

การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกเพื่อผลิตน้ำตาล

นางสาวจรรุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-533-271-2

**NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF FLOW
IN CRYSTALLIZER FOR SUGAR PRODUCTION**

Miss Jaruan Tangtongsakulwong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-271-2**

การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกเพื่อผลิตน้ำตาล

NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF FLOW
IN CRYSTALLIZER FOR SUGAR PRODUCTION

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร)
กรรมการ

.....
(อาจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรวพจน์ จำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จรรวธรรม ตั้งต้นสกุลวงศ์ : การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึก
เพื่อผลิตน้ำตาล (NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF FLOW IN
CRYSTALLIZER FOR SUGAR PRODUCTION) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ :
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิข จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน ฟลัด, 154 หน้า ISBN 974-533-271-2

ลักษณะการไหลในถังตกผลึกเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตผลึก เช่น มีผลกระทบโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของขนาดผลึกที่ได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อจำลองเชิงตัวเลขและวิเคราะห์การไหลในถังตกผลึกจำลองของน้ำตาลประเภทต่อเนื่องโดยการทำความเย็น ถังตกผลึกนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกก้นมน ภายในมีใบพัดเพื่อปั่นให้ของไหลไหลลงด้านล่าง ซึ่งในการจำลองนี้ใบพัดจะถูกแทนที่ด้วยแหล่งกำเนิดโมเมนตัม โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ “CFX5.5.1” เป็นโปรแกรมหลักในการจำลองการไหลในสามมิติ โปรแกรมนี้ใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดและกริดไร้โครงสร้าง (Unstructured grid) เป็นพื้นฐานในการทำงาน ทั้งนี้ได้กำหนดการไหลให้เป็นการไหลแบบเฟสเดียว ซึ่งใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสเป็นของไหลหลักในการศึกษา และไม่พิจารณาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในถังตกผลึกไม่เป็นเอกรูป และการเปลี่ยนโมเมนตัมในแนวแกนทำให้ความเร็วในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้รูปแบบการไหลทั่วไปภายในถังผลึกเปลี่ยนไปมากนัก นอกจากบริเวณปากทางเข้าของท่อดูดออก ซึ่งรูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับขนาดของโมเมนตัมที่ให้จากแหล่งกำเนิด ตลอดจนการดูดสารออกจากถังแบบ Isokinetic ก็ขึ้นอยู่กับค่าโมเมนตัมที่ให้เช่นกัน โดยที่ค่าโมเมนตัมเท่ากับ $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ทำให้การไหลบริเวณปากท่อใกล้เคียงการดูดแบบ Isokinetic มากที่สุด ซึ่งเป็นผลดีต่อการตกผลึกทำให้ขนาดของผลึกที่ได้มีการกระจายแบบเอกซ์โปเนนเชียลอันเป็นรูปแบบการกระจายที่จะทำให้ได้ผลึกมีคุณภาพดีที่สุด อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของก้นถังมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้างในทุกค่าของโมเมนตัมที่ให้จากแหล่งกำเนิด ซึ่งให้เห็นว่าจะเป็นการอุปสรรคต่อการลอยขึ้นของผลึกในบริเวณดังกล่าวซึ่งอาจนำไปสู่การตกตะกอนของผลึกน้ำตาลและจับกันเป็นก้อนแข็งอยู่ที่ก้นถังอันจะทำให้การควบคุมคุณภาพผลึกทำได้ยากขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

JARUWAN TANGTONSAKULWONG: NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF FLOW IN CRYSTALLIZER FOR SUGAR PRODUCTION. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D. CO -THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ADRIAN FLOOD, Ph.D. 154 PP. ISBN 974-533-271-2

CRYSTALLIZER/CFD/ISOKINETIC WITHDRAWAL/SUGAR/MIXING

The characteristics of a flow field in a crystallizer are key factors for a crystallization process. For example, this directly influence 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. The commercial software “CFX 5.5.1” was employed to perform the 3D simulation with the finite volume method using an unstructured mesh. One phase flow, non conducting fluid is determined, since heat transfer is not significant in the isothermal crystallizer study. Sucrose solution is assumed as the 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 to the exponential crystal-sized distribution, which is the optimum distribution. 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. This leads to difficulty in quality control for the obtained product.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2546

Student’s Signature _____
Advisor’s Signature _____
Co-advisor’s Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.เอเดรียน ฟลัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้งสองที่ได้ให้โอกาสให้ความช่วยเหลือสนับสนุนตลอดจนชี้แนะแนวทางในการศึกษาและการทำวิจัย ทำให้ผู้ทำวิจัยมีกำลังใจและกำลังทรัพย์ที่จะสามารถผ่านอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์ ที่ได้ให้โอกาสในการทำงานหลาย ๆ ด้านทำให้ผู้ทำวิจัยได้รับประสบการณ์อันเป็นประโยชน์ยิ่งที่จะหาจากห้องเรียนไม่ได้ ตลอดจนคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร. วรพจน์ จำพิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร และคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ แนะนำแนวทางที่ถูกที่ควรด้วยความเมตตาเสมอมา นอกจากนี้ขอขอบคุณกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายและแรงใจและกำลังทรัพย์ด้วยความซาบซึ้ง

- คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และคุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่และธุรการประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
- คุณศรัทธา โพธิ์สว่าง วิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 และพนักงานทุกท่าน
- คุณวสันต์ จันทร์หอยก คุณพรสวรรค์ ทองใบและ คุณ โสรัฎา แข็งการ นักศึกษาบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่กิมเง็ก คุณพ่อชัยขงค์ และพี่น้องญาติ ตั้งต้นสกุลวงศ์ ที่ได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี สมาชิกในครอบครัวทุก ๆ คน รวมถึงพี่น้องชัชกุลรวานิชพงษ์ ที่ให้กำลังใจอย่างอบอุ่น ให้การช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ด้วยดีเสมอมา

จารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย	3
1.5 โครงสร้างและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 น้ำตาลซูโครสและความสามารถในการละลาย	6
2.3 การตกผลึกและกระบวนการตกผลึก	8
2.3.1 Cooling Crystallization	9
2.3.2 Evaporative Crystallization	11
2.3.3 Vacuum Crystallization.....	12
2.3.4 Drowning-out Crystallization.....	13
2.3.5 Pressure Crystallization.....	13
2.3.6 Reaction Crystallization	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	อุปกรณ์สำหรับกระบวนการตกผลึกและการเลือกใช้	14
2.5	กระบวนการคัดออกแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic Withdrawal).....	21
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลในถังตกผลึกและถังกวน	24
2.7	สรุป	33
3	การดำเนินการวิจัย	35
3.1	การทดสอบโปรแกรม	35
3.1.1	การไหลในชั้นผิวบางในย่านความเร็วต่ำ	35
3.1.2	การไหลผ่านแผ่นขนานแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน	37
3.1.3	การไหลในท่อแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน	40
3.1.4	การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบไม่อัดตัวที่สถานะคงตัว	42
3.1.5	การไหลผ่านแผ่นขนานเนื่องจาก แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน	45
3.1.6	การไหลในท่อเนื่องจากการให้แหล่งกำเนิด โมเมนตัมในแนวแกนและแนวรัศมี	48
3.2	ลักษณะของถังตกผลึกและหลักการทำงาน	51
3.3	การจำลองลักษณะทางกายภาพของถังตกผลึก.....	53
3.4	การสร้างเมช (Mesh).....	55
3.4.1	ขั้นตอนในการกำหนดเมช	55
3.4.2	ลักษณะของเมชที่สร้างขึ้นภายในถังตกผลึก.....	56
3.5	เงื่อนไขในการจำลอง การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น	57
3.5.1	เงื่อนไขในการจำลอง	57
3.5.2	การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ	57
3.5.2.1	พื้นผิวหน้าตัดที่ทางเข้าของท่อหน้าเข้า	58
3.5.2.2	พื้นผิวหน้าตัดของปลายท่อคัดออก	58
3.5.2.3	พื้นผิวสมมาตร (Symmetry Plane).....	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2.4	บริเวณที่เป็นผนังของตัวถังตกผลึก ผนังท่อ และผนังแผ่น กั้นแนวตั้ง	58
3.5.3	การกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ	59
3.6	สรุป	60
4	ผลการจำลองและการอภิปรายผล	61
4.1	ผลการจำลอง	61
4.1.1	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	61
4.1.2	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	64
4.1.3	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	66
4.1.4	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	69
4.1.5	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	71
4.1.6	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	74
4.1.7	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$	76
4.2	อภิปรายผลการจำลอง	79
4.2.1	ความเป็นเอกรูปของการไหลภายในถังตกผลึก	79
4.2.2	ความเป็นไอโซโคเนติกส์ ในการดูดออก	79
4.3	สรุป	83
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	84
5.1	สรุปผลการวิจัย	84
5.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป	85
	เอกสารอ้างอิง	86
ภาคผนวก ก	โครงสร้างและการทำงานของโปรแกรม CFX 5	89
ภาคผนวก ข	การตรวจสอบโปรแกรม	93
ภาคผนวก ค	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง	รายละเอียดของ code บางส่วนที่เกี่ยวข้อง	
	กับการกำหนดค่าเข้าสู่โปรแกรม	109
ประวัติผู้เขียน.....		154

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของน้ำตาลจากอ้อย.....	6
2.2	ลักษณะของผลึกน้ำตาล (Pennington and Baker, 1990)	7
2.3	ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำตาลซูโครส.....	8
2.4	กราฟแสดงความสามารถในการละลายของสารทั่วไป.....	9
2.5	ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์.....	10
2.6	ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์.....	10
2.7	ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์.....	12
2.8	ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์.....	12
2.9	ความสามารถของการละลายของสารละลายบางประเภท	13
2.10	แผนภาพถึงตกผลึกที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	15
2.11	ถึงตกผลึกแบบทำความเย็นที่มีป้อนทำให้เกิดการไหลวน และตัวทำความเย็นด้านนอก	16
2.12	ถึงตกผลึกแบบทำให้เป็นไอที่มีหม้อต้มภายนอก	17
2.13	ถึงตกผลึกแบบสุญญากาศที่มีการแยกถึงตกผลึก และถึงสำหรับการระเหย.....	18
2.14	ถึงตกผลึกแบบสุญญากาศที่ทำงานอย่างต่อเนื่องและมีอุปกรณ์สำหรับปั่น.....	19
2.15	ถึงตกผลึกแบบสุญญากาศที่มีอุปกรณ์สำหรับปั่นบรรจุอยู่ในท่อ	19
2.16	ถึงตกผลึกแบบสุญญากาศในแนวราบ 5 ชั้นที่ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่.....	20
2.17	การตกผลึกในกระบวนการผลิตแคลเซียมไนเตรท	21
2.18	การไหลของอนุภาคเมื่อการคูดอกไม่เป็นไอโซโคเนติกส์	23
2.19	ลักษณะการเกิดวงรอบของการไหลภายในถึงกวน	31
3.1	แผนภาพแผ่นเรียบ.....	36
3.2	รูปสรความเร็วบางส่วน ที่ระยะ x ต่าง ๆ ของการไหล ของชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	ความเร็วจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CFX เปรียบเทียบกับคำตอบของบลาเซียส..... 37
3.4	แผนภาพแผ่นคู่ขนาน 38
3.5	รูปสรความเร็วที่บริเวณปลายท่อ 38
3.6	การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวของท่อ 39
3.7	ความเร็วของการไหลที่ความสูงต่าง ๆ เทียบกับค่าจากทางทฤษฎี 39
3.8	แผนภาพท่อสำหรับปัญหาการไหลในท่อภายใต้ความดัน 40
3.9	รูปสรความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ..... 41
3.10	การกระจายตัวของความดันความดันตลอดความยาวท่อ..... 41
3.11	ความเร็วของการไหลเปรียบเทียบกับความเร็วทฤษฎี 42
3.12	แผนภาพท่อที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ภายใน 43
3.13	ความดันตลอดแนวความยาวของท่อที่มีสิ่งกีดขวาง 44
3.14	ความดันบริเวณใกล้สิ่งกีดขวาง..... 44
3.15	รูปสรความเร็วภายในท่อที่มีสิ่งกีดขวาง 45
3.16	เส้นแนวการไหลภายในท่อที่มีสิ่งกีดขวาง 45
3.17	แผนภาพท่อที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 46
3.18	แผนภาพลักษณะการกำหนดทิศทางของโมเมนตัมภายในโดเมน 46
3.19	การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวท่อ..... 47
3.20	รูปสรความเร็วภายในท่อ 48
3.21	เส้นแนวการไหลภายในท่อ 48
3.22	แผนภาพท่อกลมที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายใน 48
3.23	การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวท่อ..... 49
3.24	เส้นแนวการไหลภายในท่อ 49
3.25	รูปสรความเร็วภายในท่อ 50
3.26	เส้นแนวการไหลเมื่อให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมี 50
3.27	ความดันตลอดแนวความยาวท่อเมื่อให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมี 51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.28	ถึงตกผลึกจำลองในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี	52
3.29	ถึงตกผลึกจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CFX5.5.1 (ผ่าครึ่ง)	54
3.30	รายละเอียดของถึงตกผลึกจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CFX5.5.1	54
3.31	การแบ่งเมฆภายในถึงตกผลึก	57
3.32	การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของถึงตกผลึก	59
4.1	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 0 kg/m ² /s ²	62
4.2	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 0 kg/m ² /s ²	62
4.3	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 0 kg/m ² /s ²	63
4.4	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถึงตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 0 kg/m ² /s ²	63
4.5	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 1000 kg/m ² /s ²	64
4.6	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 1000 kg/m ² /s ²	65
4.7	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 1000 kg/m ² /s ²	65
4.8	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถึงตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 1000 kg/m ² /s ²	66
4.9	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 10000 kg/m ² /s ²	67
4.10	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 10000 kg/m ² /s ²	67
4.11	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 10000 kg/m ² /s ²	68
4.12	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถึงตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 10000 kg/m ² /s ²	68
4.13	รูปสรความเร็ว ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 15000 kg/m ² /s ²	69
4.14	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = 15000 kg/m ² /s ²	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 70
4.16	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 71
4.17	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 72
4.18	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 72
4.19	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 73
4.20	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 73
4.21	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 74
4.22	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 75
4.23	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 75
4.24	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 76
4.25	รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 77
4.26	รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อ خروجที่ แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 77
4.27	เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 78
4.28	คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ 78
4.29	ตำแหน่งของจุด A 80
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ตำแหน่ง A กับค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 80
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่ง A กับค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 81
4.32	เปรียบเทียบเส้นแนวการไหลที่จุด A เมื่อค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเปลี่ยนไป 82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.1	การเชื่อมโยงกันของโปรแกรมย่อย	91
ข.1	กริดในแนวแกน x และแกน y (บางส่วน) สำหรับปัญหาการไหลในชั้นผิวบาง	94
ข.2	เงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ	95
ข.3	กริด (บางส่วน) สำหรับปัญหาการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานภายใต้ความดัน	97
ข.4	การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหล ผ่านแผ่นคู่ขนานภายใต้ความดัน	98
ข.5	การแบ่งโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ (บางส่วน)	99
ข.6	ลักษณะของกริด (บางส่วน)	99
ข.7	การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหลในท่อภายใต้ความดัน	100
ข.8	การแบ่งกริดสำหรับปัญหาการไหลในท่อ ผ่านสิ่งกีดขวาง (ภาพขยายและภาพเต็ม)	101
ข.9	การกำหนดเงื่อนไขค่าของของปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวาง	102
ข.10	กริดไร้โครงสร้างที่กำหนดภายในโดเมน	103
ข.11	ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโดเมน	103
ข.12	กริดที่ได้ใช้ภายในโดเมน	104
ข.13	ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโดเมน	105
ข.14	ลักษณะการให้โมเมนตัมในแนวแกน	105

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ค.1	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	107
-----	---------------------------------	-----

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

\mathcal{E}	Turbulent energy dissipation rate
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืดพลศาสตร์
∇	ปริมาตร
Δ_w	ความอึดตัวยิ่งยวด
A	พื้นที่หน้าตัด
Anh	Anhydrate มวลของสารละลายเมื่อเอาน้ำออก
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
F	แรง
h	ความสูง
h	ฟังก์ชันการแบ่งแยก $= \frac{n_j}{n}$
L	ความยาว
LDA	Laser Doppler Anemometry
LDV	Laser Doppler Velocimetry
MSMPR	Mixed Suspension Mixed Product Removal
N	ความเร็วรอบของใบพัด
n	ความหนาแน่นเฉลี่ยของผลึกภายในถังตกผลึก
n_j	ความหนาแน่นของผลึกในปริมาตรควบคุม
P	ความดัน
PIV	Particle Imaging Velocimetry
r	ระยะในแนวรัศมี
R	รัศมีของท่อ
Re	เลขเรย์โนลด์
S_{mx}	ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร
t	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

u	ความเร็วในทิศ x
U	ความเร็วที่ Free - Stream
V_{iso}	ความเร็วที่ทำให้เกิดเงื่อนไขการดูดซับแบบไอโซโคเนติกส์
W	ความสามารถในการละลายของน้ำตาลซูโครส
w	ความสามารถในการละลายของสารทั่วไป
w_{eq}	ความเข้มข้นอิ่มตัวอิ่มตัว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความสม่ำเสมอของขนาดของผลึกน้ำตาลเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลทั้งต่อกระบวนการผลิตและการตลาดสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ตัวอย่างปัญหาในด้านการผลิต เช่น การกรองผลึก ในกรณีของผลึกที่มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันในเยื่อกรอง ส่งผลให้ความดันภายในสูงขึ้นและเกิดการรบกวนของเยื่อกรองได้ (McCabe, Smith, and Harriott, 1993) ผลกระทบนี้ทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ในกรณีของผลึกที่มีขนาดใหญ่จนเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาในการนำผลึกออกจากถังผลึก เนื่องจากผลึกมีน้ำหนักมากและไม่สามารถลอยเข้าที่นำออกได้ เกิดการตกตะกอนไปรวมกันที่ก้นถังและจับกันเป็นแผ่นแข็ง (Bakker et al., 1998) นอกจากนี้การได้ผลึกหลายขนาดในกระบวนการผลิต ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแยกผลึกมากขึ้น ส่วนปัญหาทางด้านการตลาดซึ่งถือเป็นปัญหาหลักที่สำคัญ ได้แก่ ผลึกที่ได้มีขนาดไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ กลายเป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ ขายไม่ได้ราคาหรือได้ราคาต่ำ (McCabe Smith and Harriott, 1899) สำหรับผลึกน้ำตาลที่มีขนาดใหญ่จะละลายช้าเมื่อนำไปใช้งานหรือเมื่อผสมเข้ากับอาหารแล้วเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้รสชาติของอาหารเปลี่ยนไป (Mathlouthi, 1995) ทำให้ไม่ได้รับความนิยมในหมู่ผู้บริโภคบางกลุ่ม

