (Mg) เป็นหลัก แต่ในน้ำเกลือมีไอออนอื่นที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันด้วย ดังนั้น เพื่อลดต้นเหตุของการเกิดตะกรัน ควรมีการกำจัดไอออน Mg^{2+} และไอออน Ca^{2+} ออกจากน้ำเกลือ ก่อนนำน้ำเกลือไปต้มเข้าสู่หม้อต้มน้ำสุญญากาศ

5.1.3 การกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือดิบ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

จากผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออนเจือปนในน้ำเกลือ สรุปได้ว่าการใช้สารตามสัดส่วนของโรงงาน (สภาวะ PC-PH) สามารถกำจัดไอออน Ca^{2+} ได้ประมาณร้อยละ 70 และกำจัดไอออน Mg^{2+} ได้เพียงร้อยละ 20 แต่เมื่อใช้สารในสัดส่วนที่เท่ากับปริมาณของไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} (สภาวะ SC-SH) จะกำจัดไอออน Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้สูงถึงร้อยละ 80 ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารเคมีเป็นการเพิ่มปริมาณการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ตกตะกอนได้มากขึ้น ในขณะที่ลำดับของการเติมสารเคมีไม่มีผลต่อการกำจัดไอออนเจือปน

สำหรับการศึกษาผลกระทบของ CO_2 ที่มีต่อการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม พบว่าเมื่อน้ำเกลือมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้มีการสูญเสียก๊าซ CO_2 ซึ่งส่งผลให้สมมูลคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงและอาจอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของสารก่อตะกรัน แต่หากมีการเติมก๊าซ CO_2 หรือการควบคุมปริมาณ CO_2 ในน้ำเกลือได้ จะสามารถรักษาสภาวะของน้ำเกลือให้มีค่า pH ต่ำกว่าค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของสารก่อตะกรันได้

5.1.4 การแยกตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือ (ระดับห้องปฏิบัติการ)

จากผลการศึกษาแนวทางในการแยกตะกอนที่เกิดขึ้น จากกระบวนการกำจัดไอออนด้วยวิธีการทางเคมีได้ข้อสรุปดังนี้ ในการแยกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไอออน พบว่าการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการตกตะกอนในท่อเอียงจะช่วยลดระยะเวลาในการตกตะกอนได้ สำหรับผลการแยกตะกอนตกค้างขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำเกลือที่กำจัดไอออนแล้วด้วยวิธีการอุ่นร้อน พบว่าการอุ่นร้อนสามารถแยกตะกอนตกค้างในน้ำเกลือได้ เพราะสมบัติการละลายได้ของตะกอนตกค้างในน้ำเกลือจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน และผลของน้ำเกลือที่สุ่มเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานที่มีต่อการลดปริมาณตะกอนตกค้างในน้ำเกลือ พบว่าการเติมสารช่วยเร่งตกตะกอนและการเพิ่มระยะเวลาในการตกตะกอนที่มากขึ้น สามารถลดปริมาณของตะกอนที่ตกค้างในน้ำเกลือได้ สำหรับการอุ่นร้อนน้ำเกลือที่สุ่มเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงงานผลิตเกลือ พบว่าปริมาณตะกอนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือจากจุดเก็บตัวอย่างจะมีค่าลดลงตามลำดับอุปกรณ์ดังนี้ ถังอุ่นร้อน < ถังกรองทราย < บ่อพักน้ำเกลือใส < บ่อบำบัด และเมื่อคำนวณปริมาณของตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นความหนาของตะกรันในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม พบว่าตะกรันจะมีความหนาประมาณ 0.02-0.07 มิลลิเมตรต่อวัน สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแสดงให้เห็นว่าตะกอนที่แยกได้จากการอุ่นร้อนมีโครงสร้างผลึกเป็นสารประกอบจำพวกแคลไซต์แมกนีเซียม ส่วนการแยกตะกอนด้วยการเติมตัวล่อผลึกพบว่า วิธีการนี้ไม่มีผลต่อการตกตะกอนของตะกอนตกค้างในน้ำเกลือบำบัด เพราะความเข้มข้นของไอออนไม่ได้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดที่มากพอต่อการตกผลึก

5.1.5 การเสนอแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรัน

จากแนวทางในการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมของกระบวนการผลิตเกลือที่ได้เสนอไปทั้งหมด 7 แนวทาง ประกอบด้วย การเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไอออน การเติมสารช่วยเร่งตกตะกอน การใช้ถังตกตะกอนแบบ Lamellar ร่วมกับการอุ่นร้อน การปรับตำแหน่งระหว่างบ่อกรองทรายกับถังอุ่นร้อน การเติมตัวล่อให้เกิดการตกตะกอน การเติมสารป้องกันการเกิดตะกรัน (Anti-scaling) และการใช้เทคโนโลยีคอลลอยด์-เอ-ตรอน จากแนวทาง

ทั้งหมดที่ได้เสนอไปนั้น แนวทางที่สามารถดำเนินการได้ง่ายและเป็นการแก้ไขปัญหาที่สาเหตุของการเกิดตะกรันคือการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการกำจัดไออน โดยแนวทางที่เสนอให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ จะต้องมีการเพิ่มหน่วยแยกตะกอนออกจากน้ำเกลือ เพื่อนำกากตะกอนไปเพิ่มมูลค่า แทนการปล่อยทิ้ง

5.1.6 การศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรัน

ในการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรัน พบว่า มีกลไกของการเกิดตะกรัน 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 การเดือดแบบฟองทำให้เกิดสภาวะอิมพัลส์ยวดยวดยวรอบฟอง ขั้นที่ 2 เกิดผลึกของสารก่อตะกรันรอบผิวฟอง ขั้นที่ 3 การรวมตัวของผลึก ขั้นที่ 4 ผลึกที่ผิวฟองหลุดและตกสะสมที่ผิวท่อ ขั้นที่ 5 ฟองหลุดออกจากท่อ จากผลการศึกษาการเกิดตะกรัน โดยใช้ น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของไออนแตกต่างกัน พบว่าปริมาณตะกรันที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเกลือที่แตกต่างกัน มีค่าดังนี้ น้ำเกลือดิบ > น้ำเกลือ PC-PH > น้ำเกลือ SC-SH สำหรับการป้องกันการเกิดตะกรันโดยการใช้สารกัวร์กัม (Guar gum) พบว่าสารกัวร์กัมสามารถป้องกันการเกิดตะกรันได้ โดยสารชนิดนี้จะจับตะกอนไว้และสร้างเป็นชั้นเจลเกาะกับผนังท่อ ทำให้ของแข็งไม่สามารถเกาะติดที่ผนังท่อได้โดยตรง แต่การใช้สารกัวร์เพื่อป้องกันการเกิดตะกรัน จะส่งผลให้เกลือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำลง จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของของแข็งที่เกิดขึ้นจากการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดตะกรันพบว่า ของแข็งที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเกลือดิบเป็นสาร CaSO_4 ในขณะที่ของแข็งที่เกิดจากการใช้น้ำเกลือที่ผ่านการกำจัดไออนแล้ว มีโครงสร้างเป็นออสติฐาน ทำให้ไม่สามารถระบุชนิดของสารได้อย่างชัดเจน แต่เบื้องต้นสรุปได้ว่าของแข็งที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบของแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg)

5.1.7 การเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไออน

จากการศึกษานำกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดไออนด้วยวิธีทางเคมีมาเพิ่มมูลค่า โดยการใช้กากตะกอนเป็นสารตั้งต้นในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าเมื่อเผากากตะกอนที่อุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ของแข็งที่มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมี MgO ปะปนอยู่ด้วย โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตได้ มีค่าประมาณ $1.71\text{ m}^2/\text{g}$ และมีสมบัติเคมีพื้นผิวเป็นหมู่เบสที่มีความแข็งแรงตั้งแต่ร้อยละน้อยจนถึงมาก มีปริมาณความหนาแน่นหมู่เบสในช่วง $0.263 - 0.641\text{ mmol/g}$ ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ CaO/MgO ที่เตรียมจากกากตะกอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ แต่คุณภาพของน้ำมันยังคงมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ เพราะมีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันอิ่มตัว จึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้มีไขเกิดขึ้น

5.1.8 การประเมินต้นทุนของการผลิตเกลือ

ในการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือโดยการใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้มีการสร้างแบบจำลองขึ้น เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับชุดหม้อเคี้ยว โดยใช้ Linear optimization model tools ที่ชื่อว่า Solver สำหรับการคำนวณ จากการคำนวณด้วยการทำ Optimization พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ 1 จุด มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 13% ซึ่งถือว่ามีผลต่อความน่าเชื่อถือของโปรแกรมพอสมควร แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการคำนวณ พบว่าโปรแกรมนี้ยอมรับได้สำหรับการประมาณต้นทุนในการผลิตเกลือแบบหยาบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์หลักที่ได้จากการคำนวณขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตเป็นหลัก ซึ่งกำลังการผลิตเป็นค่าที่กำหนดไว้แล้ว ดังนั้น ผลของการประเมินต้นทุนด้วยโปรแกรมนี้สามารถให้ผลที่ยอมรับได้ ซึ่งผลของการประเมินต้นทุนในการผลิตเกลือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีพบว่า บริษัทสามารถผลิตและจำหน่ายเกลือได้ โดยยังคงมีรายได้สุทธิเป็นบวก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงแนวทางการกำจัดไอออนด้วยวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งความเหมาะสมที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในโรงงาน
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดของสารป้องกันการเกิดตะกอนที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเกลือบริโภคได้
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงแนวทางในการนำกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกำจัดไอออนไปเพิ่มมูลค่า รวมทั้งทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการนำกากตะกอนไปผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา CaO/MgO และศึกษาการเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับนำไปใช้ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล
4. ปรับปรุงวิธีการคำนวณ (Computational method) ให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง

