

การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกเพื่อผลิตน้ำตาล Numerical Simulation and Analysis of Flow in Crystallizer for Sugar Production

จารุวรรณ ตั้งตันสกุลวงศ์¹ เอเดรียน ฟลัด² และ ทวิช จิตรสมบุญ¹
¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร (044) 224410 โทรสาร (044) 224411, E-Mail: Jacksut@hotmail.com, tabon@ccs.sut.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร (044) 224497 โทรสาร (044) 224165, E-Mail: adrianfl@ccs.sut.ac.th

Jaruwan Tangtonsakulwong¹, Adrian Flood² and Tawit Chitsomboon¹

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Ave., Muang District, Nakorn Ratchasima, Thailand 30000

Tel: 044-224410 , Fax:044-224411 , Email: jacksut@hotmail.com, tabon@ccs.sut.ac.th

²School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Ave., Muang District, Nakorn Ratchasima, Thailand 30000

Tel: 044-224497 , Fax:044-224165 , Email: adrianfl@ccs.sut.ac.th

บทคัดย่อ

ลักษณะการไหลในถังตกผลึกเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตผลึก เช่น มีผลกระทบโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของขนาดผลึกที่ได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อจำลองเชิงตัวเลขและวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกจำลองของน้ำตาลประเภทต่อเนื่องโดยการทำความเข้าใจแบบทรงกระบอกกันโค้งซึ่งมีขนาดเล็ก ภายในมีใบพัดใช้ในการปั่นให้ของไหลไหลลงด้านล่าง ซึ่งในการจำลองนี้ใบพัดจะถูกแทนที่ด้วยแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และใช้โปรแกรม CFX5.5. ช่วยในการจำลองการไหลในสามมิติ โดยใช้กริดวิธีปริมาตรจำกัดและกริดไร้โครงสร้าง (Unstructured grid) การไหลจะถูกพิจารณาให้เป็นการไหลแบบเฟสเดียว ซึ่งใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสเป็นของไหลหลักในการศึกษา และไม่พิจารณาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในถังตกผลึกไม่เป็นเอกรูป และการเปลี่ยนโมเมนตัมในแนวแกนทำให้ความเร็วในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้รูปแบบการไหลทั่วไปภายในถังผลึกเปลี่ยนไปมากนัก นอกจากบริเวณปากทางเข้าของท่อดูดออก ซึ่งรูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับขนาดของโมเมนตัมที่ให้ ตลอดจนการดูดสารออกแบบ Isokinetic ก็ขึ้นอยู่กับค่าโมเมนตัมที่ให้เช่นกัน โดยที่ค่าโมเมนตัมเท่ากับ $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ทำให้การไหลบริเวณปากท่อใกล้เคียงการดูดออกแบบ Isokinetic มากที่สุด ซึ่งเป็นผลต่อการตกผลึกทำให้ขนาดของผลึกที่ได้มีการกระจายแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นรูปแบบการกระจายที่จะให้ผลึกมีคุณภาพดีที่สุด นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของกันดั้มยังมี

ความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง ซึ่งเห็นว่าผลึกจะไม่สามารถลอยขึ้นมาได้ในบริเวณดังกล่าวอันจะเป็นสาเหตุของการตกตะกอนของผลึกน้ำตาลและจับกันเป็นก้อนแข็งอยู่ที่กันดั้มได้

Abstract

The characteristics of a flow field in a crystallizer are key factors for a crystallization process. For example, it directly influences the crystal size distribution. The aim of this research is to numerically simulate the fluid flow in a small-scale (experimental) cylindrical round bottomed, continuous cooling crystallizer for sugar. Inside the tank, an impeller to force the downward flow in the draft tube is also included. For simplification and reducing the execution time consumed by the simulation software, the impeller is adequately modeled by using a momentum source. CFX 5.5.1 was employed to perform the 3D simulation with the finite volume method using an unstructured mesh. In addition, one phase flow is determined. Heat transfer is not significant in the isothermal crystallizer study. The effect of temperature on the crystallizing process is also ignored and the use of a sucrose solution as a test fluid is examined. The simulation results show that the flow pattern in the crystallizer is non-uniform. The axial momentum strongly increases the axial

flow velocity but only slightly influences the flow pattern, except the flow near the outlet tube that depends on the momentum applied. Also, the isokinetic withdrawal depends on the momentum applied. The momentum source of $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ gives the most similar flow to the isokinetic withdrawal. This leads the exponential crystal-sized distribution, which is the optimum. Furthermore, the velocity at the center of the tank's bottom is lower than that of the surrounding region. As a result, sugar crystals may settle and cause the collection of the settled crystals at the bottom.

