

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

#### 2.1 กากน้ำตาล

##### 2.1.1 นิยาม

กากน้ำตาล<sup>2</sup> เป็นผลพลอยได้หรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเหวี่ยงแยกน้ำตาลออกไปแล้ว เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมีสีน้ำตาลเข้ม จากคำนิยามของ Olbrich ได้แบ่งกากน้ำตาลเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. กากน้ำตาลชนิดเรียล (Real molasses) เป็นกากน้ำตาลส่วนใหญ่ที่มีการแยกผลึกของซูโครส (Sucrose) ออกไปแล้วจากกระบวนการผลิตน้ำตาล
2. กากน้ำตาลชนิดพารา (Para molasses) เป็นกากน้ำตาลที่ได้ระหว่างกรรมวิธีการผลิตน้ำตาลชนิดอื่นๆ เช่น กลูโคส (Glucose) เดกซ์โทรส (Dextrose) และไซโลส (Xylose)
3. กากน้ำตาลชนิดซูโด (Pseudo molasses) เป็นกากน้ำตาลที่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ไฮเทสโมลาส (High test molasses) ที่ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิต

##### 2.1.2 การแบ่งระดับคุณภาพของกากน้ำตาล

Bulletin 302 ได้เสนอการแบ่งระดับคุณภาพของกากน้ำตาลเป็น 3 ประเภทโดยใช้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและความชื้นเป็นเกณฑ์ ดังนี้

1. กากน้ำตาลระดับซูเปอร์แบล็คสตราป (Superior Blackstrap Molasses) เป็นกากน้ำตาลที่ประกอบด้วยน้ำน้อยกว่าร้อยละ 23.4 และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 53.5
2. กากน้ำตาลระดับแบล็คสตราป (Blackstrap Molasses) ประกอบด้วยน้ำระหว่างร้อยละ 23.5-26.4 และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดระหว่างร้อยละ 48.5-53.4
3. กากน้ำตาลระดับยูทิลิตี้ (Utility Blackstrap) ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 26.5 หรือมากกว่า และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดระหว่างร้อยละ 42.5-48.4

Crocuret เสนอว่าค่าปริกซ์เพียงอย่างเดียวก็สามารถแบ่งระดับคุณภาพของกากน้ำตาลได้ ดังนี้

1. กากน้ำตาลแบบลึคสแตรป เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตน้ำตาลจากอ้อย มีค่าบrix เมื่อเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำจำนวนเท่ากับกากน้ำตาลเท่ากับ 42.5 แสดงว่ากากน้ำตาลชนิดนี้มีค่าบrix เท่ากับ 85

2. กากน้ำตาลจากอ้อย (Cane Feeding Molasses) คือ กากน้ำตาลที่เจือจางด้วยน้ำโดยวิธีเจือจางเป็นสองเท่า (Double-dilution Method) และทดสอบค่าบrix ต้องมีค่า บrix ไม่น้อยกว่า 39.75

3. ไฮเทสโมลาส หรือ Invert Syrup เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลประมาณ 85 บrix และค่าบrix ที่ทดสอบโดยวิธีเจือจางเป็นสองเท่าต้องไม่น้อยกว่า 40

### 2.1.3 องค์ประกอบของกากน้ำตาล

กากน้ำตาลประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูป

	น้ำ	1	
	ซูโครส	2	เปลี่ยนเป็น แอลกอฮอล์ได้
	น้ำตาลชนิดอื่น	3	
ของแข็ง ละลายได้	สารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ และแบคทีเรีย	4	ไม่ใช่ในการหมักและ มีผลเสียต่อการผลิต
	สารอินทรีย์	5	
ของแข็ง แขวนลอย	ทรายและอื่นๆ	6	

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานในกากน้ำตาล<sup>3</sup>

จากรูปที่ 2.1 จำแนกปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในกากน้ำตาลได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

### 2.1.4 แหล่งที่มาขององค์ประกอบต่างๆ ในกากน้ำตาลมีดังนี้<sup>2,3</sup>

1. น้ำ ได้จากธรรมชาติของอ้อยและกระบวนการผลิต
2. ซูโครส และน้ำตาลชนิดต่างๆ ได้แก่ ซูโครส เดกซ์โทรส และเลวูโลส นอกจากนี้ยังประกอบด้วย ริตวชิงซูการ์ และน้ำตาลชนิดอื่นอีกเล็กน้อยเช่น แมนโนส (Mannose) และ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกากน้ำตาล<sup>3</sup>

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
1. น้ำ	20.0
2. ซูโครส	35.0
3. กลูโคส หรือ เดกซ์โทรส	7.0
เลวูโลส หรือ ฟรักโทส	9.0
สารอื่นๆที่ลดปริมาณหรือเปลี่ยนรูปได้ (Reducing Substances)	3.0
4. คาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ เช่น ยาง แป้ง	4.0
สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogenous Compound)	4.5
เช่น โปรตีน	
กรดที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Non-nitrogenous Acid)	5.0
เช่น กรดอะโคนิติก (Aconitic Acid) กรดซิตริก (Citric Acid)	
ไข (Waxes), ฟอสโฟไลปิด (Phospholipids) และ สเตอรอยด์ (Steroids)	0.4
เม็ดสีและอื่นๆ	0.1
5. สารอนินทรีย์	12.0

และนอกจากนี้ยังประกอบด้วยของแข็งแขวนลอย เช่น ทราयर้อยละ 8.0-15.0 โดยปริมาตร จากตารางข้างต้นในสารอนินทรีย์สามารถจำแนกเป็นองค์ประกอบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารอนินทรีย์ในกากน้ำตาล<sup>3</sup>

ปริมาณแก้ว	ช่วงร้อยละของแก้ว
ต่าง	
$K_2O$	30-50
$CaO$	7-15
$MgO$	2-14
$Na_2O$	0.3-0.9
$Fe_2O_3/Al_2O_3$	0.4-2.5
กรด	
$SO_3$	7-27
$Cl$	12-20
$P_2O_5$	1-10
$SiO_2$ และส่วนที่ไม่ละลาย	1-7

ไซโคส (Psicose) ได้จากธรรมชาติของอ้อย ในกระบวนการผลิตใช้เปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์มีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปตาม อายุของต้นอ้อยที่นำมาผลิตเป็นน้ำตาล ภูมิภาค ภูมิประเทศ และสภาพของดินที่ทำการปลูกอ้อย รวมถึงกรรมวิธีการผลิตน้ำตาล