สืบเนื่องจากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทำให้อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลในปัจจุบันให้ความสำคัญต่อขนาดและความสม่ำเสมอของขนาดผลึกเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของขนาดผลึกนั้นมีหลายประการด้วยกัน (Mermann, 2001) เช่น

- ก. ลักษณะการไหล และการผสมของสารละลายภายในถังผลึก
- ข. อุณหภูมิในการตกผลึก
- ค. ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าถังผลึก
- ง. สถานะ การอิมตัวของสารละลาย

ลักษณะการไหล การผสมกัน และการกระจายความหนาแน่นของประชากรผลึกในถังผลึกเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของผลึกที่จะเกิดขึ้น ขนาดของผลึกจะสม่ำเสมอได้ก็ต่อเมื่อมีการผสมกันดีพอ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติ การวัดการกระจายความหนาแน่นของประชากรผลึกในถังตกผลึกทำได้ยาก ประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตกผลึกในห้องทดลองมีขนาดเล็ก จึงนิยม

ประมาณว่าการกระจายความหนาแน่นของประชากรผลึกในแต่ละตำแหน่งภายในถึงมีความแตกต่างกันน้อยมาก และไม่พิจารณาผลกระทบของการผสมกันและการกระจายความหนาแน่นของประชากรผลึกภายในถึงผลึก (Sha and Palosaari, 2000) ดังนั้นสมมุติฐานเบื้องต้นอีกอันหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ร่วมในการวิเคราะห์กระบวนการตกผลึกเพื่อให้เกิดความง่ายในการวิเคราะห์มากขึ้นคือ สมมุติฐาน MSMPR (Mixed Suspension Mixed Product Removal) (Randolph and Larson, 1988) กล่าวคือมีการผสมกันโดยสมบูรณ์ของสารละลาย ทั้งขาเข้าและขาออก รวมทั้งสารละลายภายในถึงทุกตำแหน่งจะมีคุณสมบัติเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ในสารละลายบางประเภท เมื่อเกิดการตกผลึก สารละลายที่เหลือจะมีความหนาแน่นลดต่ำลง (ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างสารละลายกับอนุภาคมีค่าสูง) ก็จะมีแนวโน้มให้เกิดการกระจายความหนาแน่นในแต่ละตำแหน่งภายในถึงแตกต่างกันได้ง่ายขึ้น สมมุติฐาน MSMPR ก็จะไม่เป็นจริง หากนำมาใช้ก็อาจเกิดความผิดพลาดสูง โดยเฉพาะในระบบที่ใหญ่ขึ้น เช่นในกรณีอุตสาหกรรมทั่วไปที่ถึงตกผลึกมีขนาดใหญ่ นั้นเป็นการยากที่จะทำให้ของผสมในถึงผลึกผสมกันเป็นอย่างดีได้เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก ไม่คุ้มต่อต้นทุนการผลิต ความหนาแน่นของประชากรผลึกในถึงในแต่ละตำแหน่งจึงต่างกันมาก อันจะก่อให้เกิดผลเสียดังที่ได้กล่าวในข้างต้น

สืบเนื่องมาจากในทางปฏิบัตินั้น การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการไหลตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการไหลในถึงผลึกมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การไหลในถึงตกผลึกน้ำตาลได้ ทำให้การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองผล เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ที่จะนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพของผลึกน้ำตาลได้ และยังช่วยลดต้นทุนในการทำวิจัยอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อจำลองการไหลของของไหลเฟสเดียวในถึงตกผลึกน้ำตาล โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลเชิงพาณิชย์ “CFX5.5.1” และวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของขนาดของผลึกที่ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 จำลองการไหลในถึงตกผลึกจากสารละลายน้ำตาลประเภทใช้ความเย็น (Cooling crystallizer) ซึ่งมีขนาดเท่าถึงตกผลึกจำลองในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.2 จำลองการไหลในถึงตกผลึกเป็นการไหลแบบเฟสเดียว

- 3.1.3 ไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ
- 3.1.4 กำหนดให้ของไหลในถังตกผลึกที่ใช้จำลองผลเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้
- 3.1.5 จำลองผลด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล “CFX5.5.1” ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้แก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) แบบสามมิติ
- 3.1.6 ใบพัดที่ใช้สำหรับปั่นของไหลให้ไหลลงด้านล่างในถังปั่นจะถูกจำลองด้วยแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

- 1.4.1 เป็นแนวทางในการออกแบบถังตกผลึกเพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอของขนาดผลึกมากขึ้น
- 1.4.2 ลดปัญหาการอุดตันของเยื่อกรองในกระบวนการกรองผลึก และลดขั้นตอนในการแยกผลึก อันจะเป็นผลดีในการลดต้นทุนและเวลาในการผลิต
- 1.4.3 ส่งเสริมอุตสาหกรรมภายในประเทศ เช่น อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล
- 1.4.4 เพิ่มพูนความรู้ในทางวิศวกรรม ประสบการณ์การทำงานตลอดจนระเบียบวิธีวิจัย อันจะนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยในด้านอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อส่วนรวมต่อไป

1.5 โครงสร้างและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อในแต่ละบทดังนี้

- 1.5.1 บทที่ 1 นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้
- 1.5.2 บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับน้ำตาล สารละลายน้ำตาล การตกผลึกของสารละลายน้ำตาล อุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการตกผลึก ทฤษฎีการคูณผลึกภัณฑ์ออกจากถังผลึก ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 บทที่ 3 เป็นการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย โดยทำการทดสอบกับปัญหาการไหลมาตรฐานเพื่อตรวจสอบความละเอียด ความถูกต้อง และเสถียรภาพของคำตอบที่ได้จากการจำลองผล การสร้างกริด การกำหนดเงื่อนไขขอบ และค่าเริ่มต้นสำหรับปัญหาการตกผลึกของสารละลายน้ำตาลในถังตกผลึก
- 1.5.4 บทที่ 4 นำเสนอผลการจำลองและอภิปรายผลการจำลองจากกรณีทดสอบย่อย 7 กรณี ที่กำหนดโดยการให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ต่างกัน
- 1.5.5 บทที่ 5 เป็นข้อสรุปที่ได้จากผลการจำลอง และเสนอแนะแนวทางเพื่อการพัฒนา งานวิจัยชิ้นนี้ให้มีประสิทธิภาพ ความถูกต้องและความสมจริงมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ยังประกอบด้วยภาคผนวกทั้งสิ้น 3 บท ดังนี้

1.5.6 ภาคผนวก ก. อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานและโครงสร้างของโปรแกรม CFX ที่นำมาใช้ในการจำลองผล

1.5.7 ภาคผนวก ข. นำเสนอรายละเอียดการสร้างกริด การกำหนดเงื่อนไขขอบ และค่าเริ่มต้นของปัญหาการไหลมาตรฐานที่นำมาใช้ทดสอบโปรแกรมในบทที่ 3

1.5.8 ภาคผนวก ค. แสดงตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.9 ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดของ code บางส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าเข้าสู่โปรแกรม

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันน้ำตาลเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างกว้างขวางตั้งแต่การนำมาประกอบอาหาร การนำน้ำตาลมารักษาบาดแผล หรือรักษาโรค ตลอดจนใช้ในการปฐมพยาบาลเท่าที่มีหลักฐานบันทึกในประวัติศาสตร์ที่พอจะเชื่อถือได้นั้น เชื่อกันว่าราวปีคริสตศักราช 500 ชาวเปอร์เซียเป็นชาติแรกที่สามารถผลิตน้ำตาลในรูปเม็ดผลึกได้ โดยมีชื่อเรียกเป็นภาษาสันสกฤตว่า ซาคาร่า (อัสวิทย์ ปัทมะเวณฺุ, 2536) และต่อมาได้เรียกเพี้ยนกันไปตามท้องถิ่นต่าง ๆ จนกลายมาเป็นคำว่าชูการ์ในภาษาอังกฤษนั่นเอง

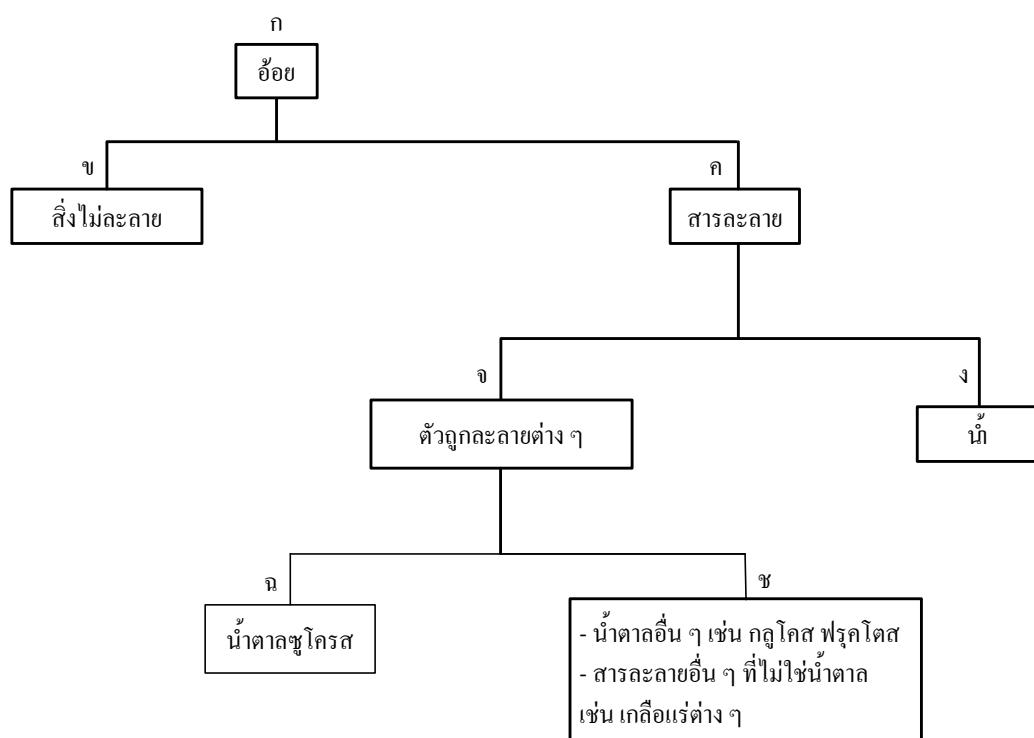
สำหรับการผลิตน้ำตาลภายในประเทศไทยนั้น เพิ่งจะมีการบุกเบิกทำน้ำตาลทรายแบบเม็ดผลึกเมื่อประมาณปี 2496 โดยมีผู้นำชาวฟิลิปปินส์เจ็ดคนด้วยกันเข้ามาสอนกรรมวิธีผลิตน้ำตาลให้แก่คนไทยเป็นครั้งแรกที่โรงงานน้ำตาลจังหวัดลำปางจนกระทั่งปัจจุบันคนไทยมีฝีมือเคี้ยว ต้ม และปั่นน้ำตาลเป็นเม็ดได้เป็นอย่างดี ต่อมาชาวฮอลันดาเข้ามาสร้างโรงงานน้ำตาลที่จังหวัดชลบุรี และตามมาด้วยชาวไต้หวันที่ได้นำกรรมวิธี Middle Juice Carbonation Process มาใช้ร่วมกับชาวฝรั่งเศสผู้สร้างโรงงานน้ำตาลที่จังหวัดสุพรรณบุรีเมื่อปี พ.ศ.2499 ซึ่งเป็นความก้าวหน้าอีกขั้นหนึ่งของโรงงานผลิตน้ำตาลในประเทศไทย หลังจากนั้นชาวไต้หวันได้เข้ามาสร้างโรงงานน้ำตาลสุรศักดิ์ (น้ำตาลตะวันออก) และต่อมาชาวญี่ปุ่นและชาวอังกฤษได้เข้ามาเผยแพร่การผลิตน้ำตาลรีไฟน์ (Refined Sugar) อีกกรรมวิธีหนึ่งที่เรียกว่า Talofloc Process ที่โรงงานน้ำตาลบ้านโป่งและโรงงานน้ำตาลมิตรผล

อุตสาหกรรมน้ำตาลได้เริ่มพัฒนาจากอดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ประเทศไทยได้พัฒนาจนกระทั่งกลายเป็นศูนย์ผลิตใหญ่ที่สามารถส่งออกน้ำตาลได้เป็นอันดับสามของโลก ซึ่งถือเป็นนิมิตหมายอันดีเนื่องจากการผลิตน้ำตาลถือเป็นอุตสาหกรรมที่เกื้อหนุนการเกษตรภายในประเทศ นั่นคือใช้้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งถือเป็นการสนับสนุนเกษตรกรที่ปลูกอ้อยไปด้วยอีกทาง

2.2 น้ำตาลซูโครสและความสามารถในการละลาย

น้ำตาลจากธรรมชาติมีหลายประเภท เช่น น้ำตาลแล็กโทส (Lactose) พบในน้ำนม น้ำตาลกลูโคส (Glucose) พบในผลไม้ต่าง ๆ และน้ำตาลฟรุคโทส (Fructose) พบในน้ำผึ้ง เป็นต้น โดยปกติพืชส่วนใหญ่จะเก็บพลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสงในรูปของแป้ง แต่พืชบางประเภทมีน้ำย่อยพิเศษที่ช่วยสังเคราะห์และเก็บพลังงานไว้ในรูปของน้ำตาลซูโครส (Sucrose) ได้ น้ำตาลซูโครสเป็นสารประกอบของน้ำตาลในธรรมชาติสองตัว คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุคโทส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่พืชสีเขียวสังเคราะห์ขึ้นจากคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและแร่ธาตุบางชนิดผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดขึ้นที่รงควัตถุสีเขียวที่เรียกว่าคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ทำให้ได้น้ำตาลซูโครส ซึ่งถือว่าเป็นคาร์โบไฮเดรตธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ที่สุดตัวหนึ่ง

น้ำตาลจากอ้อย และน้ำตาลจากหัวผักกาดแดง (Beetroot) โดยปกติถือว่าเป็นน้ำตาลซูโครส เนื่องจากมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นซูโครส อย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจจะเรียกน้ำตาลซูโครสว่าแซคคาไรส (Saccharose) ส่วนประกอบของน้ำตาลจากอ้อยสดงไว้ใน แผนภูมิในรูปที่ 2.1

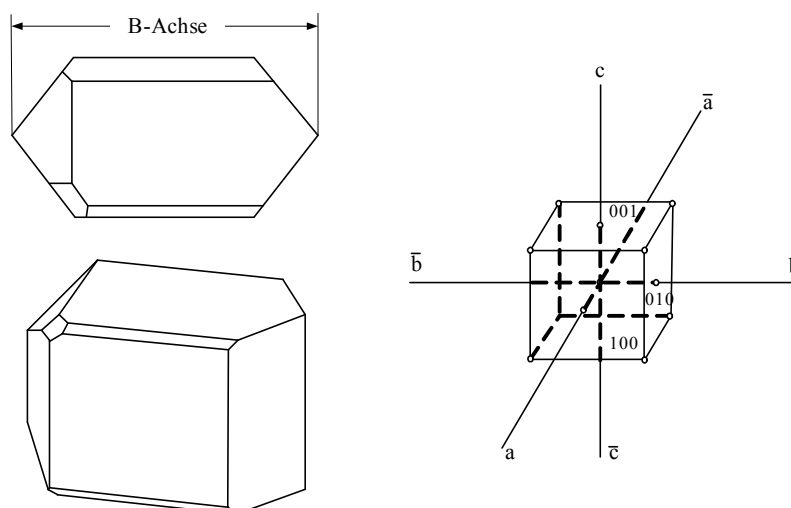


รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของน้ำตาลจากอ้อย

โมเลกุลของซูโครสประกอบด้วย คาร์บอน 12 อะตอม ไฮโดรเจน 22 อะตอม และออกซิเจน 11 อะตอมซึ่งเขียนเป็นสูตรเคมีได้ดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของซูโครสมีค่าเป็น 342.30 kg/kmol และจะเสถียรที่สุดเมื่ออยู่ในรูปผลึก ซูโครสบริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และมีรสหวานอย่างชัดเจน ผลึกซูโครสจะหลอมละลายในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 160 °C ถึง 186 °C ขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและความบริสุทธิ์ของซูโครส ความถ่วงจำเพาะของผลึกซูโครสเท่ากับ 1.588 ในกรณีที่มีผลึกจำนวนมากเกาะกันอยู่ ความถ่วงจำเพาะจะขึ้นอยู่กับขนาดเฉลี่ยของผลึกและการกระจายตัวของขนาดผลึก ซึ่งมีค่าประมาณ 0.8 รูปที่ 2.2 แสดงรูปผลึกของน้ำตาลซูโครส



รูปที่ 2.2 ลักษณะของผลึกน้ำตาล (Pennington and Baker, 1990)

ซูโครสละลายได้ดีที่สุดในน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในแอลกอฮอล์ได้รวมทั้งตัวทำละลายมีขั้วอื่น ๆ ด้วย แต่จะไม่ละลายใน อีเทอร์ เบนซีน และตัวทำละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วต่าง ๆ ความสามารถในการละลายน้ำของซูโครสเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