1. บทนำ

ความสม่ำเสมอของขนาดของผลึกน้ำตาลเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลทั้งต่อกระบวนการผลิตและการตลาดสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ตัวอย่างปัญหาในด้านการผลิต เช่น การกรองผลึก ในกรณีของผลึกที่มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันในเยื่อกรอง ส่งผลให้ความดันภายในสูงขึ้นและเกิดการฉีกขาดของเยื่อกรองได้ ผลกระทบนี้ทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ในกรณีของผลึกที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาในการนำผลึกออกจากถังผลึก เนื่องจากผลึกมีน้ำหนักมากและไม่สามารถลอยเข้าท่อออกได้ เกิดการตกตะกอนไปรวมกันที่ก้นถังและจับกันเป็นแผ่นแข็ง นอกจากนี้การได้ผลึกหลายขนาดในกระบวนการผลิต ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแยกผลึกมากขึ้น ส่วนปัญหาทางด้านการตลาดซึ่งถือเป็นปัญหาหลักที่สำคัญ ได้แก่ ผลึกที่ได้มีขนาดไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ กลายเป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ ขายไม่ได้ราคาหรือได้ราคาต่ำ สำหรับผลึกน้ำตาลที่มีขนาดใหญ่จะละลายช้าเมื่อนำไปใช้งาน หรือเมื่อผสมเข้ากับอาหารแล้วเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้รสชาติของอาหารเปลี่ยนไป ไม่ได้รับความนิยมในหมู่ผู้บริโภคบางกลุ่มเนื่องจากปัญหาดังกล่าว ทำให้อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลในปัจจุบันให้ความสำคัญต่อขนาดและความสม่ำเสมอของขนาดผลึกเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของขนาดผลึกนั้นมีหลายประการด้วยกัน เช่น

1. ลักษณะการไหล และการผสมของสารละลายภายในถังผลึก
2. อุณหภูมิในการตกผลึก
3. ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าถังผลึก
4. สถานะ การอ้อมตัวของสารละลาย

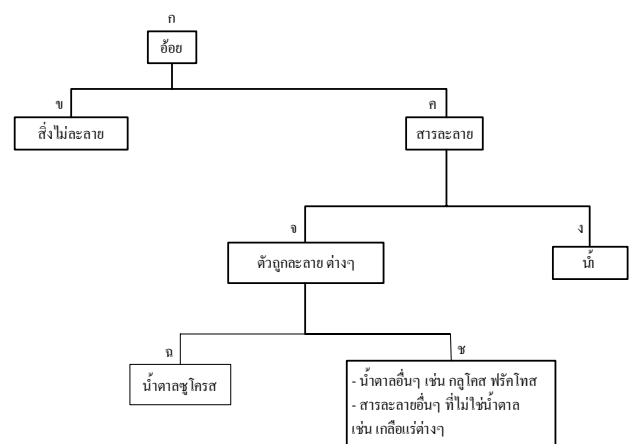
ลักษณะการไหลและการผสมกันภายในถังตกผลึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น การศึกษาลักษณะการไหลภายในถังตกผลึกจึงเป็นแนวทางที่สำคัญที่จะนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของผลึกให้มีขนาดสม่ำเสมอได้ ในทางปฏิบัติ การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการไหลตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการไหลในถังผลึกมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกน้ำตาลได้ ทำให้การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองผลเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพของผลึกน้ำตาลได้และยังช่วยลดต้นทุนในการทำวิจัยอีกด้วย

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการไหลในถังตกผลึกน้ำตาลประเภทต่อเนื่องโดยการทำความเป็นลักษณะการไหลแบบที่มีความใกล้เคียงกับถังกวนซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังในเอกสารอ้างอิง งานวิจัย[1,2] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลในถังกวน นอกจากนี้ [2] ได้ทำการจำลองการไหลในถังกวนโดยพิจารณาของไหลเฟสเดียว ส่วนเอกสาร [3,4,6] เกี่ยวข้องกับการจำลองการไหลสองเฟสในถังกวนกวนสาร นอกจากนี้เอกสาร [5,6] ศึกษาผลกระทบจากการผสมที่ไม่สมบูรณ์ในถังผลึก