รายการอ้างอิง

- เคอร์ลันสกี, มาร์ก. (2552). **ประวัติศาสตร์โลกผ่านเกลือ (Salt : A World History)** แปลโดย เรืองชัย รักศรีอักษร. กรุงเทพมหานคร: มติชน
- คณะกรรมการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล. (2010). **การทำนาเกลือ**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.mkh.in.th/index.php/2010-03-22-18-05-14/2010-03-26-05-53-43>
- ณรงค์ วุฑฒเสถียร. (2540). **การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม**. กรุงเทพมหานคร: ประชาชน
- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. (2547). **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์ (Analytical Spectroscopy)**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัวอีน. (2009). **แอ่งเกลือ ขุมทรัพย์แดนอีสาน**. [ออนไลน์].
ได้จาก: <http://www.vcharkarn.com/varticle/39952>
- ประชาชาติธุรกิจออนไลน์. (2558). **เพชรบุรีแชมป์นาเกลือ3หมื่นไร่ รายได้พันล. "สปาเกลือ"ติดลมบนจีน-ออสเตรเลีย**. [ออนไลน์]. ได้จาก:
http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1423045835
- แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2009). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ** กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์ 50.
- มหาวิทยาลัยรามคำแหง. (ม.ป.ป.). **บทที่ 9 กรด เกลือ และเบส**. [ออนไลน์].
ได้จาก: [http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM103\(50\)/CM103-9\(50\).pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM103(50)/CM103-9(50).pdf)
- เลิศพงษ์ ลากชีวะสิทธิ์. (2015). **ส่องโอกาสไทยกับ "อุตสาหกรรมเกลือ" ในอาเซียน**. [ออนไลน์].
ได้จาก: <https://www.scbeic.com/th/detail/product/1727>
- ศักรินทร์ ปริศวงศ์. (2549). **ผลขององค์ประกอบทางชีวเคมีต่อการตกผลึกในน้ำผึ้ง**. [ออนไลน์].
(วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์). คลังปัญญา
- มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้จาก: <http://www.similar.com.tw/eng-product.htm>
- ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558). **ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในการทดสอบ**
วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 63(197): 38-40.
- Al-Anezi, K., and Hilal, N. (2007). Scale formation in desalination plants: effect of carbon dioxide solubility. **Desalination**. 204(1): 385-402.

- Al-Deffeeri, N.S. (2007). Heat transfer measurement as a criterion for performance evaluation of scale inhibition in MSF plants in Kuwait. **Desalination**. 2007. 204(1): 423-436.
- Al-Rawajfeh, A.E., Glade, H., and Ulrich, J. (2005). Scaling in multiple-effect distillers: the role of CO₂ release. **Desalination**. 182(1): 209-219.
- Amjad, Z. (2004). Gypsum scale formation on heat exchanger surfaces: The influence of natural and synthetic polyelectrolytes. **Tenside Surfactants Detergents**. 41(5): 214-219.
- Aphane, M.E. (2007). The hydration of magnesium oxide with different reactivities by water and magnesium acetate [On-line] (Master of Science, University of South Africa).
- Austin, G.T. (1984). **Shreve's Chemical Process Industries**. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Buss-SMS-Canzler. (n.d.). **Process Design**. [On-line]. Available: <http://www.sms-vt.com/en/technologies/evaporation-plants/process-design.html?0=> from: www.intechopen.com. Accessed date: June 28, 2011.
- Çetinkaya, M. and Karaosmanoğlu, F. (2004). Optimization of Base-Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil. **Energy & Fuels**. 18: 1888-1895.
- Civil and environmental Engineering. (n.d.). **Scaling**. [On-line]. Available: <http://cooling.ce.cmu.edu/scaling.html>
- Culkin, F. (1965). The major constituents of sea water. **Chemical oceanography**. 1: 121-161. Quoted in Hitchon, B. and Holter, M. (1971). **Calcium and magnesium in Alberta brines**. Alberta: Research Council of Alberta.
- de Beer, M., Doucet, F.J., Maree, J.P., and Liebenberg, L. (2015). Synthesis of high-purity precipitated calcium carbonate during the process of recovery of elemental sulphur from gypsum waste. **Waste Management**. 46: 619-627
- Dinnebier, R.E. and L. Billinge, S.J. (2008). **Powder diffraction: theory and practice**. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Di Serio, M., Ledda, M., Cozzolino, M., Minutillo, G., Tesser, R. and Santacesaria, E. (2006). Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel by Using Heterogeneous Basic Catalysts. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 45(9): 3009-3014.

- Dossin, T.F., Reyniers, M.-F., Berger, R.J. and Marin, G. B. (2006). Simulation of heterogeneously MgO-catalyzed transesterification for fine-chemical and biodiesel industrial production. **Applied Catalysis B: Environmental**. 67(1–2): 136-148.
- Driesner, T. (2007). The system $H_2O-NaCl$. Part II: Correlations for molar volume, enthalpy, and isobaric heat capacity from 0 to 1000° C, 1 to 5000bar, and 0 to 1 X NaCl. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. 71(20): 4902-4919
- Engineering guide. (n.d.). Calculation of Steam Consumption and Vaporization Capacity using OPEN PAN EVAPORATOR [On-line].
Available: <http://enggyd.blogspot.com/2010/07/calculation-of-steam-consumption-and.html>
- Freedonia. (2014) **World salt** [On-line]. Available: <http://www.freedoniagroup.com/industry-study/3199/world-salt.htm>
- Fritz, J.S., and Gjerde, D.T. (2009). **Ion chromatography**. Germany: Wiley-VCH.
- Garrett-Price, B.A., Smith, S.A., Watts, R.L. and Knudsen, J.G. (1985). **Fouling of heat exchangers: Characteristics, costs, prevention, control and removal USA**: Noyes Publications..
- George, D., Riley, J.M. and Crocker, L. (1966). **Preliminary process development studies for desulfating Great Salt Lake brines and sea water**. U.S. Bureau of mines. quoted in Hitchon, B. and Holter, M. (1971). **Calcium and magnesium in Alberta brines**. Alberta: Research Council of Alberta.
- Global Industry Analysts. (2015). **Calcium carbonate-A global strategic Business Report** [On-line]. Available: <http://www.strategyr.com/pressMCP-2033.asp>
- Halikia, I., Zoumpoulakis, L., Christodoulou, E. and Prattis, D. (2001). Kinetic study of the thermal decomposition of calcium carbonate by isothermal methods of analysis. **European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection**. 1: 89-102.
- Harkins, W.D., (1911) The effects of salts upon the solubility of other salts. VII. Discussion of the solubility relations of univalent salts. **Journal of the American Chemical Society**. 33: 1836-1873.
- Heitmann, H.-G. (1990). **Saline Water Processing: Desalination and treatment of seawater, brackish water and industrial waste water**. Weinheim: VCH.

- Henley, E.J., Seader, J., and Roper, D.K. (2011). **Separation process principles**. (3rd ed.). USA: Wiley.
- Hidetomo, S. (1964). Method for the purification of brine. **United States Patent**. US 3,218,248.
- Holmgren, M. (2013). **Steam Tables in Excel**. [On-line].
Available: <http://www.mycheme.com/steam-tables-in-excel>
- Hospeti, N.B. and Mesler, R.B. (1965). Deposits formed beneath bubbles during nucleate boiling of radioactive calcium sulfate solutions. **AIChE Journal**. 11(4): 662-665. Quoted in Bott, T.R. (1995). [On-line] **Fouling of heat exchangers**. Amsterdam: Elsevier.
- Irving, L. (1926). The Precipitation of Calcium and Magnesium from Sea Water. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom (New Series)**. 14(02): 441-446.
- ISH Markit. (2014). **Magnesium Oxide and Other Magnesium Chemicals**. [On-line].
Available: <https://www.ih.com/products/magnesium-oxide-chemical-economics-handbook.html>
- Jaiyen, S., T. Naree, and C. Ngamcharussrivichai. (2015). Comparative study of natural dolomitic rock and waste mixed seashells as heterogeneous catalysts for the methanolysis of palm oil to biodiesel. **Renewable Energy**. 74: 433-440.
- JSI. (n.d.). **Production process**. [On-line].
Available: <http://www.jsia.gr.jp/english/process.html>
- Kazi, S. N., Teng, K. H., Zakaria, M. S., Sadeghinezhad, E., and Bakar, M. A. (2015). Study of mineral fouling mitigation on heat exchanger surface. **Desalination**. 367: 248-254.
- Kaufmann, D.W. (1960). **Sodium chloride: the production and properties of salt and brine**. New York: Reinhold Publishing.
- kmacgill. (n.d.). **Lesson Plans Chapter 15: Solutions & Solution Chemistry**. [On-line].
Available: http://www.kmacgill.com/lecture_notes/lecture_notes_15.htm
- Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Yamanaka, S. and Hidaka, J. (2008). Active phase of calcium oxide used as solid base catalyst for transesterification of soybean oil with refluxing methanol. **Applied Catalysis A: General**. 334(1-2): 357-365.
- Kramer, D.A. (2001). **Magnesium, its alloys and compounds**. [On-line].
Available: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-341/of01-341.pdf>

- Lee, S.L., Wong, Y.C., Tan, Y.P. and Yew, S.Y. (2015). Transesterification of palm oil to biodiesel by using waste obtuse horn shell-derived CaO catalyst. **Energy Conversion and Management**. 93: 282-288.
- Lehmann, O., Nir, O., Kuflik, M., and Lahav, O. (2014). Recovery of high-purity magnesium solutions from RO brines by adsorption of Mg (OH)₂ (s) on Fe₃O₄ micro-particles and magnetic solids separation. **Chemical Engineering Journal**. 235: 37-45.
- Li, X.-G., Lv, Y., Ma, G.-G., Wang, W.-Q. and Jian, S.-W. (2013). [In press] Decomposition kinetic characteristics of calcium carbonate containing organic acids by TGA. **Arabian Journal of Chemistry**.
- Lin, Y.-P. and Singer, P.C. (2005). Effects of seed material and solution composition on calcite precipitation. **Geochimica et cosmochimica acta**. 69(18): 4495-4504.
- Livingstone, D.A. (1963). **Chemical composition of rivers and lakes**. in Data of Geochemistry (6th ed.). Washington: US Government Printing Office. quoted in Hitchon, B. and Holter, M. (1971). **Calcium and magnesium in Alberta brines**. Alberta: Research Council of Alberta.
- Lower, S.K. (1999). **Carbonate equilibria in natural waters**. Simon Fraser University. [On-line]. Available: <http://www.chem1.com/acad/webtext/pdf/c3carb.pdf>
- Marinković, D.M., et al., (2016). Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production: Current state and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 56: 1387-1408.
- Moote, T.P., and Reed, R.L. (1985). Removal and recovery of magnesium, strontium and barium from brines. **United States Patent**. US 4,495,160.
- Moritz, G.J., (1982). Production of purified brine. **United States Patent**. US 4,336,232.
- Muensriphu, C., Vichvavichien, S., Jinarach, S., Athayuwat, P., and Mujtaba, B.G. (2010). Strategic Exploration of Salt International Company in Thailand: Can they have Sustainable and Growth Profits?. **Journal of Business Studies Quarterly**. 1(3): 68-81.
- Mullin, J.W. (1992). **Crystallization**. (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Nbainter. (n.d.). **กลไกของดีเอ-ทรอน**. [On-line] Available from: <http://www.nbainter.com/thaiHOW%20IT%20WORKS%20Mechanism01.htm>.