3. คอลลอยด์ เช่น ยางเหนียว และไซ เกิดจากธรรมชาติของอ้อย จะเข้าไปเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของยีสต์ สามารถแยกออกได้ด้วยกรรมวิธีทางกล จากรายงานการวิเคราะห์กากน้ำตาลของประเทศคิวบาจะมีสารประเภทนี้อยู่ร้อยละ 0.5 ของของแข็งในกากน้ำตาล

4. คาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ เกิดจากธรรมชาติของอ้อยอิทธิพลในกระบวนการผลิตคือถ้าสามารถไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลได้ก็สามารถเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ในกระบวนการผลิตได้โดยการให้ความร้อนและไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเพื่อให้ละลายและเกิดกระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล (Saccharification) และโดยทั่วไปไม่ทำความเสียหายให้กับกระบวนการผลิต

5. สารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในกากน้ำตาลอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-1.5 และอยู่ในส่วนของโปรตีนดิบ อีกร้อยละ 2.5-9 เกิดจากธรรมชาติของอ้อยและกระบวนการผลิต ใช้เป็นอาหารของยีสต์โดยการให้ความร้อนและไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเพื่อปรับปรุงคุณภาพอาหารของยีสต์ และมักเกิดเอสเทอร์จากกรดอะมิโนเชิงซ้อน

6. สารที่ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน ส่วนมากเป็นกรดอะซิติกที่เกิดจากธรรมชาติของอ้อย และนอกจากนี้อาจเกิดได้จากกระบวนการผลิตและการเก็บกากน้ำตาล เป็นกรดที่ระเหยง่ายและไปยับยั้งการทำงานของยีสต์ ส่วนที่เหลือเป็นกรดมาลิกและกรดซิตริกอีกเล็กน้อย แยกออกได้ด้วยการให้ความร้อนและลตรีปปีง (Stripping)

7. สารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น เม็ดสี เกิดจากธรรมชาติของอ้อยไม่ทำอันตรายต่อกระบวนการผลิต

8. แבקที่เรื้อ เกิดจากการเก็บกากน้ำตาล มีผลคือไปลดผลผลิตของแอลกอฮอล์และเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการจากการหมัก กำจัดโดยการให้ความร้อนเพื่อทำลายโครงสร้างของแบคทีเรีย

9. เถ้า โดยทั่วไปในกากน้ำตาลมีปริมาณและองค์ประกอบของเถ้าต่างกันไปเนื่องจากสภาพภูมิภาค ภูมิประเทศ และกรรมวิธีในการปลูกอ้อยซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล ดังตัวอย่างเช่น กากน้ำตาลจากชวาประกอบด้วยโพแทสเซียมประมาณร้อยละ 40 คาร์บอนอีตร้อยละ 10-20 ซัลเฟตร้อยละ 10-20 ส่วนที่เหลือเป็นเกลือของแมกนีเซียม ซิลิกา คลอไรด์ ฟอสเฟต โซเดียม อะลูมิเนียม และออกไซด์ของเหล็ก กากน้ำตาลในประเทศฟิลิปปินส์มีปริมาณของโซเดียมและซิลิกามาก ปริมาณโพแทสเซียมจะค่อนข้างต่ำ ส่วนหินปูนมีปริมาณ 2 เท่าของโพแทสเซียม

และซัลเฟตมีปริมาณน้อย ส่วนกากน้ำตาลจากรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลียมีองค์ประกอบของเถ้า ดังนี้

ออกไซด์	ร้อยละของปริมาณที่น้อยที่สุด	ร้อยละของปริมาณที่มากที่สุด
SiO <sub>2</sub>	1.86	6.60
K <sub>2</sub> O	37.48	41.78
CaO	10.27	16.58
MgO	5.45	11.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.53	8.5
SO <sub>3</sub>	3.69	9.59

สารอนินทรีย์แต่ละชนิดมีแหล่งที่มาดังนี้

9.1 เกลือของแคลเซียม เกิดจากธรรมชาติของอ้อยและกระบวนการผลิตน้ำตาล ทำให้เกิดตะกอนในเครื่องมือและอุปกรณ์เกี่ยวกับความร้อน แยกออกได้โดยการให้ความร้อน การเติมสารเคมี และการแยกทางกล

9.2 เกลือของสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เกิดจากธรรมชาติของอ้อย ส่วนมากไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการผลิตขกเว้นทองแดง ส่วนโพแทสเซียมและฟอสเฟตสามารถใช้เป็นอาหารของยีสต์ได้

9.3 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เกิดจากกระบวนการซัลไฟเดชัน (Sulphitation) เพื่อลดสีของน้ำตาลในกระบวนการผลิตน้ำตาล จะไปยับยั้งการทำงานของยีสต์ และเกิดเป็นเมอร์แคปแทน (Mercaptans) แยกออกได้โดยการให้ความร้อนและสตรีปปิง

9.4 ซัลไฟต์ เกิดจากกระบวนการซัลไฟเดชัน เพื่อลดสีของน้ำตาลในกระบวนการผลิตน้ำตาล เกิดการรวมตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในกระบวนการหมัก ได้แก่ กลีเซอรอล อะเซตัลดีไฮด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ดังสมการ แยกออกได้โดยการให้ความร้อน



การเติมสารเคมี และออกซิเดชัน

9.5 ไนเตรตและฟลูออไรด์ เกิดจากธรรมชาติของอ้อยไปยับยั้งการทำงานของยีสต์

9.6 กรดชนิดอื่นๆ เกิดจากธรรมชาติของอ้อย ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการผลิต

9.7 ของแข็งแขวนลอย เกิดจากดิน ทราาย ที่ติดมากับอ้อย ทำให้ เครื่องมือในกระบวนการผลิตเกิดการกัดกร่อน แยกออกด้วยกรรมวิธีทางกล

### 2.1.5 ผลของธาตุชนิดต่างๆ ที่มีต่อยีสต์

White และ Munns ได้ทำการศึกษาราย 50 ชนิดที่มีผลต่อยีสต์และแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่เป็นพิษต่อยีสต์อย่างมาก (Very Poisonous Group) ได้แก่ แคลเซียม ทองแดง เงิน ออลเมียม พรอท และพาลลาเดียม ถ้าธาตุในกลุ่มนี้มีความเข้มข้นที่ 0.4-10.0 ppm จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์อย่างสมบูรณ์