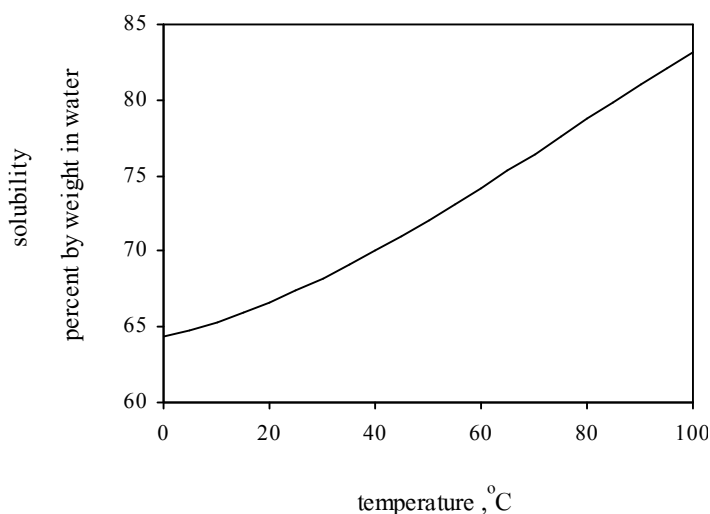
$$W = 64.397 + 0.07251t + 0.0020569t^2 - 9.035 \times 10^{-6}t^3 \quad (2.2)$$

เมื่อ

t คือ อุณหภูมิ (°C)

W คือ ความสามารถในการละลาย (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำโดยมวล)

โดยสามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 2.3

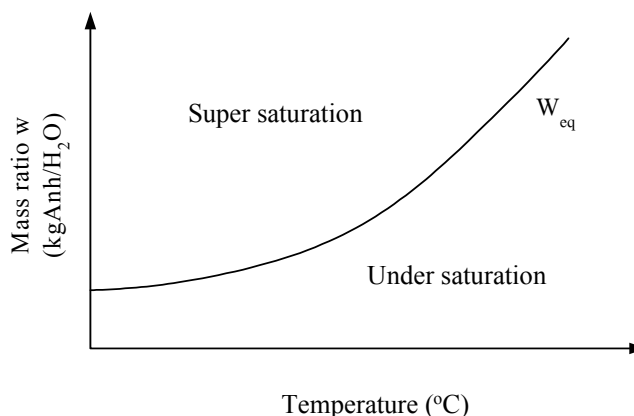


รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำตาลซูโครส

2.3 การตกผลึกและกระบวนการตกผลึก

การตกผลึกคือการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุหนึ่งธาตุใดหรือหลายธาตุจากสถานะของไหล หรือของแข็งที่มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous solid) หรือสถานะก๊าซ ไปสู่สถานะของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบชัดเจนแน่นอน (Crystalline state)

ในของเหลว การตกผลึกจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นอยู่เหนือจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Super saturation) ทั้งนี้ถึงแม้จะไม่มีการให้คำจำกัดความที่ชัดเจนสำหรับคำว่าสารละลาย (Solution) และคำว่าสารหลอมเหลว (Melt) ในกระบวนการตกผลึกจำเป็นต้องแยกความหมายของการตกผลึกจากสารละลาย กับการตกผลึกจากสารหลอมเหลวออกจากกัน โดยทั่วไปคำว่าสารละลายจะหมายถึงสารที่เกิดจากการรวมกันของสารอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไป โดยมีตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ส่วนคำว่าสารหลอมเหลวหมายถึงการนำสารตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปมาหลอมให้อยู่ในสถานะของเหลว สำหรับกระบวนการตกผลึก การตกผลึกจากสารละลายหมายถึงการตกผลึกโดยสารหลัก (ตัวถูกละลาย) เพียงชนิดเดียวเปลี่ยนรูปมาเป็นผลึก เมื่อผ่านกระบวนการตกผลึกแล้วตัวทำละลายไม่ได้ตกผลึกออกมาด้วย ส่วนการตกผลึกจากสารหลอมเหลว กรณีที่มีสารสองชนิดขึ้นไป สารทั้งหมดจะตกผลึกออกมาด้วยกัน โดยอาจจะเป็นผลึกในรูปของสารประกอบ หรืออาจตกผลึกแยกชนิดกันก็ได้



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสามารถในการละลายของสารทั่วไป

เมื่อ แกนตั้งเป็นอัตราส่วนของมวลของสารละลายเมื่อเอาน้ำออก (Anhydrate, ตัวย่อ Anh) แกนนอนเป็นอุณหภูมิ (°C) โดยที่ความอิมตัวยิ่งยวดสามารถหาได้จาก

Super Saturation

$$\Delta w = w - w_{eq} \quad (2.3)$$

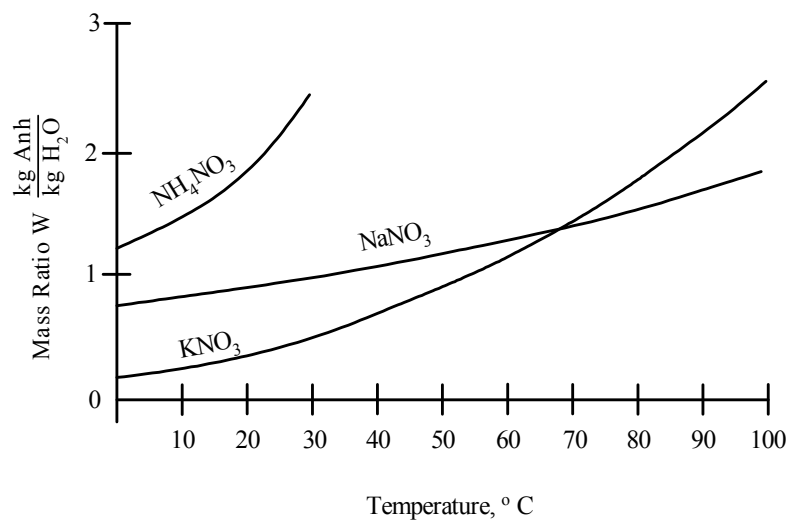
การตกผลึกที่ค่า Δw แตกต่างกันจะทำให้ได้ขนาดของผลึก และคุณภาพผลึกตลอดจนรูปร่างของผลึกแตกต่างกันไป ทั้งนี้ในกระบวนการตกผลึกที่จะทำให้ได้ผลึกที่มีการกระจายตัวของขนาดของผลึกที่ดีนั้น Δw ควรมีค่าสม่ำเสมอตลอดถึงผลึกให้มากที่สุด นั่นคือในกระบวนการตกผลึกจะต้องควบคุมสารละลายภายในถังให้ผสมกันเป็นอย่างดีนั่นเอง

กลไกสำคัญที่ควบคุมการตกผลึกจากสารละลายโดยส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียว ในขณะที่กระบวนการตกผลึกจากสารหลอมเหลวจะมีการถ่ายเทความร้อนเข้าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องด้วย ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา การตกผลึกในของเหลวมีความสัมพันธ์กับจุดอิมตัวยิ่งยวดของสารละลาย ซึ่งสารแต่ละประเภทจะมีกรรมวิธีในการทำให้เป็นสารละลายอิมตัวยิ่งยวดได้ต่างกัน กระบวนการตกผลึกจากสารละลายนั้นสามารถแยกประเภทตามกรรมวิธีที่ทำให้เป็นสารละลายอิมตัวยิ่งยวด ดังนี้ (Mersmann, 2000)

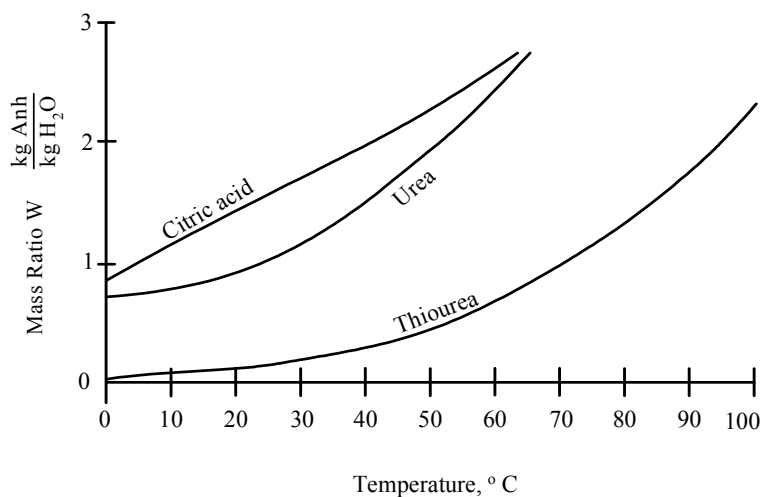
2.3.1 Cooling Crystallization

เป็นกระบวนการตกผลึกที่อาศัยการให้ความเย็นแก่สารละลายเพื่อทำให้เกิดการอิมตัวยิ่งยวดในสารละลายดังกล่าว มีความเหมาะสมกับสารละลายที่ความสามารถในการละลายเปลี่ยนแปลงไปได้ง่ายตามอุณหภูมิ เช่น โปตัสเซียม โซเดียม แอมโมเนียมไนเตรท และ คอปเปอร์ซัลเฟต กระบวนการนี้อาศัยหลักการง่าย ๆ คือ ทำให้สารละลายร้อนขึ้นก่อนเพื่อเพิ่มความสามารถ

ในการละลาย และเพิ่มตัวถูกละลายลงไปให้มากขึ้น หรือปล่อยให้ตัวทำละลายระเหย ในขั้นนี้ สารละลายจะมีสถานะความเข้มข้นต่ำกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งจะถูกส่งเข้าไปภายในถังตกผลึก



รูปที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์



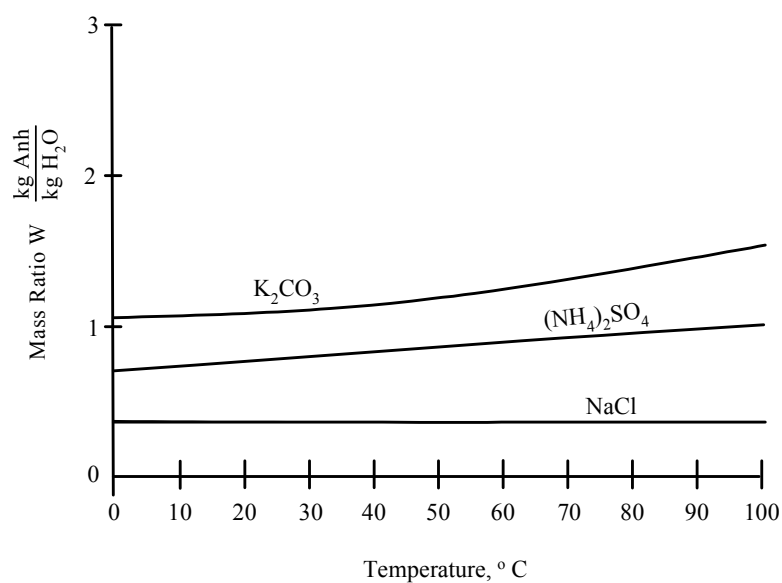
รูปที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์

หลังจากนั้นจะให้ความเย็นแก่สารละลายให้มีอุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่งสถานะของความเข้มข้นกลับมามีค่าต่ำกว่าจุดอิ่มตัว นั่นคือความสามารถในการละลายลดลง (สารละลายจะเกิดการอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด) ในขณะที่ปริมาณตัวถูกละลายยังมีเท่าเดิม ทำให้ตัวถูกละลายส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถละลายได้เกิดการตกผลึกออกมา ทั้งนี้การให้ความเย็นอาจทำเป็นปลอกท่อด้านนอกหรือ

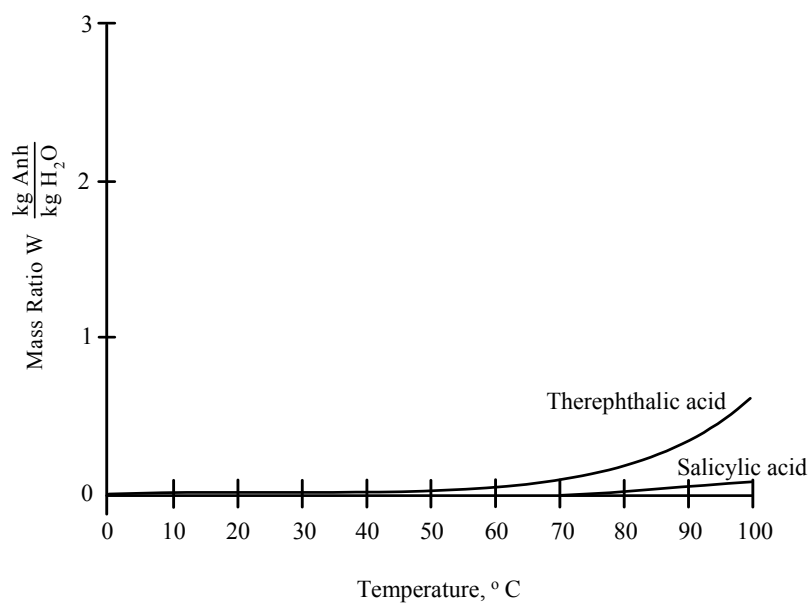
เป็นท่ให้ความเย็นภายในก็ได้ สำหรับกระบวนการตกผลึกในระบบเล็ก ๆ จะใส่สารละลายเข้าไปภายในถังก่อน แล้วจึงให้ความเย็น (Batch operation) วิธีนี้มีข้อเสียคือความเย็นที่ให้กับผลึกจะไม่สม่ำเสมอ และเนื่องจากอุณหภูมิ ณ จุดอิ่มตัวยิ่งยวด เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของผลึก การตกผลึกใน Batch mode จึงส่งผลให้ได้ขนาดผลึกไม่สม่ำเสมอและมีรูปผลึกต่างกัน วิธีแก้ไขคือพยายามทำให้อุณหภูมิ ณ จุดอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าคงที่ ผลึกที่ออกมาจึงจะสม่ำเสมอยิ่งขึ้น สำหรับในระบบที่ใหญ่ขึ้นโดยปกติจะให้สารละลายไหลเข้าถังอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง (Continuous mode) โดยมีการควบคุมสารละลายออกอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาดังกล่าวได้ในระดับหนึ่ง

2.3.2 Evaporative Crystallization

เป็นการตกผลึกโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อให้เกิดการระเหย เมื่อตัวทำละลายน้อยลง สารละลายจะเข้มข้นขึ้นจนกระทั่งเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด วิธีการนี้เหมาะที่จะใช้กับสารละลายที่มีความสามารถในการละลายค่อนข้างคงที่หรือเปลี่ยนไปน้อยมากตามอุณหภูมิ สารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ แอมโมเนียมซัลเฟต และโปตัสเซียม รวมทั้งสารละลายกรด terephthalic ในเมทานอล (methanol) กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการปล่อยสารละลายที่เป็น Under saturate ให้ไหลเข้าไปภายในถังตกผลึกแล้วต้มจนกระทั่งอุณหภูมิถึงจุดเดือด ตัวทำละลายจะระเหยออกไปที่บริเวณผิวด้านบนทำให้เกิดสภาวะการอิ่มตัวยิ่งยวด และเกิดการตกผลึกตามมา และเช่นเดียวกันกับ Cooling crystallization การตกผลึกใน Batch mode มีข้อเสียคือทำให้ขนาดของผลึกที่ได้ไม่สม่ำเสมอ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือพยายามทำให้การระเหยคงที่ที่สุด แต่ถึงแม้จะมีการปรับปรุงตามวิธีการดังกล่าวแล้วก็ตาม ประสิทธิภาพของการตกผลึกใน Batch mode ก็ยังน้อยกว่าใน Continuous mode เช่นเดิม ลักษณะความสามารถในการละลายของสารที่เหมาะสมจะใช้กับวิธีการตกผลึกแบบ Evaporative เป็นดังรูปที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.7 ความสามารถในการละลายของสารละลายอนินทรีย์



รูปที่ 2.8 ความสามารถในการละลายของสารละลายอินทรีย์

2.3.3 Vacuum Crystallization

การตกผลึกประเภทนี้ สารละลายจะถูกทำให้ระเหยและทำให้เย็นตัวลงในเวลาเดียวกันโดยการลดความดันและอุณหภูมิ การทำให้เกิดสุญญากาศ (Vacuum) จะทำเหนือของไหล โดยอาจจะทำได้ถึง 6 ระดับชั้น ในขณะที่เกิดการระเหย สารละลายจะเกิดการสูญเสียพลังงานส่วน

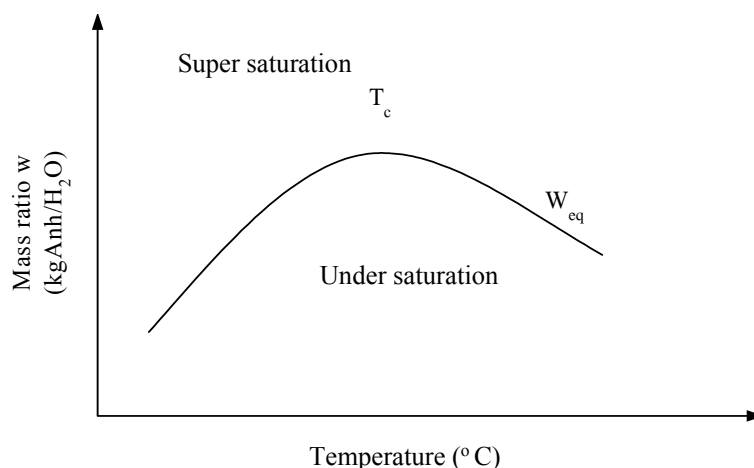
หนึ่งไปเพื่อใช้ในการระเหย (ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ) ทำให้สารละลายเย็นตัวลงและเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดและตกผลึกออกมาบางส่วน ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ ของการตกผลึกประเภทนี้คือการเกิดตะกอนขึ้นที่ผนังภายในของอุปกรณ์ วิธีแก้ไขคือการล้างอุปกรณ์ด้วยตัวทำละลายหรือใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าค่าความเข้มข้นที่สภาวะอิ่มตัวมาก ๆ ก็ได้