- Ngamcharussrivichai, C., Nunthasanti, P., Tanachai, S., and Bunyakiat, K. (2010). Biodiesel production through transesterification over natural calciums. **Fuel Processing Technology**. 91(11): 1409-1415.
- Omar, W.N.N.W., Amin, N.A.S. (2011). Biodiesel production from waste cooking oil over alkaline modified zirconia catalyst. **Fuel Processing Technology**. 92:2397-2405.
- Pang, H., Ning, G., Gong, W., Ye, J. and Lin, Y. (2011). Direct synthesis of hexagonal Mg(OH)₂ nanoplates from natural brucite without dissolution procedure. **Chemical Communications**. 47(22):6317-6319.
- Perry, R.H. (1984). **Chemical Engineering Handbook**. (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Petitjean, H., Chizallet, C., Krafft, J.M., Che, M., Lauron-Pernot, H. and Costentin, G. (2010). Basic reactivity of CaO: investigating active sites under operating conditions. **Physical Chemistry Chemical Physics**. 12(44): 14740-14748.
- Petric, B. and Petric, N. (1980). Investigations of the rate of sedimentation of magnesium hydroxide obtained from sea water. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**. 19(3): 329-335.
- Prapasawat, T., Hronec, M., Stolcova, M., Lothongkum, A.W., Pancharoen, U. and Phantanasri, S. (2014). Thermodynamic models for determination of the solubility of 2,5-bis(2-furylmethylidene)cyclopentan-1-one in different solvents at temperatures ranging from 308.15 to 403.15 K. **Fluid Phase Equilibria**. 367: 57-62.
- Prnewswire. (2012). China Drives Global Growth for Calcium Carbonate Demand. [On-line]. Available: <http://www.prnewswire.com/news-releases/china-drives-global-growth-for-calcium-carbonate-demand-150938735.html>
- PubChem. (n.d.). **Calcium carbonate**. [On-line]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/calcium_carbonate
- PubChem. (n.d.). **Magnesium hydroxide**. [On-line]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/73981>
- PubChem. (n.d.). **Sodium Chloride**. [On-line]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sodium_chloride#section=Top
- Samant, K.D., and L. O'Young. (2006) **Understanding crystallization and crystallizers**. CEP magazine. [On-line].

Same Company limited. (n.d). **Slanting pipe**. [On-line].

Available: <http://www.similar.com.tw/eng-product.htm>

Song, X., Tong, K., Sun, S., Sun, Z., and Yu, J. (2013). Preparation and crystallization kinetics of micron-sized $Mg(OH)_2$ in a mixed suspension mixed product removal crystallizer. **Frontiers of Chemical Science and Engineering** 7(2): 130-138.

Sorai, M. (2004). **Comprehensive handbook of calorimetry and thermal analysis**. West Sussex: John Wiley & Sons

Surfguppy. (n.d.). **The Process of Solvation**. [On-line].

Available: <http://surfguppy.com/solutions/process-solvation/>

Tan, Y.H., Abdullah, M.O., Nolasco-Hipolito, C. and Taufiq-Yap, Y.H. (2015). Waste ostrich- and chicken-eggshells as heterogeneous base catalyst for biodiesel production from used cooking oil: Catalyst characterization and biodiesel yield performance. **Applied Energy**. 160: 58-70.

Tarleton, S., and Wakeman, R. (2007). **Solid liquid separation: equipment selection and peocess design**. (1st ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Terziev, G.J. (1935). Purification of brines. **United States Patent**. US 1,999,709.

The Editors of Encyclopædia Britannica. (n.d.). **Polyacrylamide**. [On-line].

Available: <https://global.britannica.com/science/polyacrylamide>

The Salt Industry Center of Japan. (n.d.). **Salt production method**. [On-line].

Available: <http://www.jsia.gr.jp/english/process.html>

Bott, T.R. (1995). [On-line] **Fouling of heat exchangers**. Amsterdam: Elsevier.

Tung, H.-H., Paul, E.L., Midler, M. and McCauley, J.A. **Crystallization of organic compounds: an industrial perspective**. New Jersey: John Wiley & Sons.

Turek, M. and Gnot, W. (1995). Precipitation of Magnesium Hydroxide from Brine. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 34(1): 244-250.

Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A. (2008). **Analysis, synthesis and design of chemical processes**. USA: Pearson Education

TutorVista. (n.d.). **Flocculation**. [On-line].

Available: <http://chemistry.tutorvista.com/physical-chemistry/flocculation.html>

- Viriya-empikul, N., Krasae, P., Nualpaeng, W., Yoosuk, B. and Faungnawakij, K. (2012). Biodiesel production over Ca-based solid catalysts derived from industrial wastes. **Fuel**. 92(1): 239-244.
- Wikipedia. (n.d.). **Lamella clarifier**. [On-line].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lamella_clarifier
- Wikipedia. (n.d.). **Solvay Process**. [On-line].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solvay_process
- Willey, J.D., (2004). The effect of ionic strength on the solubility of an electrolyte. **Journal of Chemical Education**. 81: 1644-1646.
- Xie, W. and Zhao, L. (2013). Production of biodiesel by transesterification of soybean oil using calcium supported tin oxides as heterogeneous catalysts. **Energy Conversion and Management**. 76: 55-62.
- Yan, L., Zhuang, J., Sun, X., Deng, Z. and Li, Y. (2002). Formation of rod-like Mg (OH)₂ nanocrystallites under hydrothermal conditions and the conversion to MgO nanorods by thermal dehydration. **Materials Chemistry and Physics**. 76(2): 119-122.
- Zeppenfeld, K. (2011). Electrochemical removal of calcium and magnesium ions from aqueous solutions. **Desalination**. 277(1): 99-105.
- Zhang, Y., Wang, L., Zhou, R. and Liu, X. (2011). Measurement and Correlation for the Solubilities Dihydrocapsaicin in n-Heptane, n-Hexane, n-Pentane, Ethyl Acetate, Acetone, Ethanol, and Water. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 56(5): 2090-2094.
- Zhi, W., Hu, Y., Yang, W., Kai, Y. and Cao, Z. (2013). Measurement and correlation of solubility of d-sorbitol in different solvents. **Journal of Molecular Liquids**. 187: 201-205.



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือเมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการ

ทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ (การเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดไอออน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

โปรแกรมคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือที่สร้างขึ้นในแผ่นงานคำนวณ (Worksheet) ของโปรแกรม Microsoft excel เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับคำนวณหาต้นทุนในการผลิตเกลือเมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ (การใช้สารเคมีในการกำจัดไอออนด้วยสถานะ SC-SH) โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจะประกอบไปด้วย การเขียนคำสั่งใน VBA การเรียกใช้ Macro และการใช้คำสั่ง Solver ของโปรแกรม Microsoft excel โดยเนื้อหาในภาคผนวก ก. จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนที่ 2 จะแสดงสมการที่ใช้ในโปรแกรมคำนวณต้นทุน ส่วนที่ 3 จะแสดงคำสั่งที่เขียนใน VBA และ Macro

ส่วนที่ 1

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ

ในการแสดงสมการที่ใช้ในโปรแกรมคำนวณต้นทุนการผลิตเกลือ จะใช้ข้อมูลที่น่าเสนอไปแล้วในบทที่ 4 มาใช้ในการคำนวณ โดยข้อมูลจากบทที่ 4 มีรายละเอียด ดังนี้

ถังตกตะกอน (Clarifier) : ขนาดของถัง 35 m^3 , อัตราการไหลของน้ำเกลือเข้าถัง $25 \text{ m}^3/\text{h}$, ระยะเวลาในการปล่อยตะกอน 1 ชั่วโมง

เครื่องรีดตะกอน (Decanter) : น้ำเกลือในกากตะกอน 5%

กำลังการผลิตเกลือ : กำลังการผลิตเกลือของบริษัทสยามทรัพย์มณีเท่ากับ 40,000 ตันต่อปี

รายละเอียดของน้ำเกลือและสารเคมีที่ใช้ :

1) น้ำเกลือดิบจากแหล่งน้ำใต้ดิน มีค่าปริมาณของไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) $1,682.62 \text{ mg/L}$ ไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) $2,491.77 \text{ mg/L}$ และไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) $3,702.75 \text{ mg/L}$

2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 50 wt.% ความหนาแน่น 1.52 g/mL ราคา 7.25 บาทต่อกิโลกรัม

3) สารโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดอุตสาหกรรม ราคา 8.80 บาทต่อกิโลกรัม

กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ :

น้ำเกลือดิบจะถูกสูบเข้าบ่อ 400 m^3 ต่อการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ 1 ครั้ง

อัตราการป้อนน้ำเกลือเข้าสู่กระบวนการผลิตเกลือ :

น้ำเกลือขาเข้าถึงอุ่นร้อนมีอัตราการไหลเท่ากับ $25 \text{ m}^3/\text{h}$

ต้นทุนต่าง ๆ : ต้นทุนไอน้ำเท่ากับ 573 บาทต่อตันเกลือ ต้นทุนอื่น ๆ เท่ากับ 1,000 บาทต่อตันเกลือ

สถานะในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ : สถานะที่เลือกใช้ในการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือคือสถานะ SC-SH

(การใช้สารเคมีในปริมาณที่เท่ากับสัดส่วนของไอออน Ca^{2+} และไอออน Mg^{2+}) โดยสถานะนี้สามารถกำจัดไอออนทั้งสองได้ 80%

ส่วนที่ 2

สมการที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมสำหรับคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ

1) สมการที่ใช้คำนวณในแผนผังที่ 1 กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ สำหรับการคำนวณค่าต่าง ๆ ในแผนผังที่ 1 กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือของโปรแกรมคำนวณต้นทุนมีสมการหลัก ๆ ที่สำคัญและตัวอย่างการคำนวณ ดังนี้

$$(1) \text{ ปริมาณสาร } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (kg)} = \frac{V_{\text{in}} \times \text{Ca}^{2+} \times \text{MW}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{1000 \times \text{MW}_{\text{Ca}^{2+}}} \quad (1ก)$$

โดยที่ V_{in} คือ ปริมาตรน้ำเกลือที่เข้าบ่อบำบัด (m^3)
 Ca^{2+} คือ ปริมาณของไอออน Ca^{2+} ในน้ำเกลือดิบ (mg/L)
 $\text{MW}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ คือ มวลโมเลกุลของ Na_2CO_3
 $\text{MW}_{\text{Ca}^{2+}}$ คือ มวลโมเลกุลของ Ca^{2+}

กำหนดให้ $V_{\text{in}} = 400 \text{ m}^3$ $\text{Ca}^{2+} = 1,682.62 \text{ mg/L}$ $\text{MW}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 106$ $\text{MW}_{\text{Ca}^{2+}} = 40.08$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาณสาร } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (kg)} &= \frac{400 \times 1,682.62 \times 106}{1000 \times 40.08} \\ &= 1,780.02 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

$$(2) \text{ ปริมาณ NaOH (kg)} = \frac{2 \times V_{in} \times Mg^{2+} \times MW_{NaOH}}{1000 \times MW_{Mg^{2+}}} \quad (2ก)$$

แต่เนื่องจาก NaOH ที่ให้อยู่ในรูปสารละลายมีความเข้มข้น 50 wt.% สมการที่ใช้คือ

$$\text{ปริมาณ NaOH (L)} = \frac{2 \times V_{in} \times Mg^{2+} \times MW_{NaOH} \times 65.79}{1000 \times MW_{Mg^{2+}} \times 50} \quad (3ก)$$

โดยที่ Mg^{2+} คือ ปริมาณของไอออน Mg^{2+} ในน้ำเกลือดิบ (mg/L)

MW_{NaOH} คือ มวลโมเลกุลของ NaOH

$MW_{Mg^{2+}}$ คือ มวลโมเลกุลของ Mg^{2+}

กำหนดให้ $Mg^{2+} = 2,491.77 \text{ mg/L}$ $MW_{NaOH} = 40$ $MW_{Mg^{2+}} = 24.3$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาณ NaOH (kg)} &= \frac{2 \times 400 \times 2,491.77 \times 40}{1000 \times 24.3} \\ &= 3,281.34 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หรือจะได้ ปริมาณ NaOH (L)} &= \frac{2 \times 400 \times 2,491.77 \times 40 \times 65.79}{1000 \times 24.3 \times 50} \\ &= 4,837.41 \quad \text{L} \end{aligned}$$

$$(3) \text{ ความหนาแน่นของน้ำเกลือ } (\rho_{brine}, \text{kg/m}^3) = \frac{145 \times 1,000}{145 - Be^\circ} \quad (4ก)$$

โดยที่ Be° คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือที่วัดโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

กำหนดให้ $Be^\circ = 19$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ความหนาแน่นของน้ำเกลือ } (\rho_{\text{brine}}, \text{ kg/m}^3) &= \frac{145 \times 1,000}{145 - 19} \\ &= 1,150.79 \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$(4) \text{ สัดส่วนมวลของเกลือ} = \frac{\text{Be}^\circ}{100} \quad (5ก)$$

$$\text{จะได้ สัดส่วนมวลของเกลือ} = \frac{19}{100} = 0.19$$

$$(5) \text{ ปริมาณของน้ำเกลือ (M0, kg)} = V_{\text{in}} \times \rho_{\text{brine}} \quad (6ก)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาณของน้ำเกลือ (M0, kg)} &= 400 \times 1,150.79 \\ &= 460,316 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

$$(6) \text{ ปริมาณตะกอน CaCO}_3 \text{ ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)}$$

$$= \frac{V_{\text{in}} \times \text{Ca}^{2+} \times 0.8 \times \text{MW}_{\text{CaCO}_3}}{1000 \times \text{MW}_{\text{Ca}^{2+}}} \quad (7ก)$$

โดยที่ $\text{MW}_{\text{CaCO}_3}$ คือ มวลโมเลกุลของ CaCO_3

กำหนดให้ $\text{MW}_{\text{CaCO}_3} = 100.09$

จะได้ ปริมาณตะกอน CaCO_3 ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)

$$\begin{aligned} &= \frac{400 \times 1,682.62 \times 0.8 \times 100.09}{1000 \times 40.08} \\ &= 1,344.62 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

(7) ปริมาณตะกอน $Mg(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)

$$= \frac{V_{in} \times Mg^{2+} \times 0.8 \times MW_{Mg(OH)_2}}{1000 \times MW_{Mg^{2+}}} \quad (8ก)$$

โดยที่ $MW_{Mg(OH)_2}$ คือ มวลโมเลกุลของ $Mg(OH)_2$

กำหนดให้ $MW_{Mg(OH)_2} = 58.32$

จะได้ ปริมาณตะกอน $Mg(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)

$$= \frac{400 \times 2,491.72 \times 0.8 \times 58.32}{1000 \times 24.3}$$

$$= 1,913.64 \quad \text{kg}$$

(8) ปริมาณของ Na_2SO_4 ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)

$$= \frac{V_{in} \times SO_4^{2-} \times MW_{Na_2SO_4}}{1000 \times MW_{SO_4^{2-}}} \quad (9ก)$$

โดยที่ SO_4^{2-} คือ ปริมาณของไอออน SO_4^{2-} ในน้ำเกลือดิบ (mg/L)

$MW_{Na_2SO_4}$ คือ มวลโมเลกุลของ Na_2SO_4

$MW_{SO_4^{2-}}$ คือ มวลโมเลกุลของ SO_4^{2-}

กำหนดให้ $SO_4^{2-} = 3,702.75 \text{ mg/L}$ $MW_{Na_2SO_4} = 142.04$ $MW_{SO_4^{2-}} = 96.06$

จะได้ ปริมาณของ Na_2SO_4 ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา (kg)

$$= \frac{400 \times 3,702.75 \times 142.04}{1000 \times 96.06}$$

$$= 2,190.04 \quad \text{kg}$$

(9) ปริมาณของผสมรวมทั้งหมดในบ่อผสม (kg)

$$= \frac{\text{NaOH} \times \rho_{\text{NaOH}}}{1000} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{M0} + (\text{H}_2\text{O}_{\text{in}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (10\text{ก})$$

โดยที่ $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

ρ_{NaOH} คือ ความหนาแน่นของ NaOH (kg/m^3)

$\text{H}_2\text{O}_{\text{in}}$ คือ ปริมาตรของน้ำที่ใช้ในการละลายสารเคมี (m^3)

กำหนดให้ $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\rho_{\text{NaOH}} = 1,522 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\text{H}_2\text{O}_{\text{in}} = 6 \text{ m}^3$

จะได้ ปริมาณของผสมรวมทั้งหมดในบ่อผสม (kg)

$$\begin{aligned} &= \frac{4,317.50 \times 1,522}{1000} + 1,780 + 464,000 + (6 \times 1,000) \\ &= 478,351.23 \text{ kg} \end{aligned}$$

(10) ปริมาณน้ำเกลือที่ติดไปกับตะกอนเมื่อผ่านถังตกตะกอน (kg/h)

$$= 0.1 \times (\text{Msalt}_{\text{Out},3} + \text{H}_2\text{O}_{\text{out},3} + \text{Na}_2\text{SO}_{4\text{out},3}) \quad (11\text{ก})$$

โดยที่ $\text{Msalt}_{\text{Out},3}$ คือ ปริมาณเกลือที่ออกจากบ่อผสม (kg/h)

$\text{H}_2\text{O}_{\text{out},3}$ คือ ปริมาณน้ำที่ออกจากบ่อผสม (kg/h)

$\text{Na}_2\text{SO}_{4\text{out},3}$ คือ ปริมาณของ Na_2SO_4 ที่ออกจากบ่อผสม (kg/h)

กำหนดให้ $\text{Msalt}_{\text{Out},3} = 3,702.75 \text{ mg}/\text{L}$ $\text{H}_2\text{O}_{\text{out},3} = 142.04$

จะได้ ปริมาณน้ำเกลือที่ติดไปกับตะกอนเมื่อผ่านถังตกตะกอน (kg/h)

$$\begin{aligned} &= 0.1 \times (5,644.52 + 23,119.59 + 133.21) \\ &= 2,889.73 \text{ kg}/\text{h} \end{aligned}$$

(11) ปริมาณน้ำเกลือที่ติดไปกับตะกอนเมื่อผ่านเครื่องรีดตะกอน (kg/h)

$$= 0.05 \times 0.1 \times (M_{\text{salt}_{\text{Out},3}} + H_2O_{\text{out},3} + Na_2SO_{4\text{out},3}) \quad (12ก)$$

จะได้ ปริมาณน้ำเกลือที่ติดไปกับตะกอนเมื่อผ่านเครื่องรีดตะกอน (kg/h)

$$= 0.05 \times 0.1 \times (5,644.52 + 23,119.59 + 133.21)$$

$$= 144.49 \quad \text{kg/h}$$

12) ปริมาณน้ำเกลือที่แยกออกจากตะกอนเมื่อผ่านเครื่องรีดตะกอน (kg/h)

$$= 0.95 \times 0.1 \times (M_{\text{salt}_{\text{Out},3}} + H_2O_{\text{out},3} + Na_2SO_{4\text{out},3}) \quad (13ก)$$

