บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การตกผลึกของคอปเปอร์ซัลเฟตในเครื่องตกผลึกแบบซาห์นโฮส ในส่วนงานวิจัยสนใจขนาดของผลึกที่ได้จากการตกผลึก และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดของผลึกในแต่ละขั้นของการตกผลึก สรุปได้ดังนี้

<u>ขั้นการเกิดนิวคลีเอชัน</u>

1. ผลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อขนาดของผลึก

เมื่อทำการตกผลึกในหอตกผลึก ที่อัตราการไหลคงที่คือ 0.0468 กก./วินาที ที่ความเร็วอากาศ 4 ค่า คือ 0.0819, 0.1233, 0.1585 และ 0.1868 ลูกบาศก์เมตร/วินาที พบว่าเมื่อค่าความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น อุณหภูมิของสารละลายเมื่อออกจากหอตกผลึกลดลง ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.1 - 4.3 เนื่องจากสาเหตุต่อไปนี้

1.1 ในการตกผลึกสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในหอตกผลึก มีการระเหยของตัวทำละลายเมื่อสารละลายสัมผัสกับอากาศ เมื่อค่าความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะเกิดการระเหยได้มาก สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น และจะเกิดการตกผลึกได้เร็วขึ้น ดังนั้นผลึกจึงมีเวลาอยู่ในหอตกผลึกได้นานขึ้น ผลึกที่ได้จึงมีขนาดใหญ่

1.2 เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น พิจารณาสมการค่าเรโนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \qquad (5.1)$$

เมื่อความเร็วอากาศ (V) เพิ่ม จะมีผลทำให้ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) สูงขึ้นด้วย และจากความสัมพันธ์ของค่า Re กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (h_m) โดย สมมติให้หยดของสารละลายในเครื่องตกผลึกมีลักษณะกลม ดังสมการ

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} = 2.0 + 0.60 \left(\frac{DV\rho}{\mu}\right)^{1/2} \left(\frac{C_P\mu}{k}\right)^{1/3} \qquad (5.2)$$

$$= 2.0 + 0.60\ Re^{1/2}\ Pr^{1/3} \qquad \text{(Ranz,W.E. and Marshall,W.R. ,1952)}$$

เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น ค่า h_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณการถ่ายโอนความร้อนจึงเกิดได้ดี จะเห็นได้จากอุณหภูมิของสารละลายที่ออกจากหอตกผลึกจะลดลง ดังนั้นผลึกจะเกิดขึ้นได้เร็ว และมีเวลาที่ผลึกที่เกิดขึ้นจะอยู่หอตกผลึกได้นานก่อนที่จะออกจากหอตกผลึก ผลึกที่ออกจากหอตกผลึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

1.3 เมื่อค่าความเร็วอากาศมากขึ้น จะมีความสามารถในการต้านการเคลื่อนที่ของหยดสารละลาย ขณะอยู่ภายในหอตกผลึกได้เพิ่มขึ้น ทำให้ผลึกต้องใช้เวลาอยู่ภายในหอตกผลึกมากขึ้น ดังนั้น ผลึกจึงมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศมากขึ้น ผลึกที่ออกจากหอตกผลึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

1.4 เมื่อค่าความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ปริมาณอากาศที่เป็นตัวรับความร้อนและไอน้ำจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีมากขึ้น (เกิด mass transfer ได้มากขึ้น) ดังนั้น ผลึกจึงเกิดได้รวดเร็ว และมีขนาดใหญ่ขึ้น

ค่าความเร็วอากาศที่เหมาะสมคือ 0.1585 ลูกบาศก์เมตร/วินาที เพราะเป็นช่วงที่อัตราการขยายขนาดของผลึกเริ่มคงที่

2. ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อขนาดของผลึก

ทำการตกผลึกที่ความเร็วอากาศคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลาย โดยเมื่อค่าความเร็วอากาศ 0.0819 ลูกบาศก์เมตร/วินาที อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.0219, 0.0468, 0.0595 และ 0.0730 กก./วินาที และเมื่อค่าความเร็วอากาศ 0.1585 ลูกบาศก์เมตร/วินาที อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.0468, 0.0595, 0.0730 และ 0.1076 กก./วินาที จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ขนาดของผลึกจะเล็กลง ดังรูป 4.4 - 4.7 เนื่องจากสาเหตุดังนี้

2.1 เมื่ออัตราการไหลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่เข้าสู่หอตกผลึกมีค่าน้อย ทำให้พื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกันระหว่างสารละลายและลมมีมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่ากรณีที่อัตราการไหลของสารละลายมาก จึงได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่า

2.2 เมื่ออัตราการไหลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่เข้าสู่หอตกผลึก มีค่าน้อย ผลึกจะมีเวลาอยู่ในหอตกผลึกได้นานกว่ากรณีที่อัตราการไหลของสารละลายมาก ดังนั้นผลึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

อัตราการไหลของสารละลายจะมีผลต่อขนาดของผลึกไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อลดอัตราการไหลของสารละลาย ขนาดของผลึกที่ได้จะใหญ่ขึ้น เมื่ออัตราการไหลมีค่าน้อย