2. น้ำตาลและการตกผลึก

น้ำตาลจากธรรมชาติมีหลายประเภท เช่น แล็กโทส ซึ่งพบในน้ำนม กลูโคสและฟรุคโทส พบในน้ำผึ้งและผลไม้ต่าง ๆ โดยปกติพืชส่วนใหญ่จะเก็บพลังงานที่ได้ภายหลังจากการสังเคราะห์ด้วยแสงในรูปของแป้ง แต่พืชบางประเภทจะมีความสามารถหรือมีน้ำย่อยพิเศษที่สามารถสังเคราะห์และเก็บพลังงานไว้ในรูปของน้ำตาลซูโครสได้ ซูโครสนั้นเป็นสารประกอบของน้ำตาลจากธรรมชาติสองตัวด้วยกันคือน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุคโทส เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติจากพืชสีเขียว โดยประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานจากแสงอาทิตย์ในรูปของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ทำให้ได้ซูโครสขึ้นมาในความเป็นจริง ซูโครสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบในธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ที่สุดตัวหนึ่ง

น้ำตาลจากอ้อย และน้ำตาลจากหัวผักกาดแดง (Beet root) โดยปกติมีชื่อเรียกในทางเทคนิคว่าเป็นน้ำตาลซูโครส เนื่องจากมีส่วนประกอบหลักเป็นน้ำตาลซูโครส บางแห่งอาจจะเรียกซูโครสว่าแซคคาไรส (Saccharose) ซึ่งในประเทศไทย อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลจะใช้แหล่งน้ำตาลดิบจากอ้อย ส่วนประกอบของน้ำตาลจากอ้อยเป็นดังแผนภูมิต่อไปนี้



รูปที่ 1 แผนภูมิส่วนประกอบน้ำตาลจากอ้อย

การตกผลึก คือการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุหนึ่งธาตุใดหรือหลายธาตุจากสถานะของไหล หรือของแข็งที่มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous solid) หรือสถานะก๊าซไปสู่สถานะของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบชัดเจนแน่นอน (Crystalline state)

สำหรับส่วนที่เป็นของเหลว การตกผลึกจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นอยู่เหนือจุดอิ่มตัว (Super saturation) กรณีการตกผลึกจากสารละลายนั้นกลไกสำคัญที่ควบคุมการตกผลึกโดยส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียว สารแต่ละจะประเภทจะมีกรรมวิธีการทำให้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นเหนือจุดอิ่มตัวที่แตกต่างกัน กระบวนการตกผลึกจากสารละลายนั้นสามารถแยกประเภทตามกรรมวิธีการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นเหนือจุดอิ่มตัวได้ดังนี้

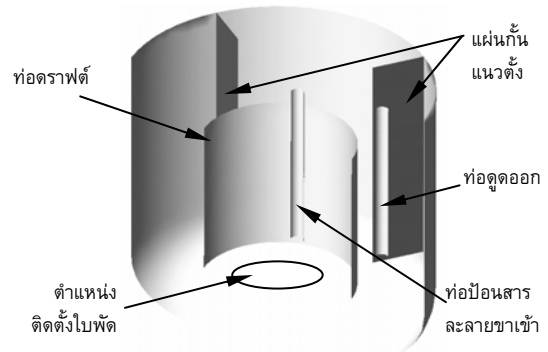
1. Cooling crystallization
2. Evaporative crystallization
3. Vacuum crystallization
4. Drowning out crystallization
5. Pressure crystallization
6. Reaction crystallization