2. กลุ่มที่เป็นพิษต่อยีสต์พอประมาณ (Moderately Toxic Group) ได้แก่ โคบอลต์ ลิเทียม ฟลูออรีน และดีบุก ถ้าธาตุในกลุ่มนี้มีความเข้มข้นที่ 115-400 ppm จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์อย่างสมบูรณ์

3. กลุ่มที่เป็นพิษต่อยีสต์เล็กน้อย (Slightly Toxic Group) ได้แก่ ซีลีเนียม และทาลเลียม ถ้าธาตุในกลุ่มนี้มีความเข้มข้นที่ 500-600 ppm จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์อย่างสมบูรณ์

4. กลุ่มที่เป็นพิษต่อยีสต์เล็กน้อยมากหรือไม่เป็นพิษเลย (Very Slightly or Non Toxic Group) ได้แก่ ตะกั่ว เหล็ก และสารประกอบของหมู่ฮาโลเจนในรูปของ เกลือโพแทสเซียม แอนติโมนี สตรอนเทียม และแบเรียม รวมไปถึงกลุ่มที่ประกอบด้วย แมกนีเซียม โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส ซึ่งธาตุต่างๆ ที่กล่าวไปทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่ยีสต์ต้องการใช้ในการเจริญเติบโต และไม่เป็นพิษต่อยีสต์

## 2.2 การละลาย

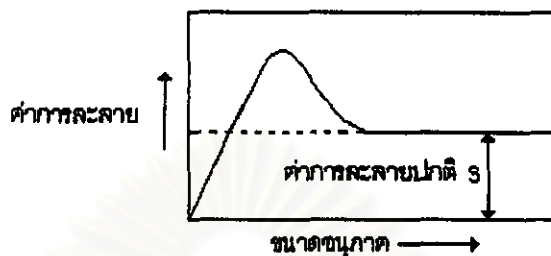
### 2.2.1 นิยาม

ค่าการละลาย (Solubility)<sup>5</sup> สารจำนวนหนึ่งที่ละลายได้ในตัวทำละลายชนิดหนึ่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จำนวนกรัมของสารที่ละลายใน 100 กรัมของตัวทำละลายที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เช่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โซเดียมคลอไรด์ละลายน้ำได้ 36.5 กรัมในน้ำ 100 กรัม

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการละลาย

1. อุณหภูมิ ส่วนมากค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นยกเว้นสารประกอบบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมซัลเฟต เป็นต้น

2. ขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคของของแข็งซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายมีขนาดเล็กพอที่จะทำให้เกิดการละลาย โดยค่าการละลายมากกว่าค่าการละลายที่อิ่มตัวปกติ ภาวะนี้จะเกิดขึ้นชั่วคราว ดังรูป



รูปที่ 2.2 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการละลาย<sup>6</sup>

3. สิ่งเจือปน อิทธิพลของสิ่งเจือปนจะทำให้ธรรมชาติของระบบเปลี่ยนไปจากเดิม ผลที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอน แบ่งเป็น 4 กรณี คือ

กรณีที่ 1 สิ่งเจือปนจะไม่มีผลต่อการละลาย

กรณีที่ 2 สิ่งเจือปนจะเกิดปฏิกิริยา หรือเกิดเป็นสารเชิงซ้อนหรือสารประกอบกับตัวถูกละลาย

กรณีที่ 3 สิ่งเจือปนจะมีผลทำให้ตัวถูกละลายตกตะกอนออกมา สภาพนี้เรียกว่า ซอลท์เอาท์ (Salt Out)

กรณีที่ 4 สิ่งเจือปนจะมีผลทำให้เกิดภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) คือ จะทำให้ตัวถูกละลายละลายได้มากขึ้นสภาพนี้เรียกว่าซอลท์อิน (Salt In)

## 2.3 การตกตะกอน

### 2.3.1 นิยาม

การตกตะกอน (Precipitation)<sup>7</sup> คือองค์ประกอบของของแข็งที่ไม่ละลายระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลาย การทำนายว่าตะกอนที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ยุติการละลาย 2 ชนิดที่มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์เข้าด้วยกันจะต้องทราบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำนายการละลายได้จากกฎ 8 ข้อของการละลายของสารอนินทรีย์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2.3 กฎ 8 ข้อของการละลายของสารอนินทรีย์

กฎที่	ใช้กับ	กฎกล่าวว่า	ข้อยกเว้น
1	$\text{Li}^+ \text{Na}^+ \text{K}^+ \text{NH}_4^+$	กลุ่ม IA และสารประกอบ แอมโมเนียมละลายได้	-
2	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^- \text{NO}_3^-$	อะซิเตตและไนเตรตละลายได้	-
3	$\text{Cl}^- \text{Br}^- \text{I}^-$	คลอไรด์ โบรไมด์ และไอโอดิด์ ส่วนใหญ่ละลายได้	$\text{AgCl} \text{Hg}_2\text{Cl}_2 \text{PbCl}_2 \text{AgBr}$ $\text{HgBr}_2 \text{Hg}_2\text{Br}_2 \text{PbBr}_2 \text{AgI}$ $\text{HgI}_2 \text{Hg}_2\text{I}_2 \text{PbI}_2$
4	$\text{SO}_4^{2-}$	ซัลเฟตส่วนใหญ่ละลายได้	$\text{CaSO}_4 \text{SrSO}_4 \text{BaSO}_4$ $\text{Ag}_2\text{SO}_4 \text{Hg}_2\text{SO}_4 \text{PbSO}_4$
5	$\text{CO}_3^{2-}$	คาร์บอเนตส่วนใหญ่ไม่ละลาย	คาร์บอเนตของกลุ่ม IA $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$
6	$\text{PO}_4^{3-}$	ฟอสเฟตส่วนใหญ่ไม่ละลาย	ฟอสเฟตของกลุ่ม IA $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$
7	$\text{S}^{2-}$	ซัลไฟด์ส่วนใหญ่ไม่ละลาย	ซัลไฟด์ของกลุ่ม IA $(\text{NH}_4)_2\text{S}$
8	$\text{OH}^-$	ไฮดรอกไซด์ส่วนใหญ่ไม่ละลาย	ไฮดรอกไซด์ของกลุ่ม IA $\text{Ca(OH)}_2 \text{Sr(OH)}_2 \text{Ba(OH)}_2$