2.3.4 Drowning-out Crystallization

เป็นกระบวนการตกผลึกโดยการเติมสารบางประเภทลงไปในสารละลายเพื่อช่วยลดความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย ทำให้เกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดได้ง่ายขึ้น สารที่เติมลงไปเรียกว่า Displacement agent หรือ impurity การตกผลึกของสารอินทรีย์หลายประเภททำได้โดยการเติมสารอินทรีย์ลงไป กระบวนการตกผลึกแบบนี้สามารถใช้ร่วมกับกระบวนการตกผลึกแบบอื่นได้ ซึ่งบางครั้งสามารถช่วยประหยัดพลังงานในการทำให้เกิดการระเหยหรือการทำความเย็นได้เป็นอย่างมาก

2.3.5 Pressure Crystallization

เป็นกระบวนการที่ใช้กับสารละลายประเภทที่ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนถึงระดับหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกความสามารถในการทำละลายจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสามารถในการละลายของสารละลายบางประเภท

วิธีการตกผลึกจะทำโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดในถังอัดความดัน การให้ความดันนั้นเพื่อไม่ให้ตัวถูกละลายระเหยขึ้นมาได้ เมื่อให้ความร้อนมากขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ T_c จนกระทั่งเกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดจะทำให้เกิดการตกผลึกออกมา

2.3.6 Reaction Crystallization

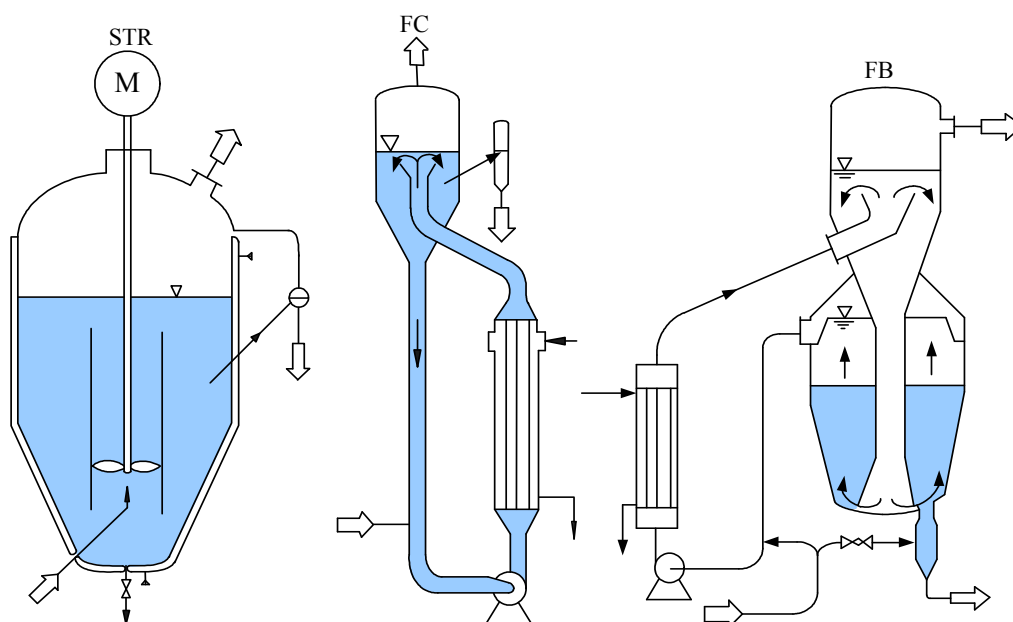
เป็นการนำสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาทำปฏิกิริยากัน แล้วเกิดสถานะอิมตัวยังยวด ทำให้ได้ผลึกออกมา เช่น การนำกรดและเบสมาทำปฏิกิริยากัน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลึกเกลือ เป็นต้น บางครั้งเรียกวิธีการตกผลึกแบบนี้ว่า Precipitation crystallization

สำหรับการตกผลึกจากสารหลอมเหลวนั้นสามารถแยกประเภทได้เป็นสองกรณีคือ กรณีที่ 1 ผลึกเกิดขึ้นเป็นชั้นบาง แยกตัวออกจากสารหลอมเหลว ผลึกที่เกิดขึ้นไม่ได้ผสมอยู่ในตัวสารหลอมเหลว

กรณีที่ 2 ผลึกผสมอยู่ในสารหลอมเหลว ไม่ได้เกิดการเกาะกันเป็นชั้นของผลึก การตกผลึกจากสารหลอมเหลวมีกลไกที่ยุ่ยากซับซ้อนกว่าการตกผลึกจากสารละลายมากตลอดจนอุปกรณ์ในการตกผลึกก็ยุ่งยากซับซ้อนกว่าเนื่องจากมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่จะต้องคำนึงถึงด้วย

2.4 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการตกผลึกและการเลือกใช้

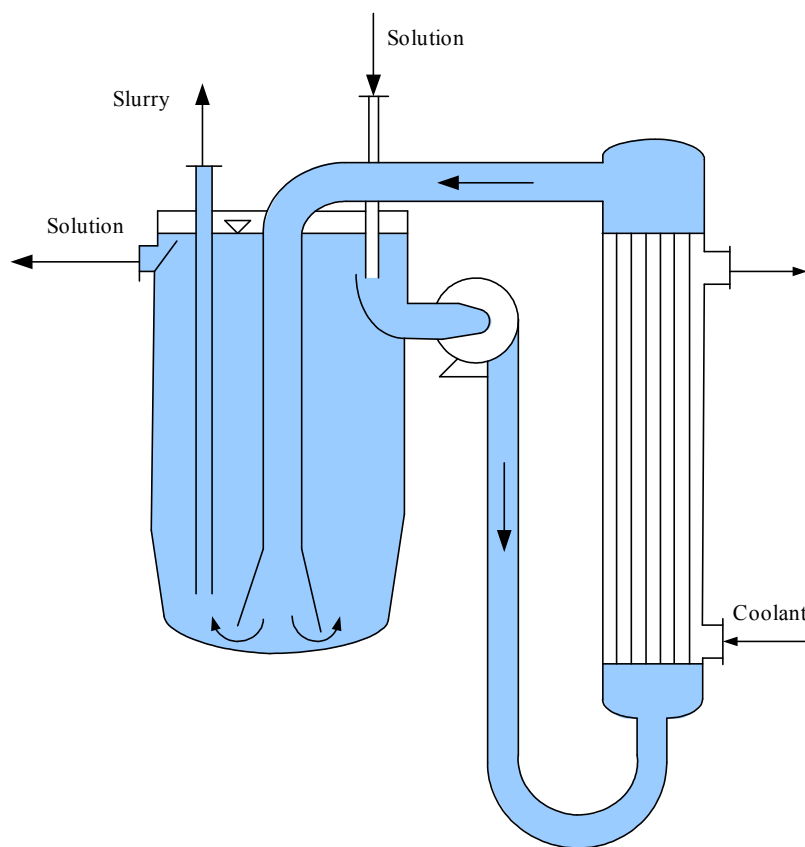
การเลือกใช้อุปกรณ์ในการตกผลึกขึ้นอยู่กับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการตกผลึกและการไหลภายในถังตกผลึกที่ทำให้เกิดการผสมกันดีและเกิดสถานะที่เหมาะสมสำหรับการตกผลึก โดยอุปกรณ์ที่เลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับประเภทของการตกผลึก เช่น การตกผลึกจากสารละลายหรือการตกผลึกจากสารหลอมเหลว สำหรับการตกผลึกจากสารละลาย อุปกรณ์สำหรับการตกผลึกที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 3 แบบคร่าว ๆ ตามลักษณะการผลึกดังนี้ ให้เกิดการไหลของสารละลายภายในถังตกผลึกดังนี้ แบบแรกเป็นถังตกผลึกแบบกวน (Stirred vessel, STR) ภาพซ้ายมือในรูปที่ 2.10 ถังตกผลึกประเภทนี้จะใช้วิธีการผลึกต้นให้เกิดการไหลภายในถังโดยวิธีง่าย ๆ คือใช้ใบพัดในการกวนสารเพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงภายในถังตกผลึก แบบที่สอง (รูปกลาง) คืออุปกรณ์ตกผลึกแบบหมุนด้วยแรง (Forced Circulation, FC) วิธีการที่จะทำให้อาหารละลายเกิดการหมุนวนภายในระบบจะเป็นการใช้เครื่องมือประเภทอื่น เช่น ปั๊ม มาช่วยในการขับเคลื่อนให้อาหารละลายเกิดการไหลวนในระบบ โดยระบบจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือส่วนของการทำความเย็นและส่วนของการตกผลึก สารละลายรวมทั้งผลึกในถังบางส่วนจะถูกปั๊มดูดเข้าไปสู่ห้องทำความเย็นหรือความร้อนเพื่อทำให้เกิดสถานะอิมตัวยังยวดแล้วไหลวนกลับเข้ามาที่ห้องสำหรับตกผลึกอีกครั้งข้อเสียของทั้งสองแบบข้างต้นคือ อุปกรณ์ที่นำมาช่วยผลึกต้นให้เกิดการไหลจะตีผลึกที่มีขนาดใหญ่ให้เกิดการแตกหักเสียหาย ซึ่งระบบทั้งสองนี้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน



รูปที่ 2.10 แผนภาพถังตกผลึกที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Mersmann, 2000)

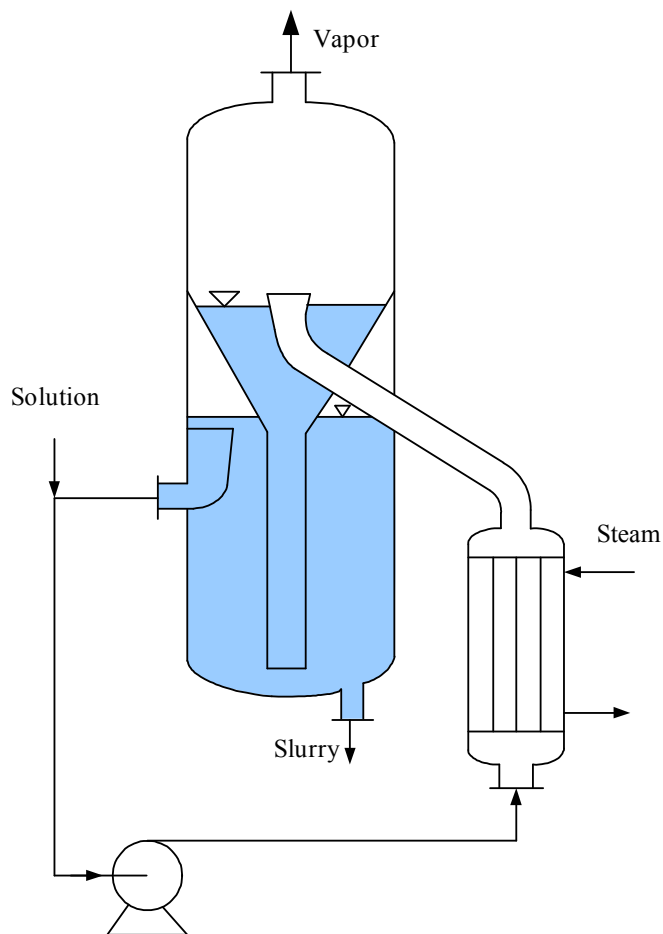
ข้อเสียของถังตกผลึกทั้งสองแบบนี้ทำให้มีการพัฒนาระบบการตกผลึกที่ดีกว่า ปัจจุบันนิยมใช้อุปกรณ์แบบที่ 3 ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 ภาพขวามือ ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบ Fluidized bed อุปกรณ์แบบนี้จะใช้ป้อนเข้ามาช่วยในการผลึกดันการไหลเช่นเดียวกับแบบที่สอง แต่จะออกแบบให้กลไกการไหลของสารละลายเป็นตัวช่วยแยกผลึกเพื่อให้ผลึกมีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งรูปร่างของถังตกผลึกจะซับซ้อนกว่ากรณีแบบที่สอง ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ ผลึกที่ได้มีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าสองแบบแรก ความแตกต่างเมื่อเทียบกับสองแบบแรกคือ ส่วนทำความเย็นหรือส่วนให้ความร้อนจะถูกแยกออกมาอยู่ด้านนอก และจัดระบบการไหลภายในถังให้ผลึกที่มีขนาดโตตกลงไปด้านล่าง ผลึกขนาดเล็กเท่านั้นที่จะไหลไปตามสารละลายเข้าอุปกรณ์ที่ขั้วดันให้เกิดการไหลวน (โดยประมาณ เล็กกว่า 100 ไมครอน ซึ่งผลึกขนาดนี้จะไม่ถูกใบพัดตีให้แตก แต่จะไหลไปตามส่วนที่เป็นของเหลว) ส่วนที่ไหลเข้าไปในตัวให้ความร้อนหรือตัวทำความเย็นจะกลายเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด ซึ่งจะถูกแยกส่วนโดยสิ้นเชิงกับบริเวณที่เกิดการตกผลึก บริเวณนี้เรียกว่าเป็น Virtual crystal free zone คุณภาพของผลึกที่ได้โดยรวมจะดีกว่าสองแบบแรกมาก มีความสม่ำเสมอมากกว่า และผลึกมีขนาดโตกว่า

ถังตกผลึกทั้งสามแบบดังกล่าวข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการตกผลึกประเภทต่าง ๆ เช่นการตกผลึกแบบทำความเย็น การตกผลึกแบบให้ความร้อน หรือการตกผลึกแบบทำปฏิกิริยา ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของการตกผลึกที่เหมาะสมสำหรับสารละลายแต่ละประเภท ตัวอย่างของถังตกผลึกที่มีใช้ในอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไปมีดังต่อไปนี้



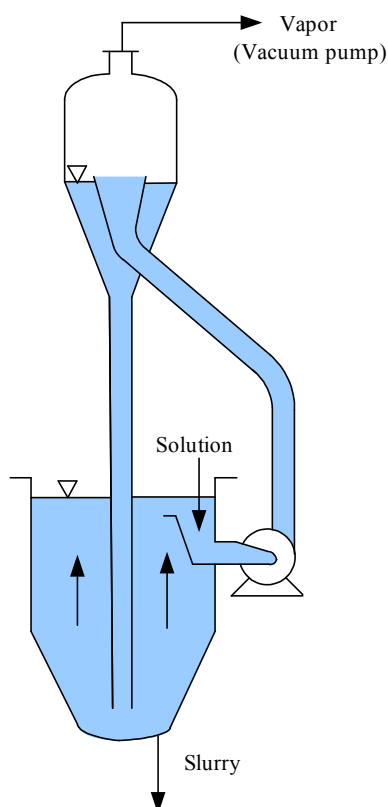
รูปที่ 2.11 ถังตกผลึกแบบทำความเย็นที่มีปั๊มทำให้เกิดการไหลวนและตัวทำความเย็นด้านนอก

รูปที่ 2.11 แสดงอุปกรณ์การตกผลึกแบบทำความเย็น ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนให้สารละลายหมุนวนในระบบ และส่วนทำความเย็นอยู่ภายนอก กรณีนี้ของไหลจะถูกปล่อยเข้าสู่ระบบอย่างช้า ๆ ความแตกต่างของอุณหภูมิของสารละลายภายในอุปกรณ์กับสารละลายที่ใส่เข้าไปที่ทางเข้าจะถูกควบคุมไม่ให้เกิน 2°K หลังจากนั้นจะถูกปั๊มดูดเข้าสู่ส่วนทำความเย็น เกิดสภาวะการอิ่มตัวยิ่งยวด และไหลวนกลับมภายในถังอีกครั้ง เมื่อถึงบริเวณที่ปากท่อขยายออก จะเกิดการตกผลึกขึ้นที่บริเวณดังกล่าว



รูปที่ 2.12 ถังตกผลึกแบบทำให้เป็นไอที่มีหม้อต้มภายนอก

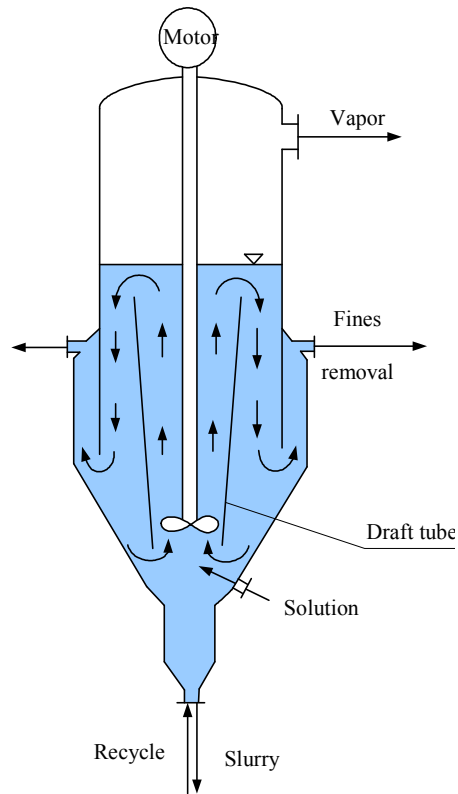
รูปที่ 2.12 เป็นอุปกรณ์การตกผลึกแบบทำให้เป็นไอ ซึ่งใกล้เคียงกับแบบทำความเย็นที่แสดงในรูปที่ 2.11 ความแตกต่างอยู่ที่การเปลี่ยนจากการให้ความเย็นเป็นการให้ความร้อน แล้วไหลกลับเข้าถัง บริเวณผิวของสารละลายด้านบน (Free surface) จะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นตัวยิ่งยวดและเกิดการตกผลึก ผลึกที่มีขนาดโตจะตกตะกอนลงไปที่ด้านล่าง สารละลายที่เหลือจะถูกดูดออกด้านบน รวมถึงอนุภาคเล็ก ๆ ด้วย เพื่อไปรวมกับสารละลายใหม่ แล้วส่งกลับมาในระบบอีกครั้งเพื่อให้ความร้อนหมุนเวียนกันไปเรื่อย ๆ เป็นระบบ