การศึกษาการตกผลึกน้ำตาลจากสารละลายน้ำตาลซูโครสนิยมใช้วิธีการทำความเย็นซึ่งเป็นกระบวนการตกผลึกที่อาศัยการให้ความเย็นแก่สารละลายเพื่อให้เกิดภาวะความเข้มข้นเหนือจุดอิ่มตัวในสารละลายดังกล่าว โดยปกติการตกผลึกประเภทนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายตามอุณหภูมิได้ดี เช่น โปตัสเซียม โซเดียม แอมโมเนียมไนเตรท และ คอปเปอร์ซัลเฟท โดยอาศัยหลักการทำให้สารละลายร้อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิ เมื่อความสามารถในการละลายลดลงส่วนที่เหลือก็จะตกผลึกออกมา สารละลายที่อยู่ในสภาวะความเข้มข้นต่ำกว่าจุดอิ่มตัวจะถูกส่งเข้าไปภายในถังตกผลึกและให้ความเย็นโดยอาจทำเป็นปลอกห่อด้านนอกหรือเป็นระบบทำความเย็นภายในก็ได้ ซึ่งในระบบเล็ก ๆ นิยมใส่สารละลายเข้าไปก่อนแล้วจึงให้ความเย็น (Batch Operation) ระบบนี้มีข้อเสียคือความเย็นที่ให้กับผลึกไม่สม่ำเสมอ การตกผลึกที่ค่าความเข้มข้นเหนือจุดอิ่มตัวต่างกันมีผลทำให้ได้ขนาดผลึกที่แตกต่างกันและได้ผลึกต่างรูปกัน วิธีการแก้ไขคือพยายามทำให้เกิดค่าความเข้มข้นเหนือจุดอิ่มตัวที่คงที่ได้มากที่สุด ซึ่งทำให้ผลึกที่ได้มีความสม่ำเสมอ สำหรับในระบบที่ใหญ่ขึ้นนิยมให้สารละลายไหลเข้าดังอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง (Continuous mode) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการตกผลึกในระบบต่อเนื่องนี้การดูดผลึกที่ออกมีผลต่อการกระจายตัวของขนาดของผลึกเป็นอย่างมาก การไหลที่จะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพนั้นต้องการการไหลบริเวณท่อดูดออกแบบ Isokinetic นั่นคือการไหลภายในท่อที่ภายนอกท่อก่อนถึงทางเข้าท่อดูดออกมีความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้เส้นทางการไหลของผลึกขนาดต่าง ๆ ไม่เบี่ยงออกจากปากท่อ หากการไหลเข้าสู่ท่อดูดออกไม่เป็น isokinetic เช่น ความเร็วที่ปากทางเข้าท่อบานน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ เส้นทางการไหลจะลู่เข้าสู่ปากท่อเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ผลึกขนาดเล็กซึ่งมักจะไหลไปตามกระแสของของไหลอย่างอิสระจะถูกดูดเข้ามาสู่ปากท่อได้ในบริเวณกว้าง ทำให้สารละลายที่ดูดออกมามีผลึกขนาดเล็กมากกว่าผลึกขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากความเร็วภายนอกท่อสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยภายในท่อดูดออก ลักษณะเส้นทางการไหลบริเวณปากท่อจะมีแนวโน้มเบี่ยงออกจากปากท่อ ทำให้ผลึกขนาดเล็ก ๆ ไหล

ออกจากปากท่อ ในขณะที่ผลึกขนาดใหญ่เนื่องจากน้ำหนักที่มากกว่ามันจะสามารถลอยตัดเส้นทางการไหลเข้าปากท่อได้ ทั้งนี้ในกระบวนการตกผลึกโดยทั่วไปมักต้องการให้การผสมกันภายในถังผลึกตลอดจนภายในท่อดูดออกมีความเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) แต่การดูดออกแบบไม่เป็น Isokinetic จะทำให้การผสมไม่เป็นเอกพันธ์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการกระจายตัวของขนาดของผลึกที่ได้และการเจริญเติบโตของผลึกอื่นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำได้

3. ลักษณะทางกายภาพของถังตกผลึก

ถังตกผลึกที่ใช้ในการจำลองการไหลมีลักษณะเป็นถังตกผลึกประเภททำความเย็นแบบให้การไหลต่อเนื่องโดยมีขนาดเท่ากับถังตกผลึกจำลองในห้องปฏิบัติการเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง 68.5 mm ก้นถังมีลักษณะโค้ง ภายในประกอบด้วย แผ่นกั้นแนวตั้ง (Vertical baffle) ขนาดกว้าง 2.4 mm จำนวน 4 ตัว วางห่างกันตัวละ 90 องศา และท่อดราฟต์แนวตั้ง สูง 34.5 mm อยู่กึ่งกลางถัง ภายในมีใบพัดใช้ในการปั่นให้ของไหลให้ไหลลงตามแนวแกนของถัง ท่อดูดเข้าและท่อดูดออกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 6 mm ซึ่งมีหน้าที่นำสารละลายเข้าและดูดสารละลายรวมถึงผลึกน้ำตาลออกจากกระบอก ด้วยอัตราการไหล 25 ลิตร/ชั่วโมง ลักษณะของถังตกผลึกแสดงไว้ในรูปที่ 2