### 2.3.2 ขั้นตอนการตกตะกอน

การตกตะกอนแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การเกิดอนุ (Nucleation)
2. การขยายขนาดของผลึก (Crystal Growth)
3. การรวมตัวกันและเพิ่มขนาดเป็นก้อน (Agglomeration and the Ripening)

#### การเกิดอนุ

อนุ (Nucleus) คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กมากที่เกิดจากการตกตะกอนของวัฏภาคของแข็ง  
ในที่หนึ่งๆ นิวเคลียส (Nuclei) เกิดจากโมเลกุล 2-3 โมเลกุล หรือคู่ของไอออน ซึ่งเป็นองค์ประกอบ  
ของไอออนที่สามารถตกตะกอนได้มารวมตัวกัน การตกตะกอนจากสารละลายเนื้อเดียว  
(Homogeneous Solution) เกิดได้จากการเริ่มก่อตัวของไอออนในสารละลายกลายเป็นนิวเคลียส  
และการเกิดนิวเคลียสอื่นส่วนมากเป็นเนื้อผสม (Heterogeneous) เนื่องจากในสารละลายที่มีน้ำ



(Aqueous Solution) จะมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่หลายชนิด การเกิดนิวคลีโอจากไอออนที่ตกตะกอนได้เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานเพื่อให้สารละลายเกิดเป็นสารละลายอิมัลชันด้วยวิธี หรือมีความเข้มข้นสูงกว่าจุดสมดุลงที่ จะเกิดการตกตะกอน

### การขยายขนาดของผลึก

ผลึกเกิดจากการรวมตัวของไอออนที่ตกตะกอนบนนิวคลีโอ อัตราการขยายขนาดของผลึกอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\frac{dC}{dt} = -kS(C - C^*)^n \quad (2.1)$$

- $C^*$  - ความเข้มข้นอิมัลชัน (mole/liter)  
 $C$  - ความเข้มข้นของไอออนที่พิจารณา (mole/liter)  
 $k$  - ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ( $\text{liter}^n \text{ time}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ mole}^{(1-n)}$ )  
 $S$  - พื้นที่ผิวที่ที่ยอมให้เกิดการตกตะกอนได้ (mg/liter ของขนาดอนุภาค)

ตัวอย่างเช่น Nancollas และ Reddy พบว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากสารละลายมีอัตราการเกิดดังนี้

$$\frac{d[Ca^{2+}]}{dt} = kS([Ca^{2+}] - [Ca^{2+}]^*)^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $k = 5.76 \text{ liter}^2 \text{ mg}^{-1} \text{ mole}^{-1} \text{ min}^{-1}$

ค่า  $k$  ของการขยายขนาดของผลึกขึ้นกับสมบัติของสารละลายและสมบัติของของแข็งที่เกิดเป็นตะกอน

### การรวมตัว

การเริ่มต้นการก่อตัวของของแข็งที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มแรกอาจยังไม่มีเสถียรในสภาพของปฏิกิริยานั้นๆ แต่ถ้าภาวะนั้นมีความเหมาะสมและเวลายาวนานขึ้น โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่วัฏภาคที่เสถียร การเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มของตะกอน และภายหลังที่สารละลายลดความเข้มข้นลง เพราะวัฏภาคที่เสถียรมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าวัฏภาคการเริ่มก่อตัวของตะกอน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกที่เวลาผ่านไปนี้เรียกว่าการมีอายุ (Aging) ส่วนการเพิ่มขนาดของผลึกในการตกตะกอนเรียกว่าริเพนนิ่ง (Ripening) อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากมีพลังงานที่ผิวสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ความเข้มข้นของสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่จุดสมดุลงมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลงของสารละลายที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

เนื่องจากเมื่ออนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่แล้วตกตะกอนจึงทำให้ความเข้มข้นในสารละลายลดลง

### 2.3.3 ตะกรัน

ตะกรันโดยทั่วไปเกิดจาก แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และ แคลเซียมซัลเฟต<sup>9</sup> สำหรับงานวิจัยนี้ตะกรันเกิดจากแคลเซียมซัลเฟตดังผลการทดลองภาคผนวก ค พบว่ามีองค์ประกอบของแคลเซียมและกำมะถันมากกว่าร้อยละ 90 จากองค์ประกอบทั้งหมด ในที่นี้จึงขอกล่าวถึงสมบัติของแคลเซียมซัลเฟต

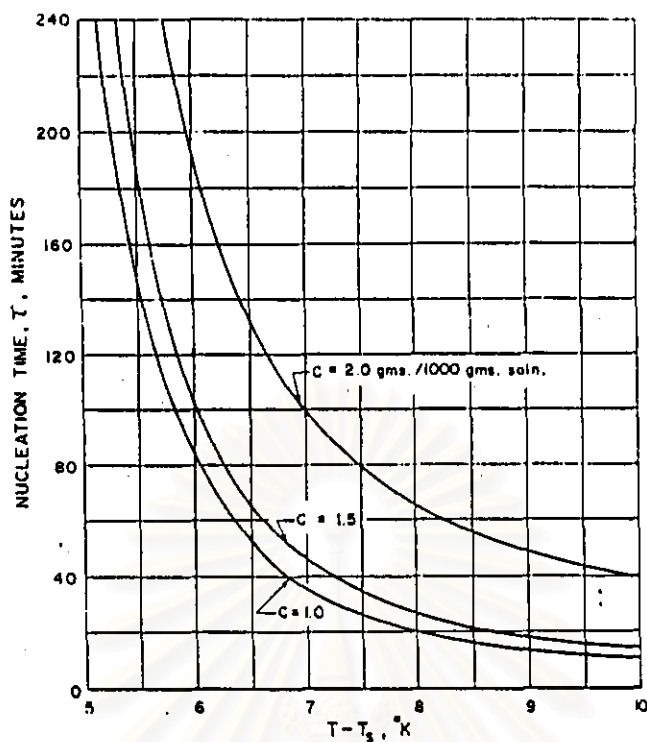
แคลเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้พอสมควร<sup>10</sup> แต่เมื่อเติมเอทิลแอลกอฮอล์แล้วทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ดังตารางที่ 2.4 อันเป็นผลให้เกิดตะกรันได้มากขึ้นในหอกลิ้นของการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของการละลายขององค์ประกอบของซัลเฟตในน้ำเทียบกับในสารละลายร้อยละ 50 ของเอทิลแอลกอฮอล์<sup>10</sup>