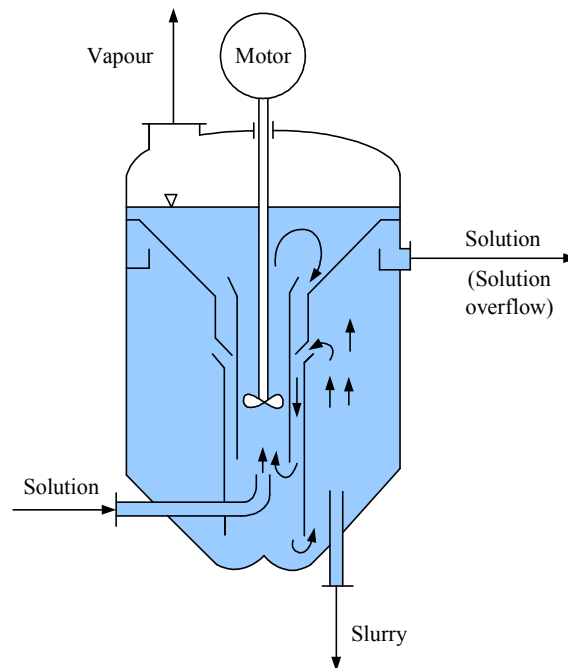
รูปที่ 2.13 ถังตกผลึกแบบสุญญากาศที่มีการแยกถังตกผลึกและถังสำหรับการระเหย

รูปที่ 2.13 เป็นอุปกรณ์ตกผลึกแบบสุญญากาศซึ่งแยกชุดถังตกผลึกกับถังที่เกิดการระเหยออกจากกัน โดยไม่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง อุปกรณ์ดังกล่าวถือว่าเป็นระบบเปิด (Opening model) คือ ส่วนที่เป็นตัวถังสำหรับตกผลึกจะอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ

รูปที่ 2.14 เป็นอุปกรณ์แบบสุญญากาศเช่นกัน แตกต่างกันตรงที่มีอุปกรณ์ปั่นภายในถังเพื่อทำให้เกิดการผสมกันและไม่ได้แยกถังที่ระเหยกับส่วนที่ตกผลึกออกจากกัน ซึ่งคล้ายกับแบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมก่อนหน้านี้ แต่ปรับปรุงตัวถังให้กลไกการไหลของสารละลายมีส่วนช่วยในการแยกผลึกได้มากขึ้น ส่วนที่ไหลกลับไปและส่วนไหลผ่านใบพัดจะเป็นเพียงสารละลายที่มีแค่ผลึกขนาดเล็กปนอยู่เท่านั้น ผลึกขนาดใหญ่จะตกตะกอนสู่เบื้องล่างและถูกดูดออกไป

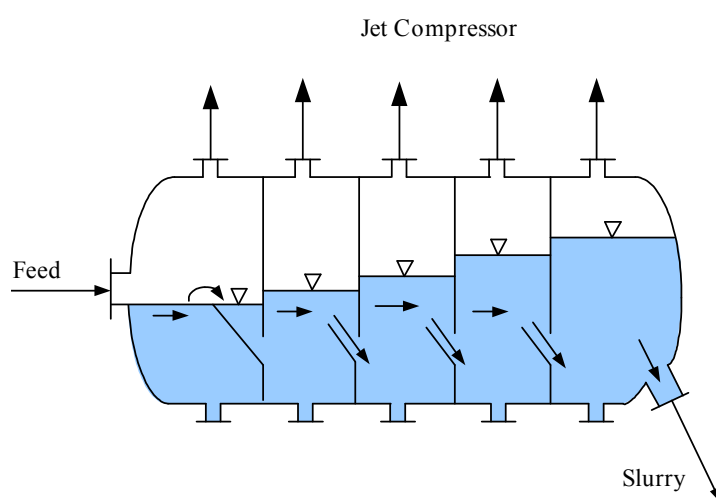


รูปที่ 2.14 ถังตกลีกลักษณะแบบสุญญากาศที่ทำงานอย่างต่อเนื่องและมีอุปกรณ์สำหรับปั่น



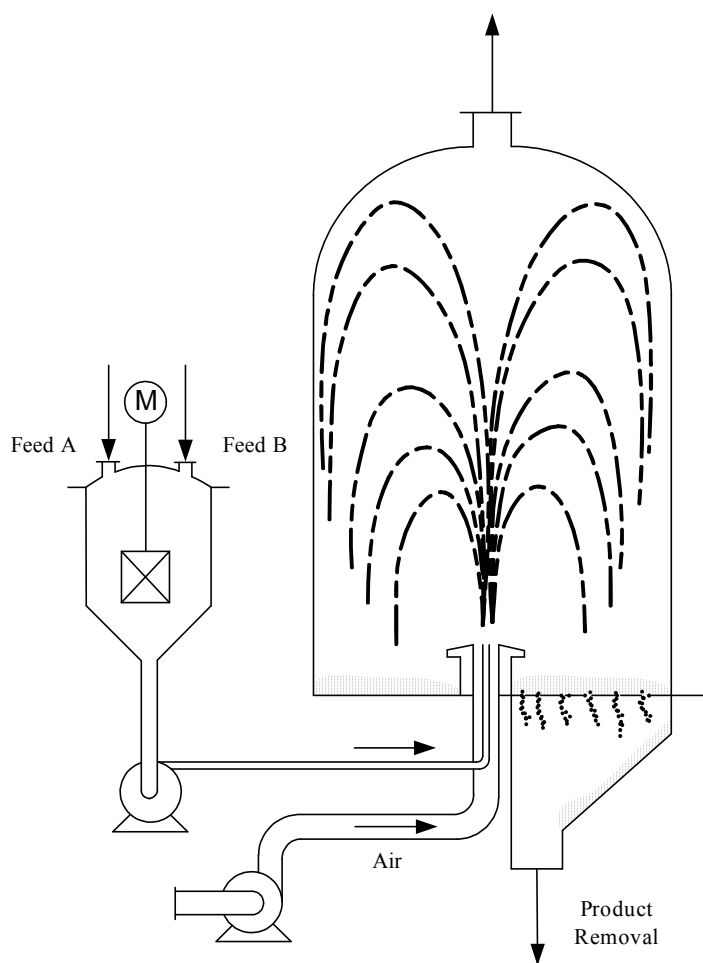
รูปที่ 2.15 ถังตกลีกลักษณะแบบสุญญากาศที่มีอุปกรณ์สำหรับปั่นบรรจุอยู่ภายในท่อ

รูปที่ 2.15 เป็นอุปกรณ์แบบสุญญากาศที่มีการปรับปรุงให้มีท่อภายในสองชั้น สำหรับรูปที่ 2.16 เป็นอุปกรณ์แบบสุญญากาศที่ไม่มีอุปกรณ์ขับเคลื่อนของไหลเข้ามาเกี่ยวข้องกับไหลจะไหลต่อเนื่องทางเดียว โดยเริ่มจากห้องที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศห้องแรกทางด้านซ้ายมือ ซึ่งจะถูกทำให้เย็นและไหลต่อเนื่องไปยังห้องถัดไป โดยความดันจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งห้องสุดท้ายที่มีความดันต่ำที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกที่ทางออกเพียงครั้งเดียวไม่มีการไหลวนกลับเข้ามาในระบบใหม่ อุปกรณ์แบบนี้เหมาะสำหรับการทำความเย็นแบบสุญญากาศเท่านั้น ไม่เหมาะกับแบบที่ทำให้เกิดการระเหย



รูปที่ 2.16 ถังตกผลึกแบบสุญญากาศในแนวราบ 5 ชั้นที่ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่

อุปกรณ์ตกผลึกแบบสุดท้ายเป็นอุปกรณ์ที่ทำการตกผลึก โดยการเป่าอากาศและฉีดละลอมของสารละลายขึ้นไปพร้อมกัน ตัวทำละลายจะเกิดการระเหยและลอยออกไปที่ท่อด้านบน ส่วนตัวถูกละลายจะตกผลึกและตกลงมาด้านล่าง ในรูปที่ 2.17 เป็นภาพการทำผลึกของแคลเซียมไนเตรท ซึ่งเดิมถูกละลายอยู่ใน แอมโมเนียมไนเตรท



รูปที่ 2.17 การตกผลึกในกระบวนการผลิตแคลเซียมไนเตรท

2.5 กระบวนการดูดออกแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic Withdrawal)

ขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการตกผลึกน้ำตาลก็คือการดูดผลึกออกจากถังตกผลึก รูปแบบการไหลบริเวณใกล้ ๆ ท่อดูดออกทั้งภายในท่อ และภายนอกท่อเพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพดีจะต้องเป็นแบบไอโซไคเนติก ซึ่งการดูดออกแบบไอโซไคเนติกสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาการไหลจากพื้นที่รอบนอกเข้าสู่ท่อดูดออกซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วและพื้นที่หน้าตัดดังสมการต่อไปนี้

$$Q = AV = \text{constant} \quad (2.4)$$

ดังนั้น

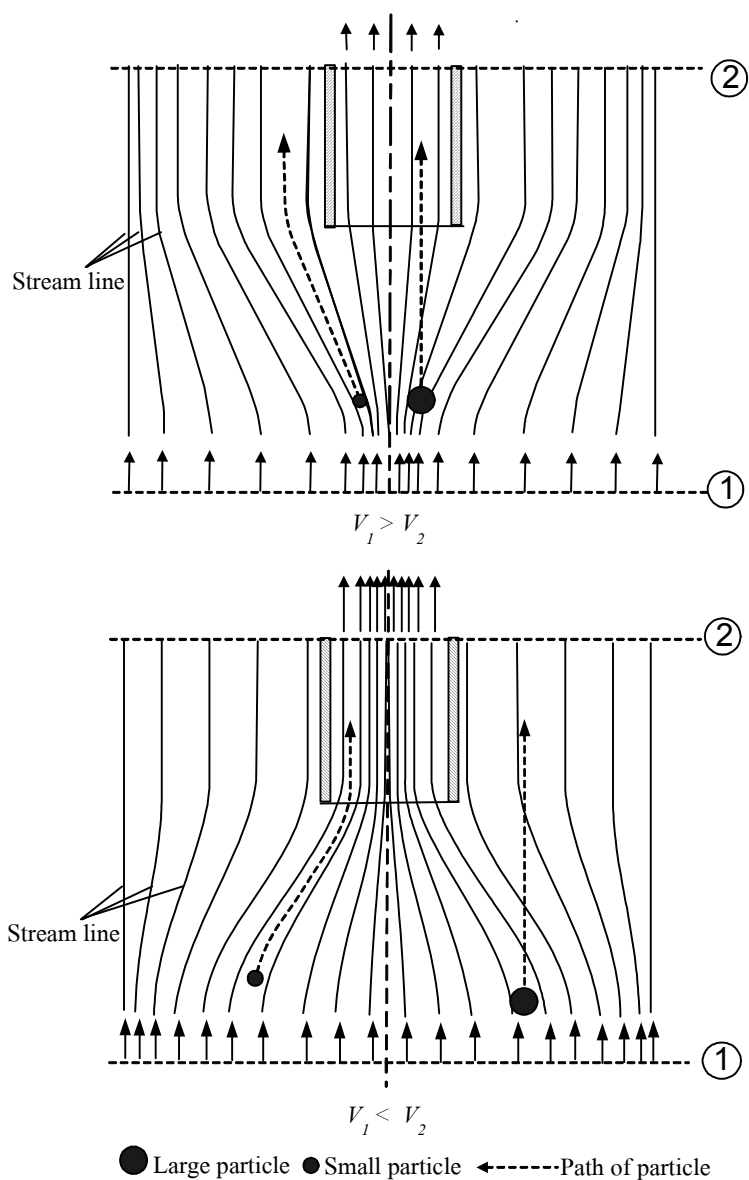
$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (2.5)$$

ตัวห้อย 1 หมายถึงตำแหน่งต้นน้ำ

ตัวห้อย 2 หมายถึงตำแหน่งปลายน้ำ

หากความเร็วเฉลี่ยภายในท่อมมีค่ามากกว่าความเร็วภายนอกท่อม นั่นคือ $V_1 > V_2$ ของไหลที่จะไหลเข้าสู่ท่อจะต้องไหลผ่านพื้นที่ภายนอกท่อมที่กว้างกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ เป็นเหตุให้รูปทรงความเร็วและเส้นแนวการไหลมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ปากท่อคูดอก (ดูรูปที่ 2.18) ในทางกลับกัน หากความเร็วเฉลี่ยภายในท่อมมีค่าน้อยกว่าความเร็วภายนอกท่อมก็จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้มองเห็นรูปทรงความเร็วและเส้นแนวการไหลมีแนวโน้มลู่ออกจากปากท่อ ทั้งนี้การเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองประเภทที่กล่าวมาเรียกว่าเป็นการคูดอกแบบไม่เป็นไอโซโคเนติก หากความเร็วเฉลี่ยภายในท่อมมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเร็วภายนอกท่อม จะไม่ทำให้เกิดการลู่เข้าหรือบานออกจากท่อคูดอกซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการคูดอกแบบไอโซโคเนติก

การคูดอกแบบไอโซโคเนติกจะมีผลกระทบต่อกระบวนการตกผลึกในแง่ของการแบ่งแยก (Classification) ของสารละลายภายในถัง (Mersmann, 1995) ผลกระทบจากการคูดอกที่ไม่เป็นไอโซโคเนติกคือจะทำให้เกิดการแยกขนาดของผลึก กล่าวคือกรณีที่ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อมมีค่ามากกว่าความเร็วเฉลี่ยภายนอกท่อมและเกิดการการลู่เข้าสู่ท่อคูดอกดังได้กล่าวไว้ข้างต้น จะทำให้ผลึกที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่มักจะลอยตามเส้นแนวการไหลสามารถลอยเข้าสู่ท่อคูดอกได้โดยง่ายในขณะที่ผลึกที่มีขนาดโตซึ่ง มีน้ำหนักมากกว่า จะลอยตัดเส้นแนวการไหลผ่านไปโดยไม่เข้าสู่ท่อคูดอก เนื่องจากของไหลมีแรงที่จะผลักเม็ดผลึกในทิศที่จะลู่เข้าสู่ปากท่อไม่มากพอ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ผลึกที่ลอยเข้าสู่ท่อคูดอกส่วนใหญ่เป็นผลึกที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดการแบ่งแยกขนาดของผลึก ผลึกขนาดเล็กจะถูกดึงออกจากถัง คงเหลือเฉพาะผลึกขนาดใหญ่ไว้ในถังต่อไป ในทางกลับกันหากความเร็วเฉลี่ยภายในท่อคูดอกมีค่าต่ำกว่าความเร็วภายนอกท่อมและเกิดการเบี่ยงออกจากท่อ ก็จะทำให้ผลึกที่มีขนาดเล็กซึ่งไหลตามเส้นแนวการไหลเกิดการไหลเบี่ยงออกจากท่อตามไปด้วย ในขณะที่ผลึกขนาดใหญ่จะสามารถลอยเข้าสู่ท่อคูดอกได้ กรณีนี้จะทำให้เกิดการแบ่งแยกขนาดของผลึกโดยที่ผลึกที่ยังคงเหลืออยู่ในถังส่วนใหญ่เป็นผลึกขนาดเล็ก ๆ ส่วนผลึกขนาดใหญ่จะถูกแยกออกมาภายนอกถัง รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบผลกระทบของการคูดอกแบบไม่เป็นไอโซโคเนติกส์



รูปที่ 2.18 การไหลของอนุภาคเมื่อการดูดออกไม่เป็นไอโซโคเนติกส์

(Mersmann and Rennie, 2000)

โดยปกติในการตกผลึกต้องการการผสมกันเป็นอย่างดีภายในถังผลึก ตลอดจนสารละลายที่ดูดออกมีคุณสมบัติเหมือนสารละลายภายในถังทุกประการ ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของขนาดของผลึกภายในถังเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลและให้ผลึกที่มีคุณภาพ การแบ่งแยกขนาดของผลึกดังกล่าวนี้ทำให้สารละลายภายในถังมีความหนาแน่นของผลึก และการกระจายตัวของขนาดของผลึกเปลี่ยนไป การเจริญเติบโตของผลึกซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารละลายภายในถังก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้การควบคุมคุณภาพของขนาดของผลึกเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเป้าหมายของ

การดูดออกที่ต้องการให้เกิดขึ้นในกระบวนการตกผลึกจะเป็นการดูดออกแบบไอโซไคเนติก ซึ่งจะทำให้การควบคุมการตกผลึกเพื่อให้ได้ผลึกคุณภาพดีสามารถทำได้ง่ายขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลในถังตกผลึกและถังกวน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการตกผลึกนั้นมีมากมาย ลักษณะการไหลในถังตกผลึกก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของผลึก เช่น การไหลที่ทำให้เกิดการผสมกันภายในถังผลึกที่ไม่ดีพอจะก่อให้เกิดการกระจายความหนาแน่นของผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ และลักษณะการกระจายความหนาแน่นของผลึกที่ไม่เท่ากันภายในถังจะส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสภาวะความอึดตัวของสารละลายที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งภายในถังในระหว่างการตกผลึก ซึ่งจะมีผลมีผลสืบเนื่องไปถึงคุณภาพของผลึกที่ได้

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการไหลภายในถังตกผลึกทั้งจากการทดลอง การจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนงานวิจัยในระบบที่คล้ายกับระบบการตกผลึก เช่น การไหลในถังกวน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Sha and Palosaari (2000) ได้ศึกษาการกระจายขนาดของผลึก (Crystal-size distribution) ด้วยการทดลองเพื่อชี้ให้เห็นความสำคัญและผลกระทบของการผสมกันที่ไม่สมบูรณ์ที่มีต่อการกระจายความหนาแน่นของผลึกภายในถังตลอดความสูงของถังผลึก การทดลองดังกล่าวได้ใช้ถังตกผลึกประเภทต่อเนื่อง (Continuous crystallizer) โดยไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ การทดลองชี้ให้เห็นว่าการผสมกันที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกภายในถังตกผลึก หรือความเข้มข้นในการผสมที่ต่างกัน ส่งผลให้การกระจายของความหนาแน่นภายในถังมีค่าไม่เท่ากัน การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของผลึกโดยใช้สมมุติฐาน MSMPR จะพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของผลึกจะขึ้นอยู่กับ Residence time เป็นหลัก แต่ในถังผลึกที่มีการผสมกันไม่สมบูรณ์นั้น ค่าดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นในการผสม และตำแหน่งของท่อดูดออก นอกจากนี้การผสมกันที่ไม่สมบูรณ์ยังมีผลกระทบต่ออัตราการกระจายตัวของสารละลายหลัก ซึ่งมีผลต่อเนื่องไปถึงการเจริญเติบโตของผลึกอีกด้วย งานวิจัยนี้เน้นให้เห็นถึงผลกระทบจากการผสมกันที่ไม่สมบูรณ์ในถังผลึกอย่างเป็นรูปธรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์การตกผลึกแบบใหม่ ซึ่งเดิมนิยมใช้สมมุติฐาน MSMPR เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ นั่นคือ ตั้งสมมุติฐานว่าการกระจายตัวของความหนาแน่นของผลึกภายในถังเป็นเอกรูป แต่งานวิจัยนี้ได้เสนอว่าการผสมกันที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการกระจายตัวของความหนาแน่นของสารละลายภายในถัง และจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ใหญ่ขึ้น เช่น กระบวนการตกผลึกในอุตสาหกรรม