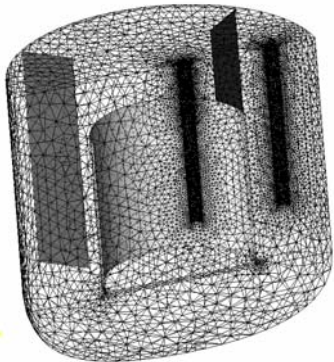


รูปที่ 2 แสดงลักษณะของถังตกผลึก (ผัดครั้ง)

4. การจำลองการไหล

การจำลองการไหลสำหรับกระบวนการนี้เป็นแบบสามมิติ เนื่องจากถังตกผลึกมีลักษณะสมมาตรทำให้การจำลองการไหลสามารถพิจารณาได้จากการสร้างถังตกผลึกจำลองเพียงครึ่งเดียว ซึ่งรัศมีตัวถังเท่ากับ 68.5 mm ความกว้างของแผ่นกั้นแนวตั้ง 2.4 mm และความสูงของท่อดราฟต์เป็น 70 mm เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวท่อดูดเข้าและท่อดูดออกเป็น 3 mm และ 75 mm ตามลำดับ การจำลองผลใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์การไหล CFX5.1 จำลองการไหลเฟสเดียวโดยใช้สารละลายน้ำตาลซึ่งมีความหนาแน่น 1342.7 kg/m^3 และมีความหนืด 236.77 mPa.s เป็นของไหลหลัก กำหนดให้ ท่อนำเข้าและท่อดูดออก ตลอดจนแผ่นกั้นแนวตั้งและท่อดราฟต์มีผิวที่บาง ไม่มีความหนาและจำลองให้เป็นพื้นผิวสองมิติ เนื่องจากน้ำตาลเป็นสารมีความหนืดสูงและมีการติดตั้ง แผ่นกั้นแนวตั้ง ไว้ในถังเพื่อจำกัดการไหลในแนวรัศมีและใบพัดที่ใช้เป็นใบพัดสำหรับปั่นของไหลให้ไหลลงแนวแกนของถัง ผลึก การจำลองจึงสมมุติให้ใบพัดไม่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมีเลย

ทำให้สามารถแทนที่ได้ด้วยแหล่งกำเนิดโมเมนตัมและกำหนดให้โมเมนตัมมีค่าเฉพาะในแนวแกนเท่านั้น โดยทำการจำลองที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรเป็น 0 1000 10000 15000 18000 30000 และ 50000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ นอกจากนี้ยังกำหนดให้การจำลองการไหลในถังเป็นการไหลในย่านความเร็วต่ำซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบและคงตัว สำหรับการแบ่งกริดใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัด และใช้กริดแบบไร้โครงสร้าง ซึ่งมีจำนวนโหนด จำนวนอิลิเมนต์ และจำนวนหน้าทั้งหมด 73735 โหนด 376481 อิลิเมนต์ และ 40716 หน้าตามลำดับ ลักษณะของกริดที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3

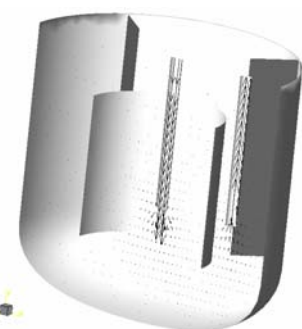


รูปที่ 3 การแบ่งกริดภายในถังตกผลึก

เนื่องจากการตกผลึกด้วยวิธีการทำความเย็นจากสารละลายนี้กำหนดให้สารละลายที่ไหลเข้าท่อนำเข้ามีอัตราการไหลที่ต่ำมาก และผลต่างของอุณหภูมิของสารละลายขาเข้าและสารละลายภายในถังตลอดจนที่ท่อ خروجมีค่าต่างกันเล็กน้อย ไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส การตกผลึกประเภทดังกล่าวถือว่าเป็นกระบวนการ Isothermal กลไกที่ควบคุมการตกผลึกเป็นกลไกการถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียว การจำลองนี้จึงไม่คิดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการตกผลึก

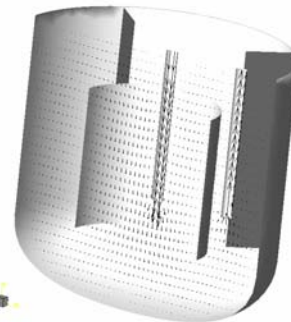
5. ผลการจำลอง

จากการจำลองผลที่ค่าโมเมนตัมเป็น 0 และ $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ พบว่าความเร็วภายในถังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วในท่อ خروجและที่ท่อเข้า การไหลมีลักษณะลู่เข้าหาที่ท่อ خروجเป็นวงกว้างซึ่งไม่เป็นการ خروجแบบ Isokinetic ในกรณีนี้ที่เพิ่มค่าค่าโมเมนตัมเป็น $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ถึงแม้ว่าความเร็วภายนอกท่อ خروجจะเพิ่มขึ้นมากกว่าสองกรณีแรก แต่ก็ยังพบว่ายังมีการลู่เข้าของเส้นแนวการไหลบริเวณปากท่อซึ่งก็ยังไม่เป็นการ خروجแบบ Isokinetic อยู่นั่นเอง

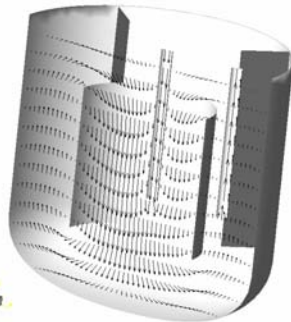


รูปที่ 4 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

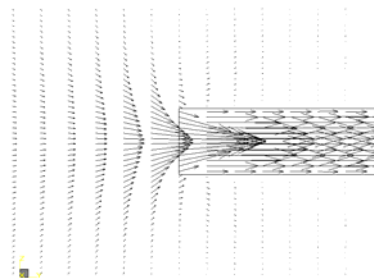
เมื่อพิจารณาที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ความเร็วบริเวณรอบนอกของท่อ خروجมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงความเร็วเฉลี่ยของท่อ خروجซึ่งมีค่าประมาณ 0.017 m/s ทำให้ไม่เกิดการเบี่ยงออกหรือเข้าสู่ที่ปากทางของท่อทางออกมากนัก การไหลถือว่าใกล้เคียงการ خروجแบบ Isokinetic ในขณะที่ค่าโมเมนตัม 30000 และ $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ นั้นการไหลบริเวณปากท่อมีการเบี่ยงออกอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 10-15



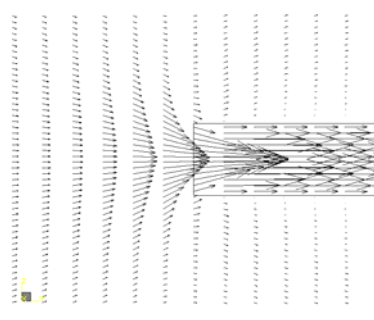
รูปที่ 5 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



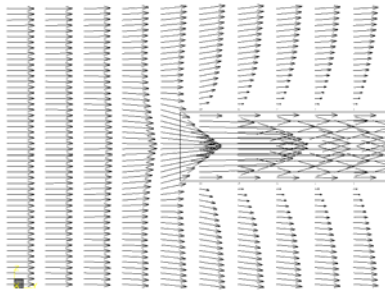
รูปที่ 6 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



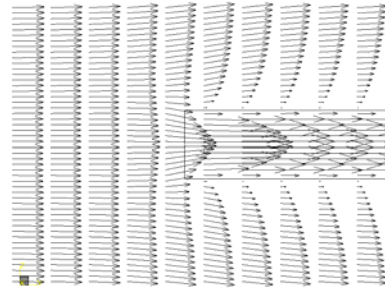
รูปที่ 7 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 8 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