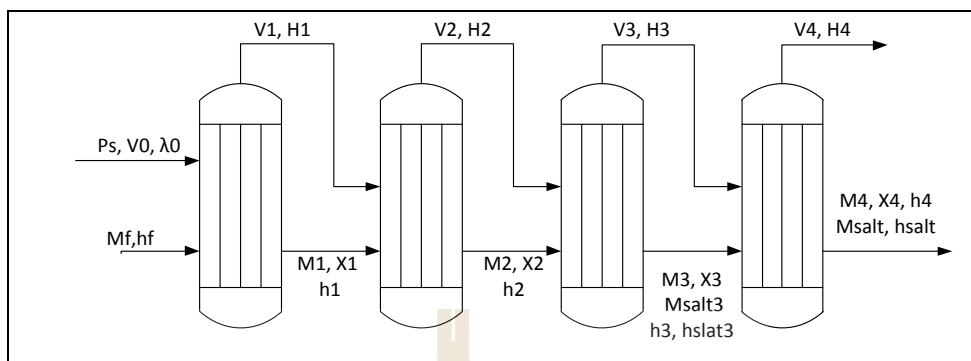
จะได้ ปริมาณน้ำเกลือที่แยกออกจากตะกอนเมื่อผ่านเครื่องรีดตะกอน (kg/h)

$$= 0.95 \times 0.1 \times (5,644.52 + 23,119.59 + 133.21)$$

$$= 2,745.24 \quad \text{kg/h}$$

2) สมการที่ใช้คำนวณในแผนผังที่ 2 กระบวนการผลิตเม็ดเกลือ สำหรับการคำนวณของแผนผังที่ 2 กระบวนการผลิตเม็ดเกลือ จะใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณชุดหม้อเคี้ยวเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วยสมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของชุดหม้อเคี้ยวสุญญากาศ และในการหาคำตอบเพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ จากสมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน จะใช้การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) จึงมีสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรเริ่มต้น ก่อนจะใช้โปรแกรม Solver ในการหาคำตอบ ซึ่งสมการที่ใช้ในแผนผังกระบวนการผลิตเม็ดเกลือ มีดังนี้

(1) สมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน



รูปที่ 1ก แผนผังชุดหม้อเคี่ยวสุญญากาศสำหรับการทำสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน

Evaporator 1 :

$$M_0 = M_1 + V_1 \quad (๗-1)$$

$$M_0 \times X_0 = M_1 \times X_1 \quad (๗-2)$$

$$V_0 \times \lambda_0 + M_0 \times h_0 = V_1 \times H_1 + M_1 \times h_1 \quad (๗-3)$$

$$V_0 \times \lambda_0 + M_0 \times h_0 = U_1 \times A_1 \times (T_s - T_1) \quad (๗-4)$$

Evaporator 2 :

$$M_1 = M_2 + V_2 \quad (๗-5)$$

$$M_1 \times X_1 = M_2 \times X_2 \quad (๗-6)$$

$$V_1 \times \lambda_1 + M_1 \times h_1 = V_2 \times H_2 + M_2 \times h_2 \quad (๗-7)$$

$$V_1 \times \lambda_1 = U_2 \times A_2 \times (T_1 - T_2) \quad (๗-8)$$

Evaporator 3 :

$$M2 = M3 + V3 + Msalt3 \quad (\text{ข-9})$$

$$M2 \times X2 = M3 \times X3 + Msalt3 \quad (\text{ข-10})$$

$$V2 \times \lambda_2 + M2 \times h2 = V3 \times H3 + M3 \times h3 + Msalt3 \times hsalt3 \quad (\text{ข-11})$$

$$V2 \times \lambda_2 = U3 \times A3 \times (T_2 - T_3) \quad (\text{ข-12})$$

Evaporator 4 :

$$M3 + Msalt3 = M4 + V4 + Msalt4 \quad (\text{ข-13})$$

$$M3 \times X3 + Msalt3 = M4 \times X4 + Msalt4 \quad (\text{ข-14})$$

$$V3 \times \lambda_3 + M3 \times h3 + Msalt3 \times hsalt3 = V4 \times H4 + M4 \times h4 + Msalt4 \times hsalt4 \quad (\text{ข-15})$$

$$V3 \times \lambda_3 = U4 \times A4 \times (T_3 - T_4) \quad (\text{ข-16})$$

(2) การกำหนดค่าพารามิเตอร์ สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ได้แก่

(2.1) อุณหภูมิขาออกของหม้อเคี้ยวแต่ละตัว ($T_1 - T_4$) โดย $T_1 = 127.5^\circ\text{C}$ $T_2 = 107.5^\circ\text{C}$
 $T_3 = 87.5^\circ\text{C}$ $T_4 = 66.5^\circ\text{C}$

(2.2) ปริมาณเกลือที่ผลิตได้เท่ากับ 5,000 kg/h

(2.3) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในหม้อเคี้ยวสูญญากาศแต่ละหม้อ ($U1-U4$) มีค่าเท่ากับ $1,738 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

(2.4) สัดส่วนของปริมาณเกลือ ($X3-X4$) กำหนดให้มีค่า 0.27

(3) สมการสำหรับการคำนวณค่าเริ่มต้น (Initial guess)

(3.1) การเดาค่า V_i (ปริมาณไอน้ำที่ออกจากหม้อเคี้ยว)

$$\text{สมมติให้ } V_i = \frac{V_{\text{total}}}{N_{\text{effect}}}$$

โดย V_{total} จะคำนวณจากสมดุลมวลรวมดังนี้ : $V_{\text{total}} = M0 - M4 - Msalt4$

(3.2) การเดาค่า V_0 (ปริมาณไอน้ำที่ต้องป้อนให้กับหม้อเคี้ยว) จะใช้สมการสมดุลพลังงานในการเดาค่า V_0 ดังนี้

$$V_0 = \frac{V_4 \times H_4 + M_4 \times h_4 + Msalt_4 \times h_{salt_4} - M_0 \times h_0}{\lambda_0}$$

(3.3) การเดาค่า M_1, M_2, M_3 จะได้จากสมการสมดุลมวล ดังนี้

$$M_1 = M_0 - V_1$$

$$M_2 = M_1 - V_2$$

$$M_3 = \frac{M_2 \times X_2 - M_2 + V_3}{X_3 - 1}$$

$$Msalt_3 = M_2 - V_2 - M_3$$

$$M_4 = M_3 + Msalt_3 - V_4 - Msalt_4$$

(3.4) การเดาค่า X_1, X_2, X_3 จะกำหนดจากช่วงค่าที่เป็นไปได้ คือ 0.18-0.27

$$X_1 = 0.20$$

$$X_2 = 0.22$$

(5) ข้อจำกัดของการรันโปรแกรมสำหรับคำนวณชุดหม้อเคี้ยว

- $X_1 < X_2$
- $X_2 = 0.2699$
- $M_0 \geq M_1 + V_1$
- $M_1 \geq M_2 + V_2$
- $M_2 \geq M_3 + V_3 + Msalt_3$
- $M_3 \geq M_4 + V_4 + Msalt_4 - Msalt_3$
- สมการ (ข-1) ถึงสมการ (ข-16) $\leq (0.02)$

ส่วนที่ 3

คำสั่งที่เขียนใน VBA และ Macro

การทำงานของโปรแกรมคำนวณต้นทุนในการผลิตเกลือ จะอาศัยคำสั่งที่เขียนไว้ใน VBA และ Macro ซึ่งคำสั่งที่อยู่ในโปรแกรมที่สร้างขึ้นมีดังนี้

1) คำสั่งสำหรับคำนวณของแผนผังที่ 1 กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำเกลือ

```
Private Sub Cal_Button_Click()
```

```
Dim Vol_in As Single, Ca_in As Single, Mg_in As Single, SO4_in As Single
```

```
Dim CO3_in As Single, OH_in As Single, Baume As Single
```

```
Dim Rho_in As Single, Xsalt_in As Single, Vol_in_mass As Single
```

```
'Calculation of Na2CO3 and NaOH require
```

```
Vol_in = Sheets("Production").Range("H18").Value
```

```
Ca_in = Sheets("Production").Range("H21").Value
```

```
CO3_in = (Ca_in * Vol_in * 106) / (40.08 * 1000)
```

```
Mg_in = Sheets("Production").Range("H22").Value
```

```
OH_in = (2 * Mg_in * Vol_in * 40 * 65.79) / (24.3 * 50 * 1000)
```

```
SO4_in = Sheets("Production").Range("H23").Value
```

```
Baume = Sheets("Production").Range("H24").Value
```

```
Rho_in = 1000 * (145 / (145 - Baume))
```

```
Xsalt_in = Baume / 100
```

```
Vol_in_mass = Vol_in * Rho_in
```

```
'Show the calculation value on diagram
```

```
Range("L10") = CO3_in
```

```
Range("L11") = OH_in
```

```
Range("H19") = Vol_in_mass
```

```
Range("H25") = Xsalt_in
```

```
Range("H26") = Rho_in
```

Dim P_Mix As Single, CO3_P As Single, OH_P As Single, Rho_OH As Single, SO4_P As Single

Dim Rho_H2O As Single, H2O_in As Single, Total_Pmix_Vol As Single

'Show the calculation value of mixing pond

Rho_OH = Sheets("Production").Range("P11").Value

Rho_H2O = Sheets("Production").Range("P12").Value

H2O_in = Sheets("Production").Range("L12").Value

CO3_P = Vol_in * (Ca_in * 0.8 * 100.09) / (40.08 * 1000)

OH_P = Vol_in * (Mg_in * 0.8 * 58.32) / (24.3 * 1000)

SO4_P = Vol_in * 142.04 * (SO4_in / (1000 * 96.06))

Total_Pmix = (OH_in * Rho_OH / 1000) + CO3_in + Vol_in_mass + (H2O_in * Rho_H2O)

'Total_Pmix is total volume (kg)

Range("L24") = CO3_P

Range("L25") = OH_P

Range("L23") = Total_Pmix

Range("L27") = SO4_P

Dim Rho_Pout3 As Single, Rho_CO3 As Single, Flow_out3 As Single, CO3_out3 As Single

Dim OH_out3 As Single, Xsalt_out3 As Single, Msalt_out3 As Single, Mass_flow_out3 As Single

Dim H2O_out3 As Single, SO4_out3 As Single, Xsalt_P As Single, H2O_P As Single, Msalt_P As Single

'Show the calculation value of mixing pond outlet

Rho_CO3 = Sheets("Production").Range("P10").Value

Rho_Pout3 = Total_Pmix / (Vol_in + (CO3_in / Rho_CO3) + H2O_in + (OH_in / 1000))

Range("P22") = Rho_Pout3

Total_Pmix_Vol = Vol_in + (CO3_in / Rho_CO3) + (OH_in / 1000) + H2O_in 'Total_Pmix_Vol

is total volume (m3)