ซึ่งเป็นไปได้ยากที่การผสมกันภายในถังผลึกจะมีความเป็นเอกรูป การวิเคราะห์แบบเดิมที่ใช้สมมุติฐาน MSMPR จะมีความผิดพลาด เป็นผลให้การทำนายผลไม่ตรงตามความเป็นจริง

Barresi and Baldi (1987) ได้ทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การผสมกันในถังกวนโดยสังเกตพฤติกรรมการกระจายตัวของอนุภาคในถัง ผลการทดลองที่ได้สนับสนุนงานวิจัยของ Z. Sha และคณะ (2001) ที่นำเอา Computational Fluid Dynamics (CFD) มาช่วยในการทำนายรูปทรงความเร็วและเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction) ภายในถังตกผลึก ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกระจายตัวของอนุภาคมีความเป็นเอกรูปมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบพัด บริเวณที่ไม่มีอนุภาคปะปนที่ส่วนบนของตัวถังจะขยายบริเวณกว้างขึ้นเมื่อความเร็วรอบของใบพัดต่ำลง และความสูงจากก้นถังของบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูงที่สุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของใบพัดเช่นกัน นอกจากนี้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่เกิน 300 ไมครอนจะไม่สามารถลอยได้ดีในถังที่ความเร็วใบพัด 600 รอบต่อนาที ในขณะที่บริเวณส่วนบนของถังจะมีเฉพาะอนุภาคเล็ก ๆ เท่านั้นที่สามารถลอยขึ้นไปได้

Shamlou, Ayazi and Koutsakos (1989) ได้ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นในการผสมที่แตกต่างกันหลายค่า ในถังตกผลึกที่มีก้นมน ค่าของความเข้มข้นในการผสมที่ต่างกันจะทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นซึ่งไม่เหมือนกัน อีกทั้งยังพบว่า ที่ค่าความเข้มข้นของการผสมคงที่ ขนาดของอนุภาคที่ต่างกันทำให้ค่าการกระจายของความหนาแน่นมีความแตกต่างกันออกไปอีก ดังนั้นเมื่อมีผลึกหลายขนาดภายในถังจะทำให้ตำแหน่งภายในถังมีการกระจายความหนาแน่นไม่เท่ากัน ยิ่งไปกว่านั้นการกระจายขนาดของผลึกในท่อชุดออก และภายในถังตกผลึกมีความแตกต่างกันถึงแม้ความเข้มข้นในการผสมจะมีค่าคงที่ ซึ่งทำให้เวลาที่ของไหลไหลเวียนอยู่ในถังกับเวลาที่ผลึกลอยในถังผลึกมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้เวลาที่ลอยอยู่ภายในถังของผลึกขนาดต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน

Buurman, Resoort and Plaschkes (1986) ได้ศึกษาวิจัยโดยทำการทดลองกับถังปั่นทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กเพื่อหากฎการขยายส่วน (scale up rule) และหาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของอนุภาคระหว่างถังขนาดใหญ่กับขนาดเล็ก โดยใช้ Pitched blade turbines (PBT) ในการปั่นของผสมภายในถัง เพื่อพิจารณาการผสมในบริเวณต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่บริเวณที่มีการกระจายความหนาแน่นของผลึกค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอจะอยู่บริเวณด้านล่างของถัง ส่วนบริเวณด้านบนของถังนั้นจะมีการกระจายความหนาแน่นของผลึกน้อยกว่าหรือบางส่วนอาจจะไม่มีอนุภาคอยู่เลย (clear liquid layer) ซึ่งลักษณะดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเร็วในการปั่นตลอดจนลักษณะของใบพัดและตัวถัง รวมทั้งลักษณะทางกายภาพของระบบ อย่างไรก็ตาม

สิ่งที่เห็นได้อย่างเด่นชัดก็คือ ระยะเวลาสูงของบริเวณที่มีอนุภาคผสมอยู่นั้นเป็นส่วนโดยตรงกับความเร็วยรอบของการปั่น

การจะได้ค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นของสารละลายในถังผลึกตลอดจนตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผลึกจากการทดลองนั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากการวัดค่าต่าง ๆ ในถังตกผลึกไม่ว่าจะในงานวิจัยหรือแม้แต่ในวงการอุตสาหกรรมมีขั้นตอนที่ยุ่งยากซับซ้อนตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาแพง อีกทั้งค่าตัวแปรบางค่าไม่สามารถวัดได้ทุกจุดภายในถัง ส่งผลให้การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในถังตกผลึกโดยการนำความรู้ทาง Computational Fluid Dynamics (CFD) มาช่วยในการทำนายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

Bakker, Fasano and Myers (1998) ได้นำ CFD มาใช้ในงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักอยู่ที่การศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการวางใบพัดในถังกวน จำนวนของใบพัดในถังปั่น ความเร็วยรอบของใบพัด ประเภทของใบพัดและขนาดของใบพัด โดยทำการจำลองการไหลในถังปั่นแบบทรงกระบอก สิ่งที่แตกต่างจากงานวิจัยของ Sha et al, (2001) คือ Bakker et al, (1998) ไม่ได้เติมอนุภาคขนาดต่าง ๆ ลงไป แต่ใช้จำลองการไหลแบบเฟสเดียว และพิจารณารูปสรความเร็วประกอบกับผลการทดลองซึ่งเติมอนุภาคลงในถังปั่น ซึ่งมีข้อดีคือการจำลองการไหลแบบเฟสเดียวมีความซับซ้อนน้อยกว่าการจำลองการไหลแบบหลายเฟส ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่น ๆ ในการทำนายลักษณะการกระจายตัวของผลึกหรืออนุภาคในภาชนะต่าง ๆ โดยมองจากรูปสรความเร็วและเส้นแนวการไหล ผลที่ได้จากการจำลองในระบบใบพัดเดี่ยวเมื่อพิจารณาจากรูปสรความเร็วและเส้นแนวการไหล พบว่าการวางใบพัดในตำแหน่งที่สูงหรือการใช้ใบพัดขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ การไหลในถังจะแยกออกเป็นสองส่วนอย่างชัดเจน คือส่วนบนเหนือใบพัดและส่วนล่างใต้ใบพัด และเกิดการหมุนวนที่ตำแหน่งกลางกันถัง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการตกตะกอนของผลึกและจับตัวกันเป็นก้อนแข็งที่ก้นถัง การเพิ่มความเร็วของการหมุนของใบพัดหรือลดระยะเวลาสูงจากก้นถังหรือแม้แต่การลดขนาดของใบพัดลงจะช่วยแก้ปัญหาการตกตะกอนที่ก้นถังได้บ้าง และสามารถลดปัญหาการไหลย้อนกลับของของไหลซึ่งทำให้การไหลแบ่งเป็นสองวงรอบได้ด้วย การใส่จำนวนใบพัดเพิ่มเข้าไปโดยที่ระยะไม่ห่างจากใบพัดใบแรกมากนักจะทำให้รูปสรความเร็วมีความเป็นเอกรูปมากขึ้น เมื่อเทียบกับผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า การกระจายตัวของอนุภาคเป็นเอกรูปมากขึ้นเช่นกัน หากระยะที่ว่างของใบพัดห่างกันจนเกินไปจะทำให้รูปสรความเร็วมีการไหลย้อนกลับเกิดเป็นวงรอบสองวง เมื่อเทียบกับผลการทดลองจะเห็นว่าเกิดความแตกต่างของชั้นของผสมที่มีการกระจายของความหนาแน่นต่างกันได้อย่างชัดเจนซึ่งหมายความว่า การผสมกันยังไม่ดีพอนั่นเอง และเนื่องจากใบพัดที่จะใช้ในถังปั่นมีได้หลายประเภทในการทดลอง

และการจำลองได้ใช้ใบพัดสองประเภทซึ่งนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยให้ผลการทดลองและผลการจำลองที่คล้ายคลึงกัน

การพบลักษณะการไหลย้อนกลับโดยพิจารณาจากรูปด้านข้างความเร็วและเส้นแนวการไหลในถังของ Bakker et al, (1998) นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Jaworski et al, (1991) ซึ่งใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) ในการตรวจวัดความเร็ว และพบว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้บริเวณก้นถังมีความเร็วตามแนวแกนของถังต่ำกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเกิดการตกตะกอนในบริเวณนี้ ผลที่ได้ชี้ชัดว่าเป็นการยากที่อุณหภูมิจะลอยขึ้นไปผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้การไหลดังที่กล่าวมาในข้างต้น อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการทำก้นถังให้มีลักษณะเป็นกรวยแหลมโค้ง (Conical base) เพื่อจะไม่เกิด Stagnation point และไม่ทำให้เกิดการจับรวมตัวของผลึกบริเวณดังกล่าว

นอกจากนี้ Bakker, Laroche, Wang and Calabrese (1998) ยังได้ศึกษารูปแบบการไหลในถังกวน ซึ่งใช้ Pitched blade turbine ซึ่งมีจำนวนใบพัดสี่ใบ และการไหลอยู่ในย่านความเร็วต่ำโดยใช้เทคนิคกริดเลื่อน (Sliding grid) ผลการจำลองแสดงในรูปของรูปสรความเร็วและเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้ Laser-Doppler Velocimetry มีความคล้ายคลึงกัน โดยพบว่าที่ความเร็วรอบของใบพัดต่ำ ๆ จะเกิดรูปแบบการไหลในแนวรัศมีมากกว่าในแนวแกน และในทางกลับกันถ้าหากเพิ่มความเร็วรอบของใบพัดให้สูงขึ้นจะเกิดความเร็วในแนวแกนมากขึ้นและมีความเร็วในแนวรัศมีน้อยลง

Maggiaris, Goulas, Alexopoulos, Chatzi and Kiparissides (1998) ใช้ CFD ในการทำนายการก่อตัวของเม็ดโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับถังกวนที่ใช้ในการผสมสารทั่วไป โดยนำผลที่ได้จากการจำลองการไหลในถังผลึกดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ และศึกษาฟังก์ชันการแตกหักและการหลอมรวมกันของเม็ดโพลีเมอร์ ฟังก์ชันทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดโพลีเมอร์ อัตราการสูญเสียพลังงาน (Energy dissipation rate) และลักษณะทางกายภาพของระบบ ณ เวลานั้น ๆ การจำลองจะพิจารณาการไหลแบบเฟสเดียวโดยใช้น้ำเป็นของไหลหลัก อัตราการสูญเสียพลังงานจะพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพิจารณารูปสรความเร็ว โดยในบริเวณที่มีอัตราการสูญเสียพลังงานสูงจะทำให้เกิดการแตกหักสูง ซึ่งคาดการณ์ว่าการแตกหักดังกล่าวเกิดจากการที่เม็ดโพลีเมอร์กระทบกันมากเนื่องจาก Shear rate ที่สูง บริเวณที่มีการหมุนวนจะเกิดจากการประสานกันของเม็ดโพลีเมอร์ ซึ่งมีผลเป็นอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองวัสดุ เนื่องจากมีเม็ดโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ขนาดที่จะต้องคัดออกอีกด้วย

Sahu, Kumar, Patwardhan and Joshi (1999) ได้เสนอแนวคิดในการทำนายอัตราการสูญเสียพลังงานแบบปั่นป่วน (Turbulent energy dissipation rate: ϵ) สำหรับแบบจำลอง $k - \epsilon$ ใน

การทำนายรูปแบบการไหลในถังกวน แนวคิดนี้เรียกว่า Zonal modeling ซึ่ง Sahu และคณะ ได้เสนอว่าการทำนายค่า ε ภายในถังกวนไม่ควรจะใช้ค่าเดียวกันตลอดทั้งถัง เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในถังตกผลึกไม่เป็นเอกรูป ดังนั้น ควรจะแบ่งค่าดังกล่าวให้เหมาะสมสำหรับแต่ละพื้นที่ ในที่นี้ได้แนะนำให้แบ่งพื้นที่ย่อยอย่างน้อยสองส่วนคือส่วนล่างใต้ใบพัดและส่วนบนเหนือใบพัด เมื่อได้ผลจากการจำลองความเร็วภายในถังผลึก จะนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าความเร็วที่ได้จากการวัดโดยใช้เทคนิค LDV ผลการจำลองดังกล่าวใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด แต่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นที่ใช้ในการทำนายค่า ε แล้วก็ยังไม่เห็นผลที่แตกต่างอย่างชัดเจน

ปี 2001 Sha, Oinas, Louhi-Kultanen, Yang and S.Palosaari ได้นำ CFD มาใช้ในการจำลองการไหลในถังผลึกเพื่อหาค่าฟังก์ชันการแบ่งแยก (classification function) ซึ่งมีผลกระทบเนื่องมาจากขนาดของผลึก ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นไปตามสมการ

$$h(z_0, f(N, D), L) = \frac{n_j}{n} \quad (2.6)$$

เมื่อ

n_j คือ ความหนาแน่นของประชากรผลึกแต่ละปริมาตรควบคุม (Control volume)

n คือ ความหนาแน่นของประชากรผลึกเฉลี่ยภายในถัง

การจำลองการไหลจะทำให้ได้ค่าเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าฟังก์ชันการแบ่งแยกได้ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการจำลองการไหลนี้ไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการดูดผลึกที่ออก และไม่พิจารณาผลกระทบของท่อดูดออก โดยประมาณว่าความหนาแน่นของผลึกในท่อดูดออกเท่ากับความหนาแน่นของประชากรผลึกถึงที่ตำแหน่งที่ติดตั้งท่อดูดออกนั้น ๆ

โปรแกรมวิเคราะห์การไหลสามมิติ CFX4.2 ถูกนำมาช่วยในการจำลองการไหลสามมิติในถังตกผลึกที่มีน้ำเป็นของเหลวหลักและเติมอนุภาคขนาดต่าง ๆ ลงไปรวม 6 ขนาดด้วยกัน ทำการจำลองที่ความเร็วรอบของใบพัดหลายความเร็วรอบ แยกตามขนาดของอนุภาค เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วจากการปั่นของใบพัดด้วย นอกจากนี้การจำลองการไหลภายในถังเน้นไปที่ผลกระทบจากความเข้มข้นในการผสมกันของของผสม ผลกระทบของระยะความสูงจากก้นถัง และผลกระทบจากรูปร่างของตัวถังเอง พบว่าที่กล่าวมาทั้งหมดล้วนมีผลต่อการกระจายความหนาแน่นในถังและก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าฟังก์ชันการแบ่งแยก ซึ่งสนับสนุนทฤษฎีและการทดลองของ Zouliang Sha and Seppo Palosaari (2000) กล่าวคือ ผลึกที่มีขนาดต่างกันจะมีการกระจายความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ด้วย ผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า

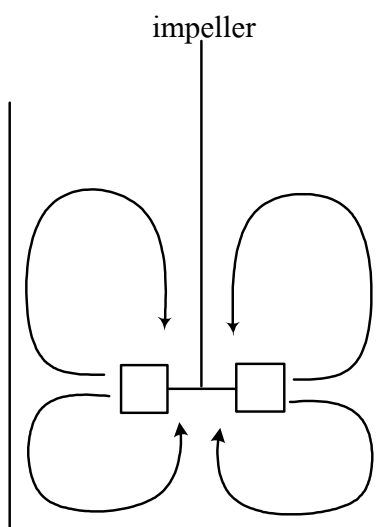
100 ไมครอน จะให้ค่าฟังก์ชันการแบ่งแยกที่คงที่ไม่ว่าจะใช้ความเร็วรอบของใบพัดเท่าใดก็ตาม นั่นหมายถึงการกระจายตัวในถังตกผลึกที่ค่อนข้างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ส่วนผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ค่าฟังก์ชันการแบ่งแยกจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ปั่น ที่ความเร็วรอบของใบพัดสูง จะให้การกระจายตัวของผลึกสม่ำเสมอกว่าส่วนที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกอีกด้วย เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการทดลองเปลี่ยนรูปร่างของถังผลึกในการจำลองพบว่า ค่าฟังก์ชันการแบ่งแยกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยเมื่อรูปร่างของถังผลึกเปลี่ยนแปลงไป การสร้างท่อหน้า (Draft tube) ลงไปในถังจะก่อให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลที่บริเวณปลายท่อ และการกระจายตัวของอนุภาคมีค่าต่ำที่บริเวณผนังท่อหน้าด้านนอก ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการเสียดตัวของการไหลบริเวณปลายท่อหน้า และก่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ผลึกที่มีขนาดโตจึงถูกเหวี่ยงออกไปที่บริเวณผนังของถังตกผลึกมากกว่า ทำให้ปริมาณของผลึกที่บริเวณใกล้ผนังท่อหน้าด้านนอกมีค่าต่ำ