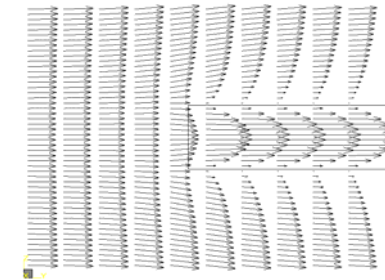
รูปที่ 9 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج
แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



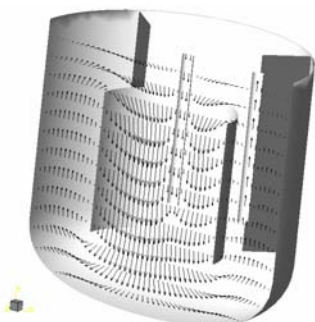
รูปที่ 13 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج
แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



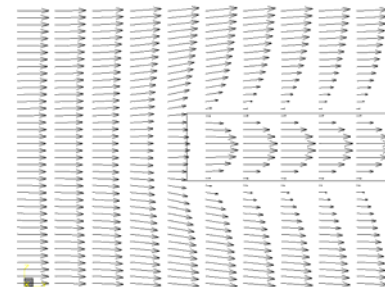
รูปที่ 10 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



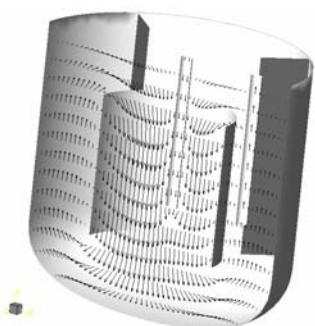
รูปที่ 14 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج
แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



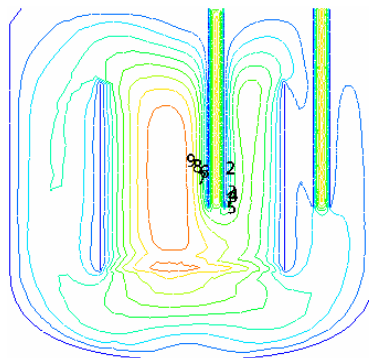
รูปที่ 11 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 15 รูปสรความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ปากท่อ خروج
แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

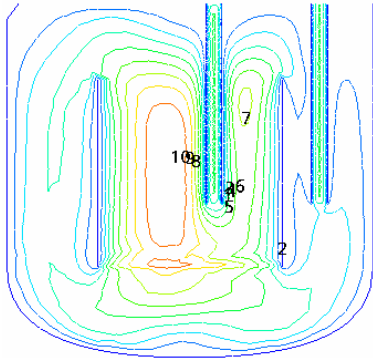


รูปที่ 12 รูปสรความเร็ว แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

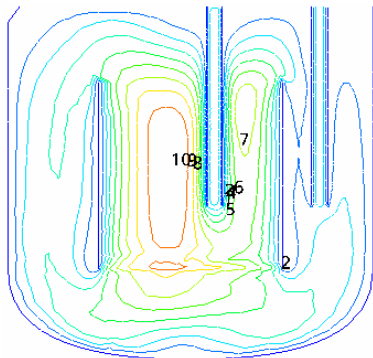


รูปที่ 16 เส้นกราฟการกระจายขนาดของความเร็วของการไหลในถังผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วบริเวณรอบท่อ خروجมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในถังผลึกสำหรับทุกค่าของแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ทำให้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการติดตั้งท่อ خروجมีผลต่อการไหลภายในถังตกผลึกเป็นอย่างมาก



รูปที่ 17 เส้นกราฟการกระจายขนาดของความเร็วของการไหลในถังผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 18 เส้นกราฟการกระจายขนาดของความเร็วของการไหลในถังผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

พิจารณาจากรูปที่ 16-18 (ตัวเลขกำกับเส้นคอนทัวร์ระบุว่าเส้นใดมีขนาดความเร็วมากน้อย แต่ไม่ใช่ขนาดของความเร็วที่คำนวณได้) พบว่าการเพิ่มขนาดของแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลมากนัก แต่ทำให้ค่าความเร็วที่ได้เปลี่ยนไป โดยเฉพาะในกรณีนี้ขนาดของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ขึ้นไป จะเห็นว่าลักษณะการไหลมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันมาก และพบว่า การไหลภายในถังที่ได้จากการจำลองดังกล่าวไม่เป็นเอกรูป ซึ่งที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของถังมีความเร็วต่ำ ในขณะที่ความเร็วสูงสุดอยู่บริเวณนอกท่อดูดออกภายในท่อตราฟต์เยื้องไปทางด้านที่ห่างจากท่อนำเข้า