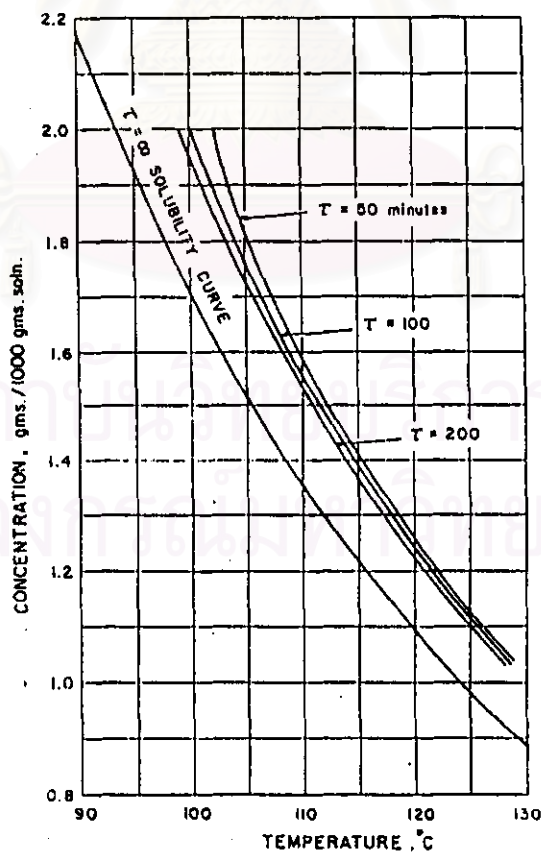
องค์ประกอบของซัลเฟต	ค่าคงที่ของการละลายในน้ำ	ค่าคงที่การละลายในเอทิลแอลกอฮอล์
BaSO <sub>4</sub>	$1 \times 10^{-10}$	$10^{-14}$
SrSO <sub>4</sub>	$5 \times 10^{-7}$	$10^{-10}$
CaSO <sub>4</sub>	$4 \times 10^{-5}$	$10^{-8}$
PbSO <sub>4</sub>	$2 \times 10^{-8}$	$10^{-12}$

### 2.3.4 การเกิดนิวคลีเอชันกับเวลาสัมผัส<sup>9</sup> (Nucleation and Contact Time)

การเกิดผลึกของตัวถูกละลายจากสารละลายไม่เพียงแต่เกิดจากสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่งเท่านั้น ยังขึ้นกับปัจจัยของอะตอม โมเลกุล การแพร่ พลังงานกระตุ้น และโครงสร้างแลตทิซ (Lattice Structures) กลไกพื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องนี้ยังไม่ชัดเจน และยังมีข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นอิ่มตัวยวดยิ่งกับเวลาในการเกิดนิวคลีเอชันน้อย จากรูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงข้อมูลของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตในน้ำ โดยไม่มีเกลือชนิดอื่นเจือปนอยู่ ที่มีผลต่อสเตรนเลส 316 การเก็บข้อมูลวัดในกรณีที่ไม่มีกรไหลของสารละลายและอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนการเกิดนิวคลีเอชันวัดจากความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป เมื่อ T คืออุณหภูมิที่สารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง และ T<sub>s</sub> คืออุณหภูมิสารละลายอิ่มตัว

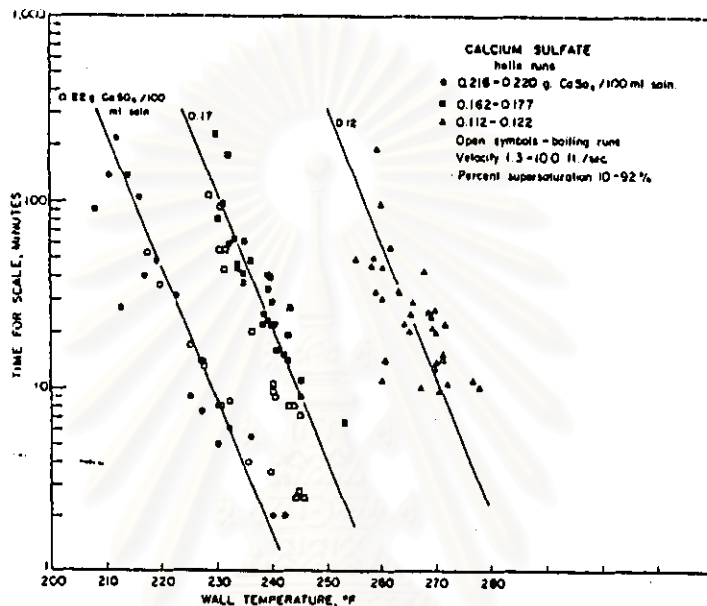


รูปที่ 2.3 เวลาการเกิดนิวคลีเอชันของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับผลต่างของอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัวด้วยด่างกับสารละลายอิ่มตัวที่ความเข้มข้นต่างๆ<sup>9</sup>



รูปที่ 2.4 ค่าคงที่ของการเกิดนิวคลีเอชัน<sup>9</sup>

จากรูปที่ 2.3 และ 2.4 การเกิดนิวคลีเอชันจะเกิดได้รวดเร็วถ้าผลต่างของอุณหภูมิสารละลายอิมตัวกับอุณหภูมิสารละลายอิมตัววดยิ่งมีค่าต่างกันมาก ถ้าในเครื่องมืออุปกรณ์บางชนิด เช่นเครื่องระเหยเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เพียงบางส่วนของสารละลาย ก็มีผลทำให้เกิดตะกอนในเครื่องมืออื่นๆ ได้



รูปที่ 2.5 เวลาการปฏิบัติการก่อนเกิดตะกอนจากแคลเซียมซัลเฟตในท่อที่มีความร้อน<sup>9</sup>

รูปที่ 2.5 แสดงเวลาในการเกิดตะกอนของการทดลองการไหลของแคลเซียมซัลเฟตในน้ำโดยปราศจากเกล็ดชนิดอื่นในท่อความยาว 37 ฟุตและไม่มีการไหลกลับเข้ามาในท่อ (Recirculate) โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ถึงจุดอิมตัววดยิ่ง ระหว่างการไหลผ่านท่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่าใกล้เคียงกับผนังท่อ ขอบเขตของชั้นของเหลวมีอุณหภูมิต่างกับผนังท่อเพียง 1 หรือ 2 องศา