Range("L26") = Total_Pmix_Vol

'Range("AV17") = Total_Pmix_Vol

Xsalt_P = Vol_in_mass * Xsalt_in / Total_Pmix

Range("L28") = Xsalt_P

Msalt_P = Total_Pmix * Xsalt_P

Range("L29") = Msalt_P

H2O_P = Total_Pmix - CO3_P - OH_P - SO4_P - Msalt_P

Range("L30") = H2O_P

Flow_out3 = Sheets("Production").Range("P21").Value

Mass_flow_out3 = Flow_out3 * Rho_Pout3

Range("P23") = Mass_flow_out3

CO3_out3 = (CO3_P * Mass_flow_out3) / Total_Pmix

Range("P24") = CO3_out3 'out stream 3

Range("U25") = CO3_out3 'out stream 4

Range("U37") = CO3_out3 'out stream 5

OH_out3 = (OH_P * Mass_flow_out3) / Total_Pmix

Range("P25") = OH_out3 'out stream 3

Range("U26") = OH_out3 'out stream 4

Range("U38") = OH_out3 'out stream 5

Xsalt_out3 = Xsalt_P

Range("P26") = Xsalt_out3

Msalt_out3 = Xsalt_out3 * Mass_flow_out3

Range("P27") = Msalt_out3

SO4_out3 = (SO4_P * Mass_flow_out3) / Total_Pmix

Range("P29") = SO4_out3

H2O_out3 = Mass_flow_out3 - CO3_out3 - OH_out3 - Msalt_out3 - SO4_out3

Range("P28") = H2O_out3

Dim Slurry_out4 As Single, brine_out4 As Single

Dim FilterCake_out5 As Single, Solution_out5 As Single

Dim Flow_out6 As Single, Mass_flow_out6 As Single, Rho_out6 As Single

Dim Flow_out7 As Single, Mass_brine_out7 As Single, Flow_out8 As Single

Dim Flow_out9 As Single, Mass_flow_out9 As Single, Msalt_out9 As Single, H2O_out9 As Single

'Calculation of stream 4-9

brine_out4 = (Msalt_out3 + H2O_out3 + SO4_out3) * (0.1)

Range("U27") = brine_out4

Slurry_out4 = (CO3_out3 + OH_out3 + brine_out4)

Range("U24") = Slurry_out4

Mass_flow_out6 = Mass_flow_out3 - Slurry_out4

Range("V21") = Mass_flow_out6

Rho_out6 = 1000 * (145 / (145 - (100 * Xsalt_out3)))

Range("V22") = Rho_out6

Flow_out6 = Mass_flow_out6 / Rho_out6

Range("V20") = Flow_out6

Solution_out5 = 0.05 * brine_out4

Range("U39") = Solution_out5

FilterCake_out5 = CO3_out3 + OH_out3 + Solution_out5

Range("U36") = FilterCake_out5

Mass_brine_out7 = 0.95 * brine_out4

Range("AB30") = Mass_brine_out7

Flow_out7 = Mass_brine_out7 / Rho_out6

Range("AB31") = Flow_out7

Flow_out8 = Flow_out6 + Flow_out7

Range("AB22") = Flow_out8

Flow_out9 = Sheets("Production").Range("AH22").Value

Mass_flow_out9 = Flow_out9 * Rho_out6

Range("AH23") = Mass_flow_out9

Msalt_out9 = Mass_flow_out9 * Xsalt_out3

Range("AH24") = Msalt_out9

Range("AH26") = SO4_out3

H2O_out9 = Mass_flow_out9 - Msalt_out9 - SO4_out3

Range("AH25") = H2O_out9

Range("H72") = Mass_flow_out9

Range("K61") = Mass_flow_out9

Range("K62") = Xsalt_out3

Range("H73") = SO4_out3

Range("K65") = SO4_out3

End Sub

2) คำสั่งสำหรับตารางไอน้ำ

ใช้คำสั่ง VBA ของตารางไอน้ำจาก If-97 Steam tables โดย Magnus Holmgren โดย
ดาวน์โหลดจาก <http://www.mycheme.com/steam-tables-in-excel/> (Holmgren, www, 2013)

3) คำสั่งสำหรับคำนวณค่าเอนทาลปีของน้ำเกลือ โดยใช้สมการของ Driesner (2007)

Public Function hbrine(T As Double, P As Double, XNaCl As Double) As Double

Dim q1, q2, q10, q11, q12, q20, q21, q22, q23 As Double

Dim Th As Double

'given

$$q10 = 47.9048 - 9.36994 * 10^{-3} * P + 6.51059 * 10^{-6} * P^2$$

$$q11 = -32.1724 + 0.0621255 * P$$

$$q12 = -15.7324 - 0.05276 * P - 6.51059 * 10^{-6} * P^2$$

$$q20 = 1 - (((-1.69513 - 4.52781 * 10^{-4} * P - 6.04279 * 10^{-8} * P^2) * (\text{Sqr}(0.0612567 + 1.88082 * 10^{-5} * P))))$$

$$q21 = -1.69513 - 4.52781 * 10^{-4} * P - 6.04279 * 10^{-8} * P^2$$

$$q22 = 0.0612567 + 1.88082 * 10^{-5} * P$$

$$q23 = (0.241022 + 3.45087 * 10^{-5} * P - 4.28356 * 10^{-9} * P^2) - ((1 - (-1.69513 - 4.52781 * 10^{-4} * P - 6.04279 * 10^{-8} * P^2) * (\text{Sqr}(0.0612567 + 1.88082 * 10^{-5} * P)))) - (-1.69513 - 4.52781 * 10^{-4} * P - 6.04279 * 10^{-8} * P^2) * \text{Sqr}(1 + (0.0612567 + 1.88082 * 10^{-5} * P))$$

$$q1 = q10 + q11 * (1 - XNaCl) + q12 * (1 - XNaCl)^2$$

$$q2 = q20 + q21 * \text{Sqr}(XNaCl + q22) + q23 * XNaCl$$

$$Th = q1 + q2 * T \text{ 'degree C}$$

Call hL_T(Th)

$$\text{hbrine} = \text{hL}_T(\text{Th})$$

End Function

4) คำสั่งสำหรับคำนวณค่าเอนทาลปีของเกลือ โดยใช้สมการของ Driesner (2007)

Function hsalt1(ByVal T1 As Double, P As Double) As Double

Dim r0, r1, r2, r3, r4 As Double

Dim T_twa, T_tNa, hsalt As Double

T = T1 + 273.15 ' K

T_twa = 273.16 'K, 0.01 degree C for T triple point of water

'P = 0.006 ' bar

T_tNa = 1074.15 'K, 801 degree C for T triple point of NaCl

r0 = 1148.81

r1 = 0.275774

r2 = 8.8103 * 10 ^ -5

'r3 = -1.7099 * 10 ^ -3 - 3.82734 * 10 ^ -6 * T - 8.65455 * 10 ^ -9 * T ^ 2

r4 = 5.29063 * 10 ^ -8 - 9.63084 * 10 ^ -11 + 6.50745 * 10 ^ -13

'Cp,halit = r0T + 2r1(T-T_tNa)+3r2(T-T_tNa)^2+r3P+r4P^2

'after integrate

'h , halite = r0 * T + 2 * r1 * ((T ^ 2) / 2 - T_tNa * T) + 3 * r2 * ((T - T_tNa) ^ 2) / 2 + P * (-1.7099 * 10 ^ -3 * T - 3.82734 * 10 ^ -6 * (T ^ 2) / 2 - 8.65455 * 10 ^ -9 * (T ^ 3) / 3) + r4 * T * P ^ 2

'substitute T and T_twa

hsalt = r0 * (T - T_twa) + 2 * r1 * (((T ^ 2) / 2 - T_tNa * T) - ((T_twa ^ 2) / 2 - T_tNa * T_twa)) + 3 * r2 * ((T - T_tNa) ^ 2 - (T_twa - T_tNa) ^ 2) / 2 + P * (-1.7099 * 10 ^ -3 * (T - T_twa) - 3.82734 * 10 ^ -6 * ((T ^ 2 - T_twa ^ 2) / 2) - 8.65455 * 10 ^ -9 * ((T ^ 3 - T_twa ^ 3) / 3)) + r4 * (T - T_twa) * P ^ 2

'unit of hsalt is J/kg

hsalt1 = hsalt / 1000

'unit hsalt1 is kJ/kg

End Function

5) คำสั่งสำหรับคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ของชุดหม้อเดียว

```

Sub delete_value()
'
' delete_value Macro
'
'
'
Range("P4:P19").Select
Selection.ClearContents
End Sub
*****
Sub Copy_value()
'
' Copy_value Macro
'
'
'
Range("P23:P38").Select
Selection.Copy
Range("P4").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
End Sub
*****
Sub Cal_Value()
'
' Cal_Value Macro
'
'
'
SolverOk SetCell:="$U$20", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$P$4:$P$19", _
Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"

```

```
SolverOk SetCell:="$U$20", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$P$4:$P$19", _  
    Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"  
SolverSolve  
End Sub  
*****  
Private Sub CommandButton1_Click()  
Call Copy_value  
End Sub  
*****  
Private Sub CommandButton2_Click()  
Call Cal_Value  
End Sub  
*****  
Private Sub CommandButton3_Click()  
Call delete_value  
End Sub
```

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person standing on a platform, flanked by two large, golden, stylized letters 'H'. The entire emblem is set against a background of a sunburst or fan-like pattern with multiple pointed rays. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a curved path at the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในที่ระหว่างศึกษา

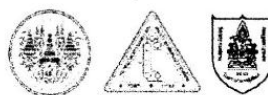
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างที่ศึกษา

วารณี ศรีสุจันทร์ ชีระสุด สุขกำเนิด และสุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์, ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือ : ผลการทดลองและแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์, ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 (นำเสนอผลงานด้วยโปสเตอร์), 18-19 ธันวาคม 2557, เชียงใหม่, ประเทศไทย.



ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"
 จ.เชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557



ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือ: ผลการทดลองและแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

วารณี ศรีสุนันท์¹ ชีระสุด สุขกำเนิด¹ สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

* ผู้พิมพ์ประสานงาน supunnee@sut.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีเป็นสาเหตุของการเกิดตะกอน จึงมีแนวคิดที่จะกำจัดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการอุ่นร้อน ซึ่งข้อมูลที่สำคัญต่อการกำจัดด้วยวิธีการอุ่นร้อนคือความสามารถในการละลาย งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีแล้ว โดยมีการตั้งสมมติฐานให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในน้ำเกลือบำบัดแล้วเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเกลือบำบัดแล้ว ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 305.15 ถึง 353.15 เคลวิน โดยที่ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในสารละลายอิ่มตัวจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรต จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการอธิบายผลการทดลองด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า สมการโพลีโนเมียลและสมการของ Van't Hoff สามารถอธิบายผลได้ดี ซึ่งเอนทัลปีและเอนโทรปีของการละลายถูกคำนวณด้วยสมการของ Van't Hoff และพลังงานอิสระกิบส์ได้ถูกคำนวณด้วยสมการพลังงานอิสระกิบส์

คำสำคัญ : ความสามารถในการละลาย, ตะกอน, น้ำเกลือ, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

1. บทนำ

เกลือมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งทางตรงนั้นมาจากการรับประทาน ส่วนทางอ้อมนั้นเป็นการบริโภคเกลือผ่านทางอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมกระดาษ

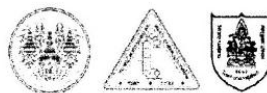
ถึงแม้ว่าคุณภาพของเกลือที่นำไปใช้ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกัน แต่เกลือที่มีความบริสุทธิ์สูงก็ยังคงเป็นที่ต้องการ เพราะข้อดีของการผลิตเกลือบริสุทธิ์นั้นไม่เพียงแต่ส่งผลโดยตรงต่อผู้บริโภค แต่ยังส่งผลต่อกระบวนการผลิตต่อเนื่องที่ใช้เกลือเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากในน้ำเกลือนั้นนอกจากจะมีโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนแล้ว ยังมีกลุ่มของแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน ที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกอนได้ โดยจะอยู่ในรูปของ CaCO_3 , Mg(OH)_2 , CaSO_4 เป็นต้น [1] การเกิดตะกอนในหม้อต้มระเหยเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่มักพบในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนลดลง หากต้องการให้อุณหภูมิในหม้อต้มระเหยมีค่าเท่าเดิม จำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการแยกสารเจือปนหรือแนวทางการป้องกันการผลิตตะกอนในหม้อต้มระเหย

จากการศึกษาสาเหตุของการเกิดตะกอนในหม้อต้มระเหยในกระบวนการผลิตเกลือของโรงงานจริง พบว่ามีสาเหตุมาจากตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีสูตรทางเคมีคือ Mg(OH)_2 ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเกลือด้วยวิธีทางเคมีและยังคงตกค้างอยู่ในน้ำเกลือบำบัดแล้ว เมื่อน้ำเกลือบำบัดแล้วถูกส่งเข้าสู่หม้อต้มระเหยจะทำให้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตกผลึกออกมาในรูปของแข็งเนื่องจากสมบัติการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น โดยที่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนลงบนบริเวณผิวท่อที่มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะมีการระเหยของน้ำให้ความเข้มข้นของสารเพิ่มสูงขึ้นจนสามารถตกตะกอนหรือตกผลึกออกมาได้เมื่อผลึกสะสมกันมากขึ้นก็จะกลายเป็นตะกอนเกาะจับที่ผิวท่อ

การตกค้างของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเกลือ หลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีนั้น เนื่องจากจากพฤติกรรมในการตกตะกอนที่ค่อนข้างช้าและความสามารถในการละลายสูงที่อุณหภูมิต่ำ แต่หากมีวิธีที่สามารถแยกเอาแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ศูนย์วิจัยมหาดินทิต สกว.
 สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"
 จ.เชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557



ออกมาจากน้ำเกลือบำบัดแล้วได้ นอกจากจะเป็นการป้องกันการเกิดตะกอนแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงการลดของเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการผลิตอีกด้วย เนื่องจากสารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย อาทิ ใช้เป็นสารหน่วงไฟในพลาสติก ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้ในการผลิตยาลดกรดและเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแมกนีเซียมออกไซด์ [2] และเนื่องจากแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายได้ดีที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [3] จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาเทคนิคการอุ่นร้อนเข้ามาช่วยในการแยกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำเกลือบำบัดแล้ว

สำหรับวิธีการอุ่นร้อนเป็นการบำบัดเบื้องต้นในการกำจัดตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเกลือบำบัดแล้ว ก่อนที่จะแยกตะกอนนั้นออกด้วยการกรองหรือการตกตะกอน [4] ซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในการกำจัดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการอุ่นร้อนคือความสามารถในการละลายที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้ จึงนำมาสู่การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว โดยมีการตั้งสมมติฐานให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ จึงสามารถคำนวณค่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากปริมาณแมกนีเซียมไอออนได้ ซึ่งช่วงของอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 305.15-353.15 เคลวิน ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิคงที่ของแต่ละการทดลอง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ 99% น้ำกลั่นและน้ำเกลือที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งน้ำเกลือบำบัดแล้วมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนและแคลเซียมไอออนเท่ากับ 239.15 และ 446.99 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายทำการชั่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.08 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่และเติมน้ำหรือน้ำเกลือบำบัดแล้วปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝาให้สนิทและนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิพร้อมทั้งมีการเขย่าเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากที่ครบ 12 ชั่วโมง นำสารละลายมารองแยกของแข็งที่ไม่ละลายออกจากสารละลายอิมตัว จากนั้นนำตัวอย่างของสารละลายอิมตัวไปวิเคราะห์หาปริมาณของแมกนีเซียมไอออนด้วยวิธีการไทเทรตด้วยสารละลาย EDTA

ค่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเกลือบำบัดแล้วจะแสดงในรูปของสัดส่วนโมล ตามสมการที่ (1)

$$x_1 = \frac{m_1/M_1}{m_1/M_1 + m_2/M_2 + m_3/M_3 + m_4/M_4} \quad (1)$$

โดยที่ m_1 คือมวลของสาร $Mg(OH)_2$, m_2 คือมวลของเกลือแคลเซียม, m_3 คือมวลของ NaCl และ m_4 คือมวลของน้ำ ส่วน M_1 , M_2 , M_3 และ M_4 คือมวลโมเลกุลของ $Mg(OH)_2$, เกลือแคลเซียม, NaCl และน้ำ ตามลำดับ แต่ในการคำนวณจะพิจารณาจำนวนโมลรวมของสารละลายจากจำนวนโมลของเกลือและน้ำเท่านั้น เนื่องจากกำหนดให้ $Mg(OH)_2$ และเกลือแคลเซียมมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ NaCl และน้ำ ดังนั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงในสมการที่ (2)

$$x_1 = \frac{m_1/M_1}{m_3/M_3 + m_4/M_4} \quad (2)$$

ส่วนค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำที่แสดงในรูปของสัดส่วนโมล จะคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$x_1 = \frac{m_1/M_1}{m_4/M_4} \quad (3)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ความสามารถในการละลาย

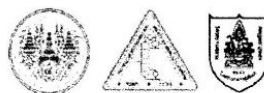
การหาความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว คำนวณจากปริมาณแมกนีเซียมไอออนในสารละลาย โดยปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้วคำนวณจากผลต่างของค่าความกระด้างรวมในน้ำเกลือกับค่าปริมาณแคลเซียมที่คำนวณได้จากกราฟไทเทรต ซึ่งค่าของปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในน้ำและน้ำเกลือ

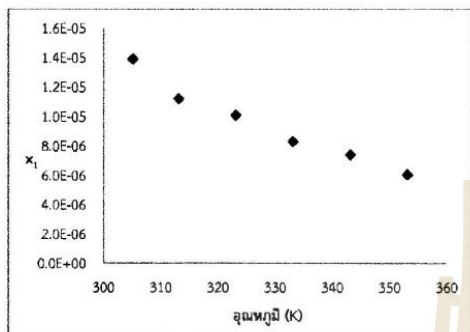
อุณหภูมิ (เคลวิน)	ปริมาณแมกนีเซียมไอออน (mg/L)	
	น้ำ	น้ำเกลือบำบัดแล้ว
305.15	18.42	233.71
313.15	14.86	224.35
323.15	13.37	191.66
333.15	10.99	185.72
343.15	9.81	182.75
353.15	8.02	167.89

ค่าความหนาแน่นของน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้วที่ใช้สำหรับการคำนวณกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.9960 และ 1.158 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และจากค่าความเค็มของน้ำเกลือเท่ากับ 19.7 โภเม คิดเป็นปริมาณของ NaCl ได้ร้อยละ 22.4 โดยมวล จากการศึกษาความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว ในช่วงของอุณหภูมิ 305.15 ถึง

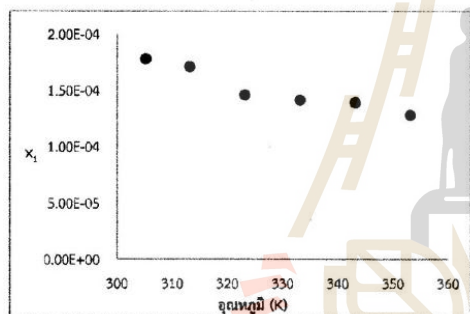
ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"
 จ.เชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557



353.15 เคลวิน พบว่าเมื่อสารละลายมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ $Mg(OH)_2$ ละลายได้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในน้ำที่เทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2 ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในน้ำเกลือบำบัดแล้วเทียบกับอุณหภูมิ

3.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

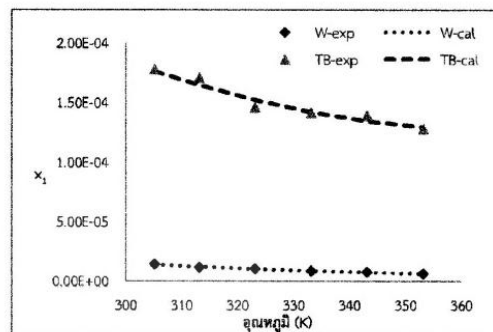
ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของสารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้วกับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งแบบจำลองที่นำมาใช้ในการอธิบายในการศึกษานี้ ได้แก่ สมการโพลีโนเมียลและสมการของ Van't Hoff

ในการอธิบายความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้วด้วยสมการโพลีโนเมียล โดยการใช้สมมติฐานที่อธิบายโดย Zhange และคณะ [5] แสดงในสมการที่ (4)

$$x_1 = A + BT + CT^2 \quad (4)$$

ผลจากการจำลองความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้ว ด้วยสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2

แสดงอยู่ในรูปที่ 3 และมีการแสดงค่าพารามิเตอร์ของสมการโพลีโนเมียลที่ได้คำนวณในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ กับอุณหภูมิ จากสมการโพลีโนเมียล (W คือน้ำและ TB คือน้ำเกลือบำบัดแล้ว)

สำหรับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) คำนวณจากสมการที่ (5)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(x_{exp} - x_{cal})^2}{\sum(x_{exp} - \bar{x})^2} \quad (5)$$

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์จากสมการโพลีโนเมียลสำหรับความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในช่วงอุณหภูมิ 305.15 ถึง 353.15 เคลวิน

ตัวทำละลาย	A	B	C	R^2
น้ำ	2.43×10^{-4}	-1.27×10^{-6}	1.69×10^{-9}	0.9848
น้ำเกลือบำบัดแล้ว	1.81×10^{-3}	-9.14×10^{-6}	1.24×10^{-8}	0.9459

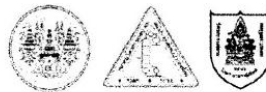
และความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ยังมีการคำนวณด้วยสมการของ Van't Hoff โดยที่สัดส่วนโมลจะขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าอุณหภูมิ ($1/T(K)$) ดังสมการที่ (6) [6]

$$\ln x_1 = A + \frac{B}{T} \quad (6)$$

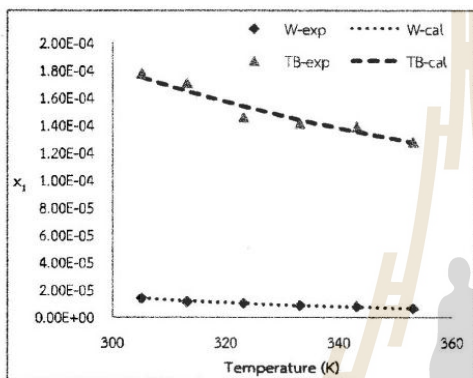
ผลจากการคำนวณความสามารถในการละลายด้วยสมการ Van't Hoff แสดงในรูปที่ 4 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของสมการ Van't Hoff แสดงในตารางที่ 3

จากการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของ $Mg(OH)_2$ ในน้ำและน้ำเกลือบำบัดแล้วด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลจากการทดลองเป็นอย่างดี แต่สมการโพลีโนเมียลและสมการของ Van't Hoff

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"
 จ.เชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557



สามารถอธิบายถึงความสามารถในการละลายของ Mg(OH)₂ ในน้ำได้แม่นยำกว่าการอธิบายความสามารถในการละลายของ Mg(OH)₂ ในน้ำเกลือบำบัดแล้ว ซึ่งจะเห็นได้จากค่า R² > 0.98 ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 สำหรับการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของ Mg(OH)₂ ในน้ำเกลือบำบัดแล้วเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น แร่ระหว่างไอออนต่างๆภายในน้ำเกลือ เป็นต้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของความสามารถในการละลายของ Mg(OH)₂ จากสมการ Van't Hoff (W คือน้ำและ TB คือน้ำเกลือบำบัดแล้ว)

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์จากสมการ Van't Hoff สำหรับความสามารถในการละลายของ Mg(OH)₂ ในช่วงอุณหภูมิ 305.15 ถึง 353.15 เคลวิน

ตัวทำละลาย	A	B	R ²
น้ำ	-17.01	1769.6	0.9991
น้ำเกลือบำบัดแล้ว	-10.972	707.55	0.9386

3.3 พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

ค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้ทำการคำนวณประกอบด้วย ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีและค่าพลังงานอิสระกิบส์ ซึ่งการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการละลาย (ΔH°_{Diss}) ของ Mg(OH)₂ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Van't Hoff ดังสมการ (7) [6,7]

$$\Delta H^\circ_{Diss} = -R \left(\frac{\partial \ln x_1}{\partial (1/T)} \right) \quad (7)$$

โดยที่ R คือค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 J mol⁻¹ K⁻¹, x₁ คือสัดส่วนโมลของ Mg(OH)₂ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของการละลายและ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

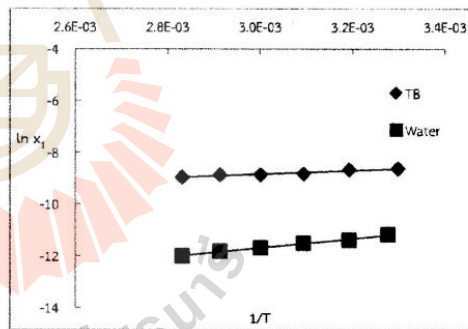
ในขณะที่ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการละลาย (ΔS°_{Diss}) สามารถหาได้จากสมการ (8) [6,7]

$$\ln x_1 = -\frac{\Delta H^\circ_{Diss}}{RT} + \frac{\Delta S^\circ_{Diss}}{R} \quad (8)$$

ซึ่งค่า ΔS°_{Diss} หาได้จากจุดตัดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln x_1$ กับ 1/T (รูปที่ 5) และเนื่องจากค่า ΔH°_{Diss} และ ΔS°_{Diss} เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 305.15 ถึง 353.15 เคลวิน ดังนั้นการหาค่าเฉลี่ยของ ΔG°_{Diss} สามารถหาได้จากที่ (9) [6,7]

$$\Delta G^\circ_{Diss} = \Delta H^\circ_{Diss} - \Delta S^\circ_{Diss} \cdot T_{mean} \quad (9)$$

โดยที่ค่า T_{mean} ของสารละลายที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 325.19 เคลวิน และค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ แสดงอยู่ในตารางที่ 4



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ $\ln x_1$ และ 1/T จากสมการ Van't Hoff (Water คือน้ำและ TB คือน้ำเกลือ)

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการละลายของ Mg(OH)₂ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 325.19 เคลวิน

ตัวทำละลาย	พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์		
	ΔH°_{Diss} (J/mol)	ΔS°_{Diss} (J/mol K)	ΔG°_{Diss} (J/mol)
น้ำ	-14712.45	-141.39	-9181.95
น้ำเกลือบำบัดแล้ว	-5882.57	-91.22	-2314.59

ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"
 ฉ.เชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557



จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์จากสมการที่ (7) - (9) พบว่า ค่าเอนทัลปีของการละลาย $Mg(OH)_2$ ทั้งในน้ำและน้ำเกลืออิ่มตัวแล้ว มีค่าเป็นลบนั้นหมายถึงกระบวนการละลายเป็นแบบคายความร้อน (exothermic) ส่วนค่าพลังงานอิสระกิบส์ที่มีค่าเป็นลบหมายถึงกระบวนการละลายสามารถที่จะเกิดขึ้นได้เอง

4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้ปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเกลืออิ่มตัวแล้วเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ จึงคำนวณค่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลจากการศึกษาความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลืออิ่มตัวแล้วในช่วงอุณหภูมิ 305.15 ถึง 353.15 เคลวิน พบว่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลืออิ่มตัวแล้วมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และในการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 และสมการของ Van't Hoff พบว่าค่าจากการทดลองสอดคล้องกับผลจากการคำนวณ ซึ่งทั้งสองสมการสามารถอธิบายความสามารถในการละลายได้เป็นอย่างดี และจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยสมการของ Van't Hoff พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นแบบคายความร้อน และสำหรับค่าพลังงานอิสระกิบส์ที่มีค่าเป็นลบชี้ให้เห็นถึงการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและบริษัทสยามทรัพย์มณีจำกัด ในการสนับสนุนทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Garrett-Price and Bobi A., Foulting of heat exchangers. New Jersey, Noyes Publications, 1985
- [2] Song, X., Tong, K., Sun, S., Sun, Z., and Yu, J. Preparation and crystallization kinetics of micron-sized $Mg(OH)_2$ in a mixed suspension mixed product removal crystallizer, *Fron. Chem. Sci. Eng.*, 7(2), 2013, 130-138.

- [3] O'Brien, T.F., Bommaraju, T.V., and Hine F., *Hand book of Chlor-Alkali Technology*, New York, Klumer academic/Plenum, 2005.
- [4] Tarleton, S. and Wakeman, R. *Solid-liquid separation: Equipment selection and process design*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [5] Zhang, Y., Wang, L., Zhou, R., and Liu, X. Measurement and correlation for the solubilities of dihydrocapsaicin in n-heptane, n-hexane, n-pentane, ethyl acetate, acetone, ethanol and water, *J. Chem. Eng. Data*, 56(5), 2011, 2090-2094
- [6] Prapasawat, T., Hronec, M., Štolcová, M., Waritswat Lothongkum, A., Pancharoen, U. and Phatanasri, S. Thermodynamic models for determination of the solubility of 2,5-bis(2-furylmethylidene)cyclopentan-1-one in different solvents at temperatures ranging from 308.15 to 403.15 K, *Fluid Phase Equilibria*, 367, 2014, 57-62.
- [7] Zhi, W., Hu, Y., Yang, W., Kai, Y. and Cao, Z. Measurement and correlation of solubility of D-sorbitol in different solvents, *Journal of molecular liquids*, 187, 2013, 201-205.

ประวัติผู้เขียน

นางสาววารณี ศรีสุจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2532 เริ่มการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนบ้านกลุ่มพัฒนา และเข้าศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนกุดบงพิทยาคาร แผนการเรียนวิทย์-คณิต จังหวัดหนองคาย ต่อมาในปีการศึกษา 2551 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยระหว่างที่ศึกษาในระดับปริญญาตรีมีโอกาสดำเนินการวิจัยที่ได้รับทุนสำหรับนักศึกษาที่มีผลการเรียนดีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2554 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 3/2555 โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและทุนสำหรับการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สำหรับประสบการณ์การเรียนรู้ที่ผ่านมา ในระดับปริญญาตรีได้จัดทำโครงงานวิศวกรรมเคมีในหัวข้อ “กระบวนการดูดซับเมธิลลินบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยในเครื่องเบดนิ่ง” โดยมีศาสตราจารย์ ดร. ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และเมื่อปีการศึกษา 2/2554 ได้มีโอกาสออกสหกิจศึกษาที่บริษัท ไทยพาราไซคลิน จำกัด จังหวัดชลบุรีเป็นระยะเวลา 4 เดือน โดยงานที่ได้รับมอบหมายคือการแปลและเรียบเรียงคู่มืออุปกรณ์ที่ใช้ในโรงกลั่น เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการผลิตเกลือด้วยหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Scale Prevention in Salt Production Process using Vacuum Pan)” โดยในระหว่างที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีโอกาสเข้าร่วมนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ประจำปี พ.ศ. 2557 เรื่องความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำและน้ำเกลือ : ผลการทดลองและแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์