ก่อนการจำลองการไหลในถังตกผลึกตามที่ได้กล่าวมา Sha, Palosaari, Oinas and Ogawa, (2001) ได้จำลองการไหลในถังปั่นสารซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับถังตกผลึกและได้ผลลัพธ์ซึ่งสนับสนุนกัน กล่าวคือรูปสรความเร็วทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีได้รับผลกระทบโดยตรงจากขนาดของอนุภาคที่อยู่ในถังผลึกและความเร็วรอบของใบพัดในถังปั่น และบริเวณที่มีเศษส่วนปริมาตรของอนุภาคต่ำอยู่ที่ส่วนบนของถังและใต้ใบพัด เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคที่เติมเข้าไปมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอนุภาคในถังลดลง นอกจากนี้พบว่าอนุภาคขนาด 700 ไมครอนขึ้นไปจะไม่ลอยตัวในถังปั่น แต่จะกองตัวอยู่บริเวณกลางก้นถังและมุมของก้นถัง ซึ่งเกิดจากผลกระทบของ Stagnation point และแรงหนีศูนย์กลาง ตามลำดับ บริเวณที่ไม่มีอนุภาคปะปนอยู่จะเห็นได้อย่างชัดเจนที่ส่วนบนของตัวถัง บริเวณใกล้ผนังด้านข้างของตัวถังก็จะมีเศษส่วนปริมาตรสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลางเช่นกัน และบริเวณที่มีเศษส่วนปริมาตรของอนุภาคสูงสุดมักจะอยู่ที่บริเวณเหนือใบพัด โดยตำแหน่งความสูงของบริเวณดังกล่าวจะต่ำลง เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคให้โตขึ้น อนึ่งความสามารถของโปรแกรมที่ใช้มีข้อจำกัด ขนาดของอนุภาคที่เติมลงไปกำหนดได้เพียงขนาดเดียวเท่านั้นสำหรับการคำนวณแต่ละครั้ง นอกจากนี้รูปร่างของอนุภาคต้องเป็นทรงกลมเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่แตกต่างไปจากที่ควรจะเป็น เพราะผลึกจริง ๆ ไม่ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังนั้นในระบบการตกผลึกในภาชนะเล็ก ๆ ซึ่งขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับถังตกผลึกที่ใช้ ผลการคำนวณที่ได้อาจมีค่าไม่แม่นยำ หากค่าที่ได้ต้องนำไปคำนวณหาค่าอื่น ๆ ต่อไปจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้

Brucato, Micale, Montante and Scuzzarella (2002) ได้ศึกษาความหนาของชั้นของของไหลที่ไม่มีอนุภาคปะปนอยู่ (clear liquid layer) บริเวณด้านบนของถังกวนโดยจำลองการไหล

ภายในถังกวนที่มีอนุภาคอยู่ภายใน ขนาดของอนุภาคที่ใช้มีขนาดเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง คือ ผลึกซิลิกาขนาด 212 – 250 ไมครอนที่ความเร็วรอบต่าง ๆ กัน โปรแกรมที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์ การไหล คือ CFX 4.4 เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ผลสนับสนุนกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เน้นที่ผลกระทบจากความเร็วยรอบของใบพัดเท่านั้น และผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าชั้นของไหลที่ไม่มีอนุภาคปะปนทางด้านบนของตัวถังจะมีความหนาเปลี่ยนไปเมื่อความเร็วรอบของใบพัดเปลี่ยนไป การเพิ่มความเร็วยรอบของใบพัดจะทำให้ความหนาของชั้นของไหลที่ไม่มีอนุภาคปะปนมีค่าน้อยลง และในทางกลับกัน การลดความเร็วรอบของใบพัดก็ทำให้ความหนามีค่าเพิ่มขึ้น ชั้นของไหลที่ไม่มีอนุภาคปะปนที่แยกตัวอย่างชัดเจนกับส่วนที่มีอนุภาคปะปนอยู่เป็นจำนวนมากนั้น หากเกิดขึ้นภายในถังตกผลึกจะก่อให้เกิดความไม่เป็นเอกรูปของความอึดตัวของเนื้อของไหลหลัก และมีผลต่อการเติบโตของเม็ดผลึก บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ไม่มีการตกผลึกหรือมีการตกผลึกน้อย เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่จะลงไปอยู่ที่ด้านล่างและ โดด้านล่างทำให้ความเข้มข้นของบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าบริเวณด้านล่างซึ่งมีผลึกหนาแน่น

Lamberto, Alvarez and Muzzio (1999) ได้ศึกษาการไหลในย่านความเร็วต่ำในถังกวน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลภายในถังกวนที่ใช้ใบพัดปั่นของไหลในแนวรัศมี เพื่อพิจารณาผลกระทบของขนาดของใบพัดและระยะความสูงจากก้นถังของใบพัด การทดลองนั้นใช้เทคนิค Particle Imaging Velocimetry (PIV) เพื่อหาความเร็วของของไหลโดยใช้สารละลาย Glycerine ซึ่งเติมผง Silver-Coated Hollow Glass Beads ขนาด 10 ไมครอนลงไปให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ขนาดของอนุภาคที่เติมลงไปนั้นถือว่าขนาดเล็กพอที่จะไหลตามการไหลได้ โดยอนุภาคไม่มีผลที่จะทำให้การไหลมีรูปแบบที่เปลี่ยนไป หรือกล่าวได้ว่าอนุภาคนั้นไม่รบกวนการไหล ผลการทดลองนี้สนับสนุนผลที่ได้จากการจำลองอีกด้วย นั่นคือรูปแบบการไหลภายในถังถูกแบ่งออกเป็นสองวงรอบโดยอยู่เหนือใบพัดหนึ่งวงรอบและอีกหนึ่งวงรอบอยู่ใต้ใบพัดดังรูป 2.19 ขนาดและตำแหน่งของวงรอบการไหลจะสัมพันธ์กับค่าเลขเรโนลด์ (Raynolds number) และตำแหน่งของการวางใบพัด (สำหรับในงานวิจัยนี้พิจารณาค่าเลขเรโนลด์ ในช่วง 50-100)



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเกิดวงรอบของการไหลภายในถังกวน

Montante, Lee, Brucato and Yannesis (2001) ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการวางใบพัดแบบ Rushton Radial Turbine ในถังกวนซึ่งงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Lamberto et al, (1999) กล่าวคือ เป็นการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีทดลอง ซึ่งในการทดลองของ Montante et al, ได้นำเทคนิค Laser Doppler Anemometry (LDA) มาใช้และทำการจำลองภายในถังผลึกโดยพิจารณาการไหลแบบเฟสเดียวเท่านั้น และพิจารณารูปแบบการไหลจากรูปสรความเร็วภายในถัง จากผลการทดลองและผลการจำลองการไหลที่ได้พบว่ามีผลที่สนับสนุนกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ตำแหน่งความสูงของใบพัดจากก้นถังถึงความสูงของของไหลเป็น 0.15 เท่านั้นเป็นตำแหน่งที่รูปแบบการไหลเริ่มแบ่งตัวออกเป็นสองวงรอบของการไหลวน หากวางตำแหน่งใบพัดที่ตำแหน่งต่ำกว่านี้ รูปแบบการไหลจะมีเพียงวงรอบเดียวซึ่งจะทำให้มีความเป็นเอกรูปภายในตัวถังมากขึ้น ทั้งนี้การวิเคราะห์เพิ่มเติมหาตัวแปรไร้มิติที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดวงรอบที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการขยายผลงานวิจัยและประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

Liiri, Koironen and Aittamaa (2002) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดที่โตที่สุดของผลึกที่แตกหักเสียหายเนื่องจากการกระทบกับใบพัดและกระทบกับตัวถัง โดยปรับปรุงมาจากแบบจำลองที่ Gahn and Mersmann (1999) ได้เสนอไว้ ซึ่งแบบจำลองแบบเก่าได้นำความเร็วเฉลี่ยภายในถังมาใช้ในการคำนวณ และไม่คิดความเร็วในแนวสัมผัสที่ผลึกกระทบกับใบพัด แต่แบบจำลองใหม่ของ Liiri และคณะ ได้นำความเร็วที่ตำแหน่งนั้น ๆ มาคิดแทนการใช้ความเร็วเฉลี่ยของการไหลตลอดถัง และยังได้นำความเร็วในแนวสัมผัสใบพัดมาพิจารณา

ประกอบด้วย โดยค่าตัวแปรเฉพาะจุดที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้มาจากการจำลองการไหลภายในถังตกผลึก ผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Kee and Rielly (2000) ซึ่งพบว่าการกระทบกันระหว่างผลึกกับใบพัดเป็นสาเหตุหลักของการแตกหักเสียหายของผลึกซึ่งทำให้เกิด Secondary nucleation การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของผลึกซึ่งผลสืบเนื่องของปัญหาดังกล่าวคือการควบคุมกระบวนการตกผลึกให้ได้ผลึกที่มีขนาดตามช่วงที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ด้วยความลำบากมากขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเปลี่ยนวิกฤติให้เป็นโอกาสอาจสามารถใช้แนวคิดนี้ในการจะทำให้ผลึกที่มีขนาดใหญ่จนเกินไปแตกหักลงได้

Ginter and Loyalka (1995) ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของผลึกซึ่งขึ้นอยู่กับ การกระจายของขนาดของผลึกและพบว่าลักษณะของผลึกที่มีขนาดแตกต่างกันจะทำให้การเจริญเติบโตของผลึกซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดนั้นมีความแตกต่างกันออกไป

Kramer, Bijkstra, Verheijen and Van Rosmalen (2000) ได้ใช้เทคนิค CFD ในการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกเพื่อแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลภายในถังผลึกที่ใช้กันในอุตสาหกรรมไม่มีความเป็นเอกรูป ซึ่งชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สมมุติฐาน MSMPR นั้นไม่สามารถนำมาวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ภายในถังตกผลึกได้ โดยเสนอว่าการวิเคราะห์ต่าง ๆ ควรจะใช้ตัวแปรที่ตำแหน่งนั้น ๆ ในการคำนวณซึ่งจะทำให้ได้ค่าที่สมเหตุสมผลมากกว่า

Liu, Andreasen and Laroche (2000) ได้ทำการวิเคราะห์การผสมกวนที่ใช้ใบพัดสำหรับปั่นสารในแนวรัศมี โดยพิจารณาการไหลในย่านความเร็วต่ำซึ่งพบได้ทั่วไปในการกวนสารจำพวกสารอินทรีย์หรือโพลีเมอร์ซึ่งมีความหนืดสูง การวิเคราะห์ดังกล่าวจะใช้ข้อมูลจากการจำลองการไหลภายในถังกวน การจำลองนี้จะมีการปล่อยอนุภาคจำนวนมาก ซึ่งในสถานะเริ่มต้นกำหนดให้รวมตัวกันเป็นรูปทรงกลมและปล่อยเข้าสู่ระบบการไหลที่ตำแหน่งแตกต่างกันไป โดยทำการจำลองการปล่อยหมึกลงในถังกวนซึ่งได้ทำการทดลองจริงในห้องทดลองมาก่อนหน้านี้ โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหล คือ Fluent โดยใช้วิธีการพิจารณาแบบลากรองเจียน (Lagrangian approach) ผลการจำลองแสดงให้เห็นแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็ก ๆ ในถังกวนนั้น อย่างไรก็ตาม การติดตามคูการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นสามารถติดตามได้จากเส้นแนวการไหลของระบบนั้น ๆ ที่สถานะคงตัว

Rigby, Lane and Evans (2000) ได้ใช้เทคนิค CFD ในการจำลองการไหลภายในถังกวนสารเพื่อศึกษารูปแบบการไหลในบริเวณที่ใบพัดกวาดผ่านไปภายในถังกวนตลอดจนรูปแบบการไหลบริเวณใกล้ผิวของใบพัดว่ามีรูปแบบเช่นไร การจำลองนี้ใช้ใบพัดสำหรับปั่นสารในแนวรัศมี

และผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเก็บข้อมูลในช่วงบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดตลอดจนบริเวณที่เกิดการหมุนวนของการไหลซึ่งแบ่งออกเป็นสองวงรอบภายในตัวถัง

Nasr-Et Din and Mac Taggart (1996) ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเข้มข้นของอนุภาคภายในของไหลหลัก โดยใช้เทคนิคการดูดตัวอย่างออกมาวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน จากงานวิจัยนี้พบว่า ความหนาแน่นของอนุภาคสัมพันธ์กับตำแหน่งที่ดูดตัวอย่างออกมาวัด ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคดังกล่าวยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย และปริมาณของอนุภาคอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังพบด้วยว่าการใช้ท่อดูดออกที่มีลักษณะของท่อแตกต่างกันจะให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันออกไปอีกทั้งยังพบว่าค่าที่วัดได้นั้น ขึ้นกับความเร็วที่ใช้ในการดูดสารออก การวัดค่าดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนไปเมื่อลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้และความเร็วที่ใช้ในการดูดสารเปลี่ยนไป สังเกตได้ว่าในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่าตัวอย่างของไหลในถังที่ถูกดูดออกมาจะมีความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับความหนาแน่นของอนุภาคภายในถัง ณ เวลาที่ทำการวัดนั้น ๆ อย่างไรก็ตามสารละลายที่ถูกดูดออกมานั้นค่าที่วัดได้อาจจะไม่ได้มีความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับความหนาแน่นของอนุภาคภายในถังผลึกในบริเวณที่ถูกดูดออกจริงก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าการดูดออกนั้นเป็นการดูดออกแบบ Isokinetic หรือไม่

Gros, Kilpio and Nurmi (2001) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการเจริญเติบโตอย่างช้า ๆ ของผลึกภายในถังตกผลึกซึ่งตกผลึกจากสารที่มีความหนืดสูงแบบไหลต่อเนื่อง แบบจำลองดังกล่าวอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว ไม่มีการก่อก้อนของนิวเคลียสใหม่ ไม่มีการแตกหักเสียหายของผลึกตลอดจนการเจริญเติบโตของผลึกจะขึ้นอยู่กับขนาด และสมมติให้มีการตกตะกอนของผลึก แบบจำลองที่ได้ถูกนำมาจำลองกับระบบการตกผลึกของสารละลายน้ำตาลซูโครสและผลการจำลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ผู้วิจัยคาดหวังว่าแบบจำลองนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับระบบอื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกัน

สรุปภาพโดยรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.

2.7 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของน้ำตาล สารละลายน้ำตาล การตกผลึกของสารละลายน้ำตาลในถังตกผลึก การดูดผลึกออกจากถังตกผลึก อุปกรณ์สำหรับอุตสาหกรรมการตกผลึกน้ำตาล ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อศึกษาถึงพัฒนาการของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งในส่วนของกระบวนการตกผลึก การทดลองเกี่ยวกับการไหลในถังกวนและการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองของระบบการตกผลึกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป

เห็นได้ชัดว่างานวิจัยที่ได้ทำมาในอดีตยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยในประเด็นของการดูแล
ออกแบบ ไอโซโคเนติกส์ ซึ่งเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

การตกผลึกจากสารละลายแบบทำความเย็นเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอื่น อัตราการไหลของของไหลเข้าสู่ถังผลึกจะมีค่าต่ำมากและมีอุณหภูมิแตกต่างจากสารละลายในถังไม่มากนัก โดยส่วนใหญ่ไม่เกิน 2°C (Mersmann, 1995) จึงประมาณได้ว่ากระบวนการตกผลึกดังกล่าวเป็นกระบวนการตกผลึกที่อุณหภูมิกึ่งที่ ดังนั้นกลไกหลักที่ควบคุมการตกผลึกประเภทนี้จึงเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลเท่านั้น การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดของผลึกจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบจากอุณหภูมิ ด้วยคุณลักษณะดังกล่าว การตกผลึกโดยการทำความเย็นนี้จึงเป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้กับการตกผลึกประเภทอื่น ๆ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตกผลึกแบบทำความเย็นโดยการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่การทดสอบโปรแกรม คุณสมบัติของสารละลายที่จะใช้ ลักษณะและการทำงานของถังตกผลึกตลอดจนการสร้างแบบจำลอง การสร้างเมช การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ การกำหนดค่าเริ่มต้นของถังตกผลึกและการคำนวณหาคำตอบดังนี้

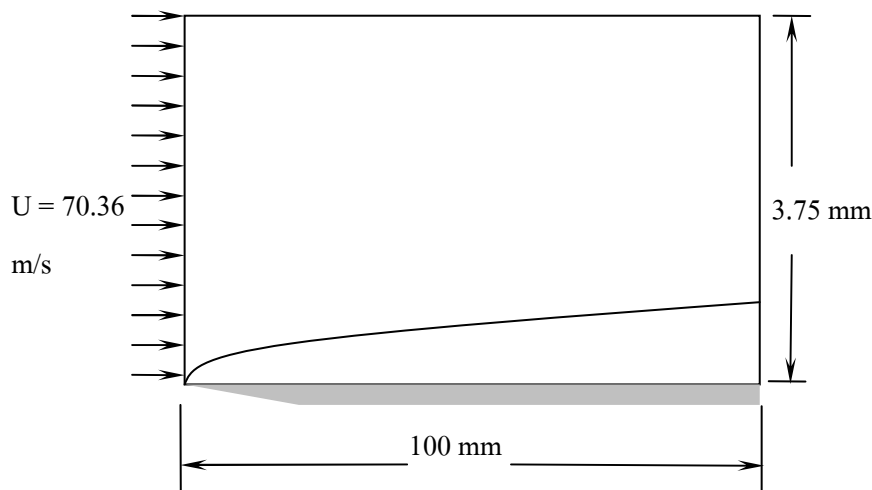
3.1 การทดสอบโปรแกรม

ความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของโปรแกรมที่นำมาใช้จำลองผลระบบพลวัตเป็นปัจจัยที่สำคัญ และต้องทำการทดสอบความถูกต้อง ความละเอียด และความแม่นยำของผลการจำลองที่ได้ อย่างละเอียดก่อนที่จะนำมาใช้งาน นอกจากนี้ผู้ใช้โปรแกรมเองก็ต้องได้รับการฝึกฝนทดสอบการใช้โปรแกรมให้ถูกต้องไปด้วยพร้อม ๆ กัน การจำลองการไหลในถังตกผลึกโดยใช้โปรแกรม CFX ในงานวิจัยนี้ก็ต้องได้รับการทดสอบเช่นเดียวกัน ซึ่งการทดสอบโปรแกรมดำเนินการโดยการจำลองการไหลมาตรฐาน

3.1.1 การไหลในชั้นผิวบางในย่านความเร็วต่ำ

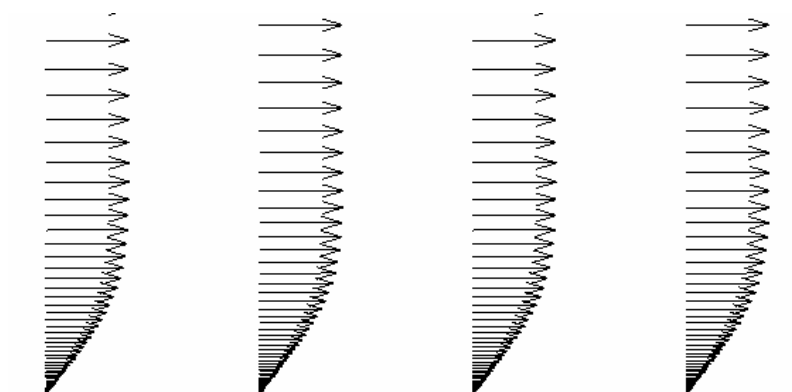
การไหลนี้เป็นการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ ซึ่งมีคำตอบทางทฤษฎีที่เรียกว่าคำตอบของบลาลาเซียส (Blasius solution) (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และ สุวรรณ อัทธามศร, 2542) สำหรับการเปรียบเทียบ โดยทั่วไปพิจารณาการไหลเป็นแบบสองมิติ แต่สำหรับโปรแกรม CFX ที่ใช้ในการจำลองมีข้อจำกัดคือจะต้องกำหนดขอบเขตของโดเมนเป็นสามมิติเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ด้วย

การกำหนดความหนาของเมฆในแนวแกนที่ 3 (แกน x) ให้มีความหนาเพียง 1 เมฆ ซึ่งถือว่าน้อยกว่าความหนาของ เมฆในแนวแกนที่เหลื่อมมาก ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับการจำลองผลในสองมิติ ลักษณะของโดเมนที่จะทำการจำลองเป็นดังรูปที่ 3.1



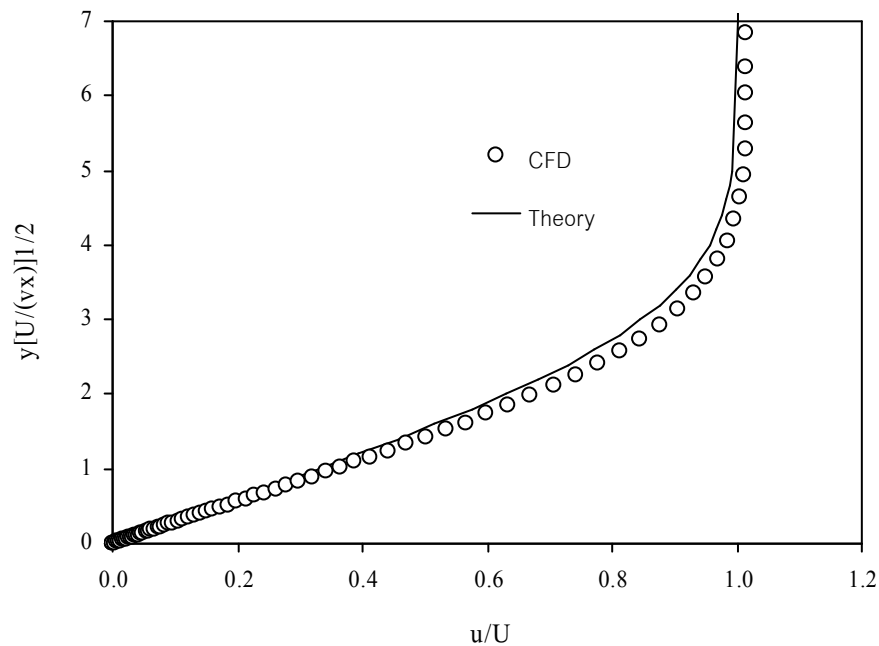
รูปที่ 3.1 แผนภาพแผ่นเรียบ

ในการคำนวณกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศมีความหนาแน่น 1.018 kg/m^3 และความหนืด $2.06 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ไหลผ่านแผ่นเรียบยาว 100 mm โดยมีความเร็วตรงทางเข้าเป็นความเร็วค่าเดียว (Uniform flow) มีค่าเป็น 70.36 m/s มีความดันเท่ากับ 101325 Pa (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้ โดยละเอียดในภาคผนวก ก.1)



รูปที่ 3.2 รูปสรความเร็วบางส่วน ที่ระยะ x ต่าง ๆ ของการไหลของชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ

จากผลการจำลองในรูปที่ 3.2 สังเกตได้ว่ารูปสรความเร็วที่ระยะ x ต่าง ๆ มีค่าน้อยเมื่ออยู่ใกล้แผ่นเรียบ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าคงที่ในที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้ในทางทฤษฎี รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CFX ในรูปของตัวแปรไร้มิติ



รูปที่ 3.3 ความเร็วจากการจำลองผลด้วย โปรแกรม CFX เปรียบเทียบกับคำตอบของบลานเซียส

ทั้งนี้การจำลองการไหลในโดเมนเดียวกันแต่ใช้เมชที่หยาบกว่า คือ 50 เมชทั้งในแนวแกน x และแกน y ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีน้อยกว่าที่ 100 เมชทั้งในแกน x และแกน y ซึ่งชี้ให้เห็นว่า หากทำการจำลองโดยใช้เมชที่ละเอียดมากขึ้นจะได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบของบลานเซียสมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการปรับเมชให้ละเอียดมากขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นไปด้วย

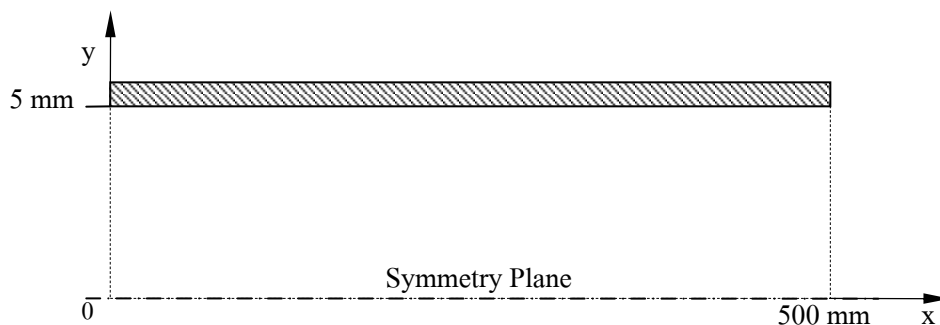
3.1.2 การไหลผ่านแผ่นขนานแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

การไหลนี้เป็นกรไหลแบบความเร็วขนาน ผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการไหลประเภทนี้สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการนาเวียร์-สโตกโดยตรงซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ 3.1 (White, 1994)

$$u = -\frac{dP}{dx} \frac{h^2}{2\mu} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) \quad (3.1)$$

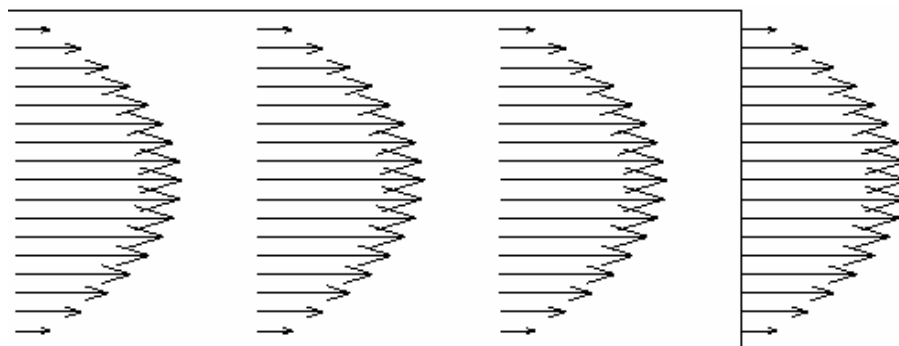
เมื่อ h คือ กิ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างผนังท่อ

เนื่องจากระบบที่จะทำการจำลองมีลักษณะสมมาตรทำให้สามารถจำลองระบบโดยใช้การกำหนดโดเมนเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น ของไหลที่ไหลภายในระบบ คือ อากาศที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 20°C การคำนวณกำหนดให้เป็นการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานที่มีความยาวทั้งหมด 500 mm มีระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานเป็น 10 mm ความแตกต่างของความดันสถิตที่ปากทางเข้าและที่ปากทางออกของโดเมนเป็น 0.162 Pa ทั้งนี้การกำหนดโดเมนในโปรแกรม CFX กำหนดให้มีความหนาในแนวแกน z เท่ากับหนึ่งเมฆ (2 mm) โดยลักษณะของแผ่นคู่ขนานดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ก.2)

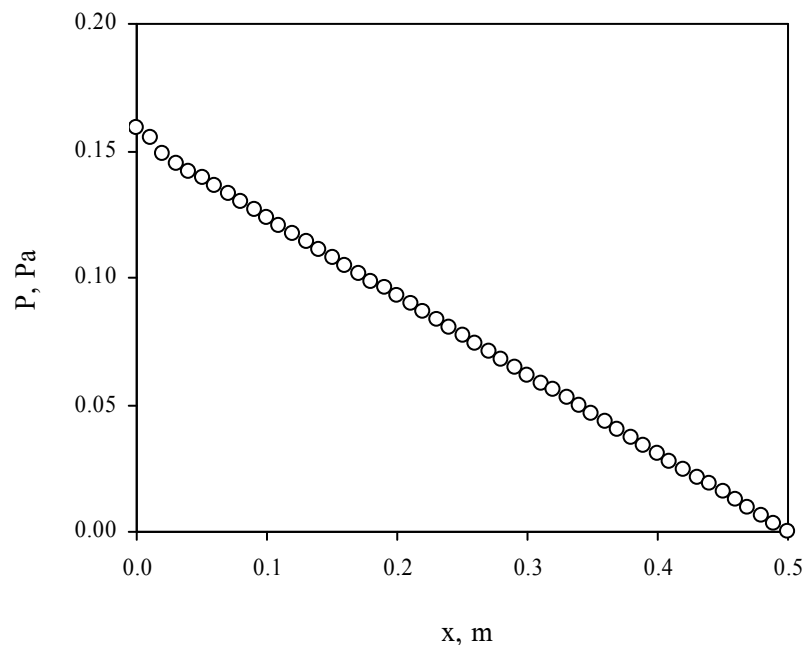


รูปที่ 3.4 แผนภาพแผ่นคู่ขนาน

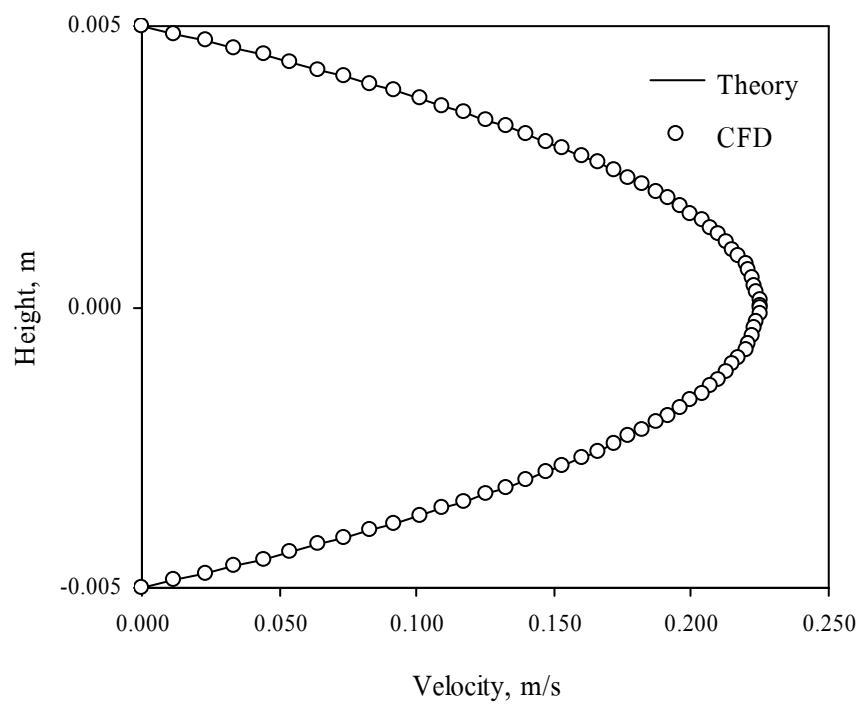
จากการจำลอง ของรูปสรความเร็วที่ระยะ $x = 500 \text{ mm}$ มีลักษณะการกระจายตัวเป็นรูปพาราโบลาดังแสดงในรูปที่ 3.5 นอกจากนี้พบว่าความดันมีค่าสูงที่ปากท่อทางเข้า หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะ $x = 500 \text{ mm}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 รูปสรความเร็วที่บริเวณปลายท่อ



รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวของท่อ



รูปที่ 3.7 ความเร็วของการไหลที่ความสูงต่าง ๆ เทียบกับค่าค่าจากทางทฤษฎี

ความเร็วที่ได้จากการจำลองดังกล่าวเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ถือว่าให้ผลที่ดีมาก ค่าความเร็วที่ระยะความสูงต่าง ๆ เทียบกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 3.7

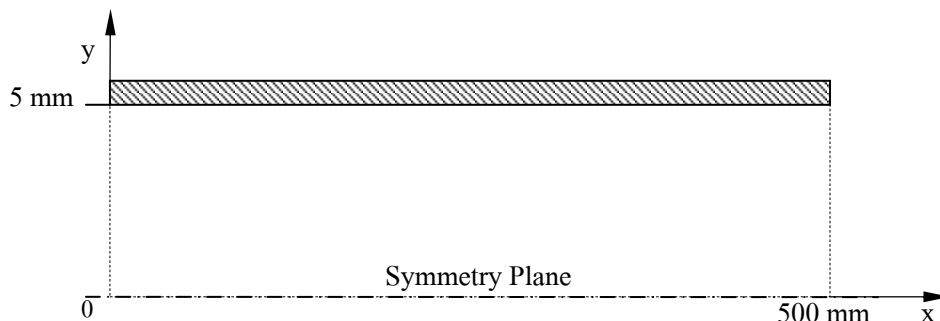
3.1.3 การไหลในท่อแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

การไหลนี้เป็นการไหลแบบความเร็วขนานในท่อกลม ซึ่งสามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้โดยการอินทิเกรตสมการนาเวียร์-สโตกโดยตรงเช่นเดียวกับปัญหาการไหลผ่านแผ่นขนานภายใต้แรงดัน ซึ่งจะได้คำตอบดังนี้ (White (1994))

$$u = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (R^2 - r^2) \quad (3.2)$$

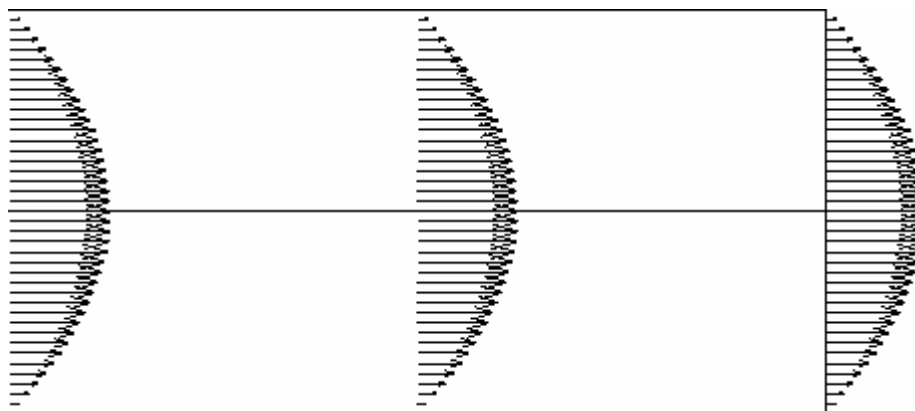
เมื่อ R คือรัศมีของท่อและ r คือระยะจากจุดศูนย์กลาง

การคำนวณนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานทุกประการ ยกเว้นการกำหนดให้ท่อเป็นท่อกลม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 5 mm ความแตกต่างของความดันสถิตที่ขาเข้าและที่ขาออกถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันคือ 0.162 Pa ลักษณะของปัญหาและรายละเอียดท่อเป็นดังรูปที่ 3.8 (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ก.3)

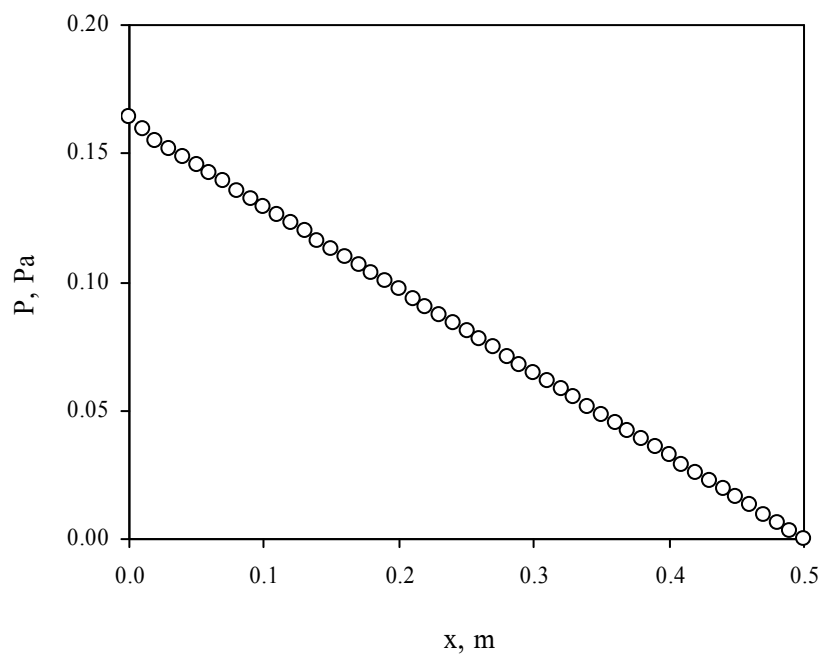


รูปที่ 3.8 แผนภาพท่อสำหรับปัญหาการไหลในท่อภายใต้ความดัน