## 2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน<sup>11</sup>

การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการสลับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible Interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางของเหลวและตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง

### 2.4.1 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน<sup>11</sup>

หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการซึ่งเกิดต่อเนื่องกัน

1. กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{Cl}^-$  เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำ โดยทั้งนี้ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ แบเรียม แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ทอง ตะกั่ว เซเลเนียม เงิน แวนาเดียม และสังกะสี

2. ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมาที่สารละลายรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอเรนต์ต่ำกว่าปริมาตรของสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงกว่ามากซึ่งเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายๆ เท่า

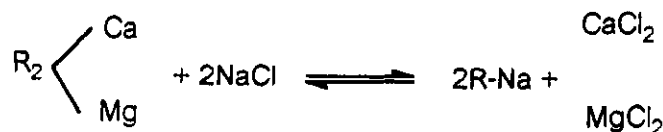
การแลกเปลี่ยนไอออนได้รับการประยุกต์ให้ใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การแก้ความกระด้างของน้ำ (Softener) การทำให้น้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralizer) การกำจัดสารอินทรีย์

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับแก้ความกระด้างของน้ำอาจเขียนสมการเคมีได้ดังนี้<sup>12</sup>



เมื่อ R คือค่าตัวกลางของแข็งซึ่งเดิมอยู่ในรูปของโซเดียมไอออน เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของตัวกลาง ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ คือ แคลเซียมไอออน ในปริมาณที่สมมูลกัน

สำหรับตัวกลางของแข็งที่อยู่ในรูปของแคลเซียม เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือแกงซึ่งมี  $\text{Na}^+$  อยู่เป็นจำนวนมากจึงจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาเป็นตัวกลางที่อยู่ในรูปของโซเดียมอีก ทำให้สามารถนำกลับไปใช้กำจัดความกระด้างได้อีก เขียนสมการเคมีได้ดังนี้<sup>12</sup>



โดยสารละลายเกลือแกงจะต้องมีความเข้มข้นในปริมาณมากเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยากลับทิศทาง

#### 2.4.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงสร้างคล้ายตาข่ายสามมิติ โดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุอยู่ตามตำแหน่งบนตาข่ายเรียกว่า เมตริกซ์ (Matrix) ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายเรียกว่า กลุ่มฟังก์ชัน (Functional Group) และคงรูปร่างอยู่โดยไม่ละลายน้ำและไม่แตกหักง่าย โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูปลามมิติ ที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ถ้าปริมาณของตัวประสานมาก โครงสร้างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของตัวประสานน้อยโครงสร้างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่นๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นในเรซิน กล่าวคือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวก จึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มีความเหนียวแน่นของการประสานสูงเกินไปจะมีความพรุนต่ำ ทำให้มีความชื้นอยู่ในเรซินน้อย ทำให้เรซินแตกหักง่าย ส่วนเรซินที่มีความเหนียวแน่นของการประสานต่ำเกินไปจะมีความพรุนมากทำให้อมน้ำได้มากแต่สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวต่ำ

กลุ่มฟังก์ชันของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่นความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ถ้าโครงสร้างเมตริกซ์มีไอออนลบ ประจำตัว กลุ่มฟังก์ชันจะมีไอออนบวก เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchanger) ถ้าโครงสร้างเมตริกซ์มีไอออนบวก กลุ่มฟังก์ชันจะมีไอออนลบ เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchanger)

เรซินซึ่งสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นพอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่รวมตัวอยู่กับไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene) โดยกลุ่มฟังก์ชันของสารแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นพวก ซัลโฟนิก (Sulphonic) คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) หรือฟอสฟอนิก (Phosphonic) ส่วนเรซินที่นำมาใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนลบ มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นพวก ควอเตอ์นารีแอมโมเนียม (Quarternary ammonium) ไพรมารีเอมีน (Primary amine) หรือเซคันดารีเอมีน (Secondary amine)

### 2.4.3 การแบ่งเรซินตามลักษณะการใช้งานตามกลุ่มฟังก์ชัน

สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน จะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันของเรซิน สามารถแบ่งได้เป็นประเภทกรด (Acidity) และด่าง (Basicity) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นเรซินแบบกรดแก่ (Strong Acid Ion Exchanger) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak Acid Ion Exchanger) เรซินแบบด่างแก่ (Strong Basic Ion Exchanger) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak Basic Ion Exchanger)

1. เรซินแบบกรดแก่ คือพวกที่มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นพวกกรดแก่ เช่น กรดซัลโฟนิก (Sulphonic Acid) หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่จะใช้ไอออนบวกของตัวเองคือไฮโดรเจนไอออน หรือไฮโดรเจนไอออน แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$  เป็นต้น  $\text{H}^+$  หรือ  $\text{Na}^+$  เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซิน โดยเรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิก ( $-\text{SO}_3$ ) เป็นหมู่ฟังก์ชันซึ่งจับอยู่ติดกับโครงไฮโดรคาร์บอน หมู่ซัลโฟนิกนี้จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนหรือไฮเดียมก็ได้ ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{SO}_3\text{Na}$ )  $-\text{SO}_3$  จะเป็นส่วนที่ไม่ใช้ในการแลกเปลี่ยน มีแต่  $\text{H}^+$  หรือ  $\text{Na}^+$  ที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มีไฮโดรเจน เป็นดังนี้คือ<sup>12</sup>



เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะจับไอออนบวกในน้ำได้ทั้งหมด เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนประจุ สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้โดยการทำรีเจนเนอเรชัน เรซินที่อยู่ในรูปของไฮเดียม ต้องรีเจนเนอเรตด้วยไฮเดียมคลอไรด์



ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของไฮโดรเจน ต้องรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่



ข้อดีของเรซินแบบกรดแก่

1. ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างทุกระดับ
2. สามารถแยกไฮเดียมไอออนจากเกลือแองได้
3. การรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เกิดขึ้นน้อย
4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็ว
5. มีความคงทนใช้งานได้นาน โดยมีการสูญเสียอำนาจที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

6. การเปลี่ยนรูปของ  $\text{Na}^+$  ในเรซินเป็น  $\text{H}^+$  ทำให้ปริมาณเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 7 (พองน้ำ)
7. เหมาะสำหรับการกำจัดความกระด้างหรือการทำน้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ

#### ข้อเสียของเรซินแบบกรดแก่คือ

1. มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตต่ำประมาณร้อยละ 25-45 ทำให้ต้องเปลี่ยนสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชัน
2. ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ทำให้เรซินเกิดการบวมและมีความชื้นสูงขึ้นโดยเฉพาะเรซินที่มีระดับของการประสานโครงร่างต่ำ
2. เรซินแบบกรดอ่อน คือพวกที่มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นพวกกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะซิติก เรซินชนิดนี้แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในภาวะที่เป็นกรดทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนให้กับเกลือที่ได้จากกรดแก่ เช่น  $\text{NaCl}$   $\text{CaSO}_4$

#### ข้อดีของเรซินแบบกรดอ่อน

1. ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันสูงถึงร้อยละ 90 โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูป  $\text{H}^+$  เพราะเรซินมีความชอบ  $\text{H}^+$  สูง
2. ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า
3. ทนต่อสารออกซิแดนท์ (Oxidant) เช่น คลอรีน ได้ดี
4. เรซินในรูป  $\text{H}^+$  สามารถกำจัดความเป็นด่างออกจากน้ำได้โดยไม่ต้องเติมกรด
5. เรซินสามารถใช้รีเจนเนอเรตจากการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดแก่ได้
6. มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมใช้โซเดียมรั่วหนีได้มาก

#### ข้อเสียของเรซินแบบกรดอ่อน

1. เรซินใช้ได้ภายใต้ภาวะจำกัด เช่น ใช้ได้กับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ขึ้นไป<sup>12</sup>
2. เรซินไม่มีขีดความสามารถในการแยกเกลือ
3. การเปลี่ยนรูป  $\text{H}^+$  ทำให้ปริมาณเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า
4. เรซินมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้าและขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำดิบ



5. เรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดการรั่วของไอออนที่ต้องการกำจัดออก

3. เรซินแบบต่างแก่ คือเรซินที่มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นพวกต่างแก่ เช่น ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม หน้าที่ของเรซินแบบต่างแก่คือ ใช้ไอออนลบแลกไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{Cl}^-$  เป็นต้น

เรซินแบบต่างแก่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่ 1 (Type I)
2. ชนิดที่ 2 (Type II)

เนื่องจากกลุ่มฟังก์ชันเป็นต่างแก่ ในกรณีที่รีเจนเนอเรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงมีความสามารถในการจับกรดได้ทุกชนิด ทั้งกรดแก่และกรดอ่อน ส่วนในกรณีที่รีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง สามารถกำจัดไอออนลบของเกลือได้ เช่น ใช้กำจัดโบคาร์บอเนต ไนเตรต ซัลเฟต โดยแลกเปลี่ยนกับคลอไรด์

สำหรับชนิดที่ 1 เป็นเรซินที่ทนความร้อนได้ถึง 60 องศาเซลเซียส มีความคงทนดีกว่าชนิดที่ 2 และมีความสามารถในการจับซิลิกาได้ดีกว่าชนิดที่ 2 แต่ชนิดที่ 2 จะมีความจุ (Capacity) ในการใช้งานสูงกว่า ชนิดที่ 1 ประมาณร้อยละ 20 ต่อปริมาณการให้สารเคมีที่รีเจนเนอเรตเท่าๆ กัน

**ข้อดีของเรซินแบบต่างแก่**

1. สามารถใช้ได้ดีกับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างทุกระดับ
2. มีความสามารถในการแยกเกลือ
3. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว

**ข้อเสียของเรซินแบบต่างแก่**

1. ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตต่ำประมาณร้อยละ 18-33 ทำให้เปลืองสารรีเจนเนอเรนต์มาก
2. มีความคงทนต่ำจึงทำให้อายุการใช้งานสั้น
3. ในกรณีที่น้ำเสียมีกรดที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของพืช ทำให้เรซินเสียและไม่สามารถรีเจนเนอเรตได้อีก

4. เรซินแบบต่างอ่อน คือเรซินที่มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นพวกต่างอ่อน ได้แก่พวก Primary Secondary หรือ Tertiary Amino การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะแตกต่างจากเรซินทั้ง 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่นกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก ออกจากน้ำและไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่โมเลกุลของกรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซินดังนี้<sup>13</sup>



ข้อดีของเรซินแบบต่างอ่อน

1. ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตสูงเกือบร้อยละ 100 ทำให้ไม่สิ้นเปลืองสารเคมี
2. ทนต่อกรดที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชได้
3. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง

ข้อเสียของเรซินแบบต่างอ่อน

1. มีอัตราการแลกเปลี่ยนช้า
2. ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.5 กระบวนการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล<sup>2,14</sup>

นำกากน้ำตาลมาเจือจางด้วยน้ำสะอาดจนมีปริมาณน้ำตาลประมาณร้อยละ 16-17 ทำการหมักด้วยความร้อนปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก ผ่านการแยกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกเข้าถังหมักประมาณ 72 ชั่วโมงจะได้แอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นประมาณ ร้อยละ 9-10 เมื่อออกจากถังหมักนำมาแยกตะกอนแล้วจะได้น้ำสา 2 ชนิดคือน้ำสาชั้นกับน้ำสาใส น้ำสาชั้นนำเข้าสู่การกลั่นแบบกะเพื่อให้ได้แอลกอฮอล์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 35 ส่วนน้ำสาใสนำเข้าสู่การกลั่นแบบต่อเนื่องเพื่อให้ได้แอลกอฮอล์เข้มข้นประมาณร้อยละ 95

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schoenrock, K. W. R., Richey, P., และ Rounds, H. G.<sup>15</sup> ทำการวิจัยเรื่องกระบวนการตั้งแคลเซียมจากน้ำตาลที่ผลิตจากหัวบีท ในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการกำจัดแคลเซียมไอออนโดยแบ่งกระบวนการเป็น ขั้นตอนคือกระบวนการคาร์บอนเนชั่น และการแลกเปลี่ยนไอออน กล่าวคือในงานวิจัยนี้เติมโซเดียมคาร์บอเนต ให้แคลเซียมตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากนั้นผ่านเข้ากระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน อัตราการไหล 20-200 ของปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และเวลาในการสัมผัสกับเรซินน้อยกว่า 3 นาที