กว่า 0.0595 กก./วินาที ขนาดของผลึกจะใหญ่ขึ้นได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นค่าอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมคือ 0.0595 กก./วินาที

ขั้นการขยายขนาดของผลึก

1. ผลของความเร็วรอบใบพัดกวนที่มีต่อขนาดของผลึก

นำผลึกที่ได้จากการตกผลึกสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อัตราการไหลของสารละลาย 0.0468 กก/วินาที ความเร็วอากาศ 0.1585 ลูกบาศก์เมตร/วินาที มาทำการทดลองการขยายขนาดผลึก โดยใช้ความเร็วรอบใบพัดในการกวน 1000, 1250, 1500 และ 1750 รอบต่อนาที ในสารละลายเดิมที่เหลือจากการตกผลึกที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อความเร็วรอบในการกวนของสารละลายมีค่ามาก ตามทฤษฎีการแพร่ มีผลทำให้ชั้นของ film diffusion ซึ่งเป็นชั้นของความต้านทานการแพร่บางลง จึงส่งผลต่อการขยายขนาดผลึก กล่าวคือ การแพร่ของโมเลกุลของคอปเปอร์ซัลเฟต จากสารละลายมายังที่ผิวของผลึกสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้น อัตราการเพิ่มมวลของผลึกจึงมีค่ามาก ผลึกจึงมีขนาดโตได้รวดเร็ว

เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเร็วรอบใบพัดกวน ขนาดของผลึกจะเพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่าความเร็วรอบใบพัดกวนเพิ่มถึงค่าหนึ่ง ขนาดของผลึกจะมีขนาดเล็กลง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ จึงไม่สามารถศึกษาถึงค่าความเร็วรอบใบพัดกวนที่จุดนั้นได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปค่าความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมได้

2. ผลของการขยายขนาดของผลึกเมื่อมีความเร็วรอบใบพัดกวนคงที่

เมื่อขนาดของผลึกเริ่มต้นที่นำมาศึกษาการขยายขนาดผลึกมีขนาดเล็ก สารละลายขณะนั้นจะมีค่าสภาพอิ่มตัวยวดยิ่งสมบูรณ์ (ΔC) มาก ดังนั้นผลึกขนาดเล็กจึงสามารถขยายขนาดได้อีกมาก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดผลึกเริ่มต้นที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในสารละลายจะมีค่าสภาพอิ่มตัวยวดยิ่งสมบูรณ์ไม่มากนัก ผลึกจึงสามารถขยายขนาดได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากตารางที่ 4.6 - 4.7 และจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ค่าร้อยละของการขยายขนาดของผลึกเมื่อผลึกมีขนาดเล็ก (ความเร็วอากาศ 0.0819 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) จะมีค่ามากที่สุดคือร้อยละ 48.39 และจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของผลึกใหญ่ขึ้น (ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น) โดยเมื่อค่าความเร็วอากาศเป็น 0.1233, 0.1585 และ 0.1868 ค่าร้อยละของการขยายขนาด

ของผลึกจะมีค่า 27.78, 11.90 และ 6.82 ตามลำดับ แนวโน้มของผลึกสามารถขยายขนาดได้ถึงประมาณ 235 ไมโครเมตร เนื่องจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่นำมาตกผลึกมีค่าจำกัดคือประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการขยายขนาดของผลึก พบว่าเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกผลึก คือ ช่วงเวลา 45 นาที เพราะในช่วงแรก (0 - 45 นาที) ผลึกมีอัตราการขยายขนาดที่สูง เมื่อเวลานานกว่านั้น อัตราการขยายขนาดค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการตกผลึกในโรงงานอุตสาหกรรม เวลาที่เหมาะสมในการเลี้ยงผลึกคือประมาณ 45 นาที

<u>การหาค่าอัตราการขยายขนาดของผลึก (Rg)</u>

ขนาดของผลึกขึ้นอยู่กับค่าสภาพอิ่มตัวยวดยิ่งสมบูรณ์ ตามทฤษฎีเมื่อค่าสภาพอิ่มตัวยวดยิ่งสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ขนาดของผลึกจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายขนาดของผลึก จะเป็นดังนี้

$$R_G = K_G \Delta C^g$$

จากวิธี Multiple linear regression จะได้

ค่าคงที่รวมของการขยายขนาด $= K_G = 6.6303*10^{-5}$

อันดับรวมของการขยายขนาด $= g = 1.1469$

ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้คือ

$$R_G = 6.6303* 10^{-4} \Delta C^{1.1469} \text{ กรัม/(ซม.)}^2\text{.นาที}$$

งานวิจัยโดยทั่วไปมีค่าอันดับของอัตราการขยายขนาดของเกลือของสารอนินทรีย์อยู่ในช่วง 1.5-2 (Mullin,J.W.,1971) งานวิจัยนี้ได้อันดับต่ำกว่าค่าโดยทั่วไปเล็กน้อย