6. สรุปและวิเคราะห์

การไหลในถังตกผลึกน้ำตาลที่จำลองผลขึ้นมานี้มีลักษณะไม่เป็นเอกรูปถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้ง Baffle และ ท่อตราฟต์แล้วก็ตาม

การให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลในบริเวณอื่นมากนักยกเว้นบริเวณปากท่อทางออก ซึ่งค่าโมเมนตัมน้อย ๆ จะทำให้ผลึกขนาดเล็ก ๆ ไหลเข้าสู่ท่อมากขึ้น และอาจทำให้การไหลมีแรงผลักดันไม่พอที่จะทำให้ผลึกขนาดใหญ่ลอยเข้าสู่ท่อดูดออกได้ ในทางกลับกันการกำหนดค่าโมเมนตัมมากเกินไปจะให้ผลตรงกันข้ามคือการไหลจะมีแนวโน้มที่จะไหลออกจากปากท่อ ผลึกขนาดเล็ก ๆ จะลอยตามเส้นแนวการไหลและเข้าสู่ปากท่อน้อย ส่วนผลึกขนาดใหญ่กว่า จะไหลเข้าปากท่อได้ ผลกระทบอย่างอื่นจากการให้ค่าโมเมนตัมที่มาก

เกินไปก็ยังมีอีก เช่นมีผลให้เกิดการแตกหักของผลึก ซึ่งเกิดเนื่องจากการกระทบกันระหว่างผลึกกับใบพัด ผลึกกับผลึกด้วยกัน หรือผลึกกับภาชนะ และส่งผลกระทบต่อการใช้ของผลึก

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าบริเวณเหนือปากท่อดูดออกจะมีความเร็วต่ำ เนื่องจากของไหลบางส่วนไหลออกที่ปากท่อ แสดงให้เห็นว่าการใส่ท่อดูดออกมีผลทำให้เกิดความไม่เป็นเอกรูปภายในถังตกผลึก ซึ่งในงานวิจัยหลายชิ้นจะไม่พิจารณาผลกระทบของท่อดูดออกต่อการไหล แต่จากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าท่อดูดออกเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อการไหลในถังผลึกและจะต้องศึกษาอย่างระมัดระวังเพื่อนำมาใช้ออกแบบกระบวนการตกผลึกต่อไป

งานวิจัยนี้ยังถือได้ว่าเป็นการพัฒนาเครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์เพื่อออกแบบถังตกผลึกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์และสถานที่ตลอดจนเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Brucato, G. Micale, G. Montante, and A. Scuzzarella "Experimental investigation and CFD simulation of dense solid-liquid suspensions in a fully baffled mechanically stirred tank", 10th Workshop on Two-Phase Flow Predictions, 2002, pp. 1-25
- [2] A. Bakker., J.B Fasano., K. J Myers. "Effects of Flow Pattern on the Solids Distribution in a Stirred Tank". 8th European Conference on Mixing, September 21-23, 1994, Cambridge, U.K. IChemE Symposium Series No. 136, pp. 1-8
- [3] G. Micale, and G. Montante. (1999). On the simulation of two-phase solid-liquid stirred vessels [On-line]. Available : <http://www.software.aeat.com/cfxcommunity/>.
- [4] P.A Shamlou and E. Koutsakos "Solids suspension and distribution in liquids under turbulent agitation", Chemical Engineering Science, 1989, Vol. 44, No. 3, pp. 529-542
- [5] Z. Sha, P. Oinas, M. Louhi-Kultance, G. Yang and SPalosaari (2000) "Application of CFD simulation to suspension crystallization-factors affecting size-dependent classification", Powder Technology, 2000, Vol. 121, pp. 20-25
- [6] Z. Sha, S. Palosaari, P. Oinas and K. Ogawa "CFD Simulation of Solid suspension in a stirred tank", Journal of Chemical Engineering of Japan, 2000, Vol. 34, No. 5, pp. 621-626
- [7] Z. Sha, and S. Palosaari "Mixing and crystallization in suspensions", Chemical Engineering Science, 2000, Vol. 55, pp. 1797-1806