Nakasone, S. และคณะ<sup>16,17</sup> ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดเกลือ ออกจากสารละลายน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อย และกากน้ำตาล โดยเริ่มจากกระบวนการผสมวัตถุดิบกับเกลือของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งทำปฏิกิริยากับไอออนลบของกรดออกซี ของสารอนินทรีย์ (Inorganic Oxy Acid Anions) และอนุมูล รวมทั้งกรดของสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ จนกระทั่งตกตะกอน เช่น แคลเซียมคลอไรด์ หลังจากนั้นแยกตะกอนออกจากสารละลายโดยการเหวี่ยงแยก และผ่านกระบวนการอิเลคโตรไดอะไลซิสที่มีแผ่นฟิล์มแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Film) และแผ่นฟิล์มชนิดเป็นกลาง (Neutral Film) วางสลับกัน

Rimedio, N. T., และ Chem, L. F.<sup>18</sup> ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการแยกสารอินทรีย์ในส่วนที่ไม่ใช้น้ำตาล คอลลอยด์ วัสดุ และสารประกอบอนินทรีย์ จากน้ำผลไม้ สุรา น้ำเชื่อม และหรือกากน้ำตาล โดยแบ่งน้ำผลไม้ สุรา น้ำเชื่อม หรือกากน้ำตาลออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกคือส่วนที่มีองค์ประกอบของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ประกอบด้วย สารปนเปื้อนที่ไม่ใช้น้ำตาล อันได้แก่สารอินทรีย์ที่ไม่ใช้น้ำตาล สารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน กรดที่ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน โซ

ยางเหนียว แป้ง และอื่นๆ รวมทั้งองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และส่วนที่สองคือ ส่วนที่มีองค์ประกอบของสารที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าได้แก่ น้ำตาลและเกลือต่างๆที่ละลายได้อีก เล็กน้อย ซึ่งได้จากการผ่านกระบวนการของการแยกองค์ประกอบสารอินทรีย์ เช่น แคลเซียม ออกไปแล้วมีขั้นตอนดังนี้

- เจือจางสารป้อน
- ลดปริมาณไอออนบวกของสารป้อนด้วยการตกตะกอน
- เปลี่ยนรูปโครมในสารป้อนให้เป็นกลูโครมและฟรักโตส
- กำจัดสารที่ไม่ละลายออก
- ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 2.5-7
- ผ่านกระบวนการโครมาโตกราฟี

เช่นในตัวอย่างการทดลองใช้กากน้ำตาลเจือจางด้วยน้ำให้เหลือ 50 ปริกซ์โดยเติม กรด ซัลฟิวริก จนค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 2.2 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้แคลเซียมตกตะกอนในรูปของแคลเซียมซัลเฟต และในระหว่างนี้โครมจะ เปลี่ยนรูปไปเป็น กลูโครมและฟรักโตส เหวียงแยกตะกอนออก เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ค่า ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 กวน 5 นาที กรองเพื่อนำของแข็งที่ไม่ละลายออก และผ่านกระบวนการโครมาโตกราฟี

Saska, M., และ Lancrenon, X.<sup>19</sup> และคณะวิจัยกระบวนการกำจัดแคลเซียม แมกนีเซียม ในสารละลายน้ำตาล หรือ กากน้ำตาล เนื่องจากเกลือแคลเซียม และแมกนีเซียม ละลายอยู่ในกากน้ำตาลจึงต้องกำจัดออกด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินที่อยู่ในรูปของ โซเดียมไอออน และหรือโพแทสเซียมไอออน และหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้นแล้วก็ต้องมีการรี เจนเนอเรต (Regenerate) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ หรือ โพแทสเซียมคลอไรด์ แต่พบว่าผลทางด้าน เศรษฐศาสตร์ไม่เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนวิธีรีเจนเนอเรตโดยใช้กากน้ำตาลที่ ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว ซึ่งกากน้ำตาลที่ผ่านกระบวนการนี้มีปริมาณโซเดียมไอออน และ โพแทสเซียมไอออนมาก จึงนำบางส่วนกลับเข้าไปรีเจนเนอเรตแทนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หรือ โพแทสเซียมคลอไรด์ เพื่อเป็นการประหยัดรีเอเจนต์จากภายนอกที่นำมาใช้รีเจนเนอเรต

Clarke, S. J., และ Rouge, B.<sup>20</sup> วิจัยการทำให้กากน้ำตาลหรือน้ำเชื่อมมีความบริสุทธิ์ โดยการตกตะกอนแคลเซียมให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง โดยการเติม NaOH หรือ KOH เพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 หลังจากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ โซเดียม

คาร์บอนเนต หรือโพแทสเซียมคาร์บอนเนต ในอัตราส่วนเทียบกับปริมาณของแคลเซียมเท่ากับ 1.3:1 และควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 9 เดิมตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ลงในกากน้ำตาลในอัตราส่วนของน้ำเทียบกับตัวทำละลาย 1:2 เพื่อแยกพอลิเมอร์ของสารอินทรีย์ออก หลังจากนั้นเหวี่ยงแยกเพื่อนำตะกอนที่เป็นของแข็งออก

Kaseno., และ Kokugan, T.<sup>21</sup> ศึกษาผลของการบำบัดกากน้ำตาลด้วยวิธีเซรามิกไมโครฟิวเตรชันเมมเบรน (Ceramic Microfiltration Membrane) ที่มีต่อการหมักเอทิลแอลกอฮอล์โดยใช้เซรามิกไมโครฟิวเตรชันเมมเบรนที่มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ 0.05 ไมโครเมตร พบว่าสีในกากน้ำตาลลดลงอันเป็นผลเนื่องมาจากเถ้าในกากน้ำตาลลดลง รวมทั้งปริมาณน้ำตาลที่เหลือจากการหมักลดลงร้อยละ 42 เมื่อเปรียบเทียบกับกากน้ำตาลที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดและปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นร้อยละ 18.1 ที่เวลาการหมักมากกว่า 78 ชั่วโมงในการหมักแบบกะ (Batch Fermentation) และในระบบเพอร์แวปเพอเรชัน (Pervaporation) กิ่งต่อเนื่อง พบว่ากากน้ำตาลที่ผ่านการบำบัดเพิ่มปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ได้ประมาณร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับกากน้ำตาลที่ไม่ผ่านการบำบัดที่เวลาการปฏิบัติการมากกว่า 168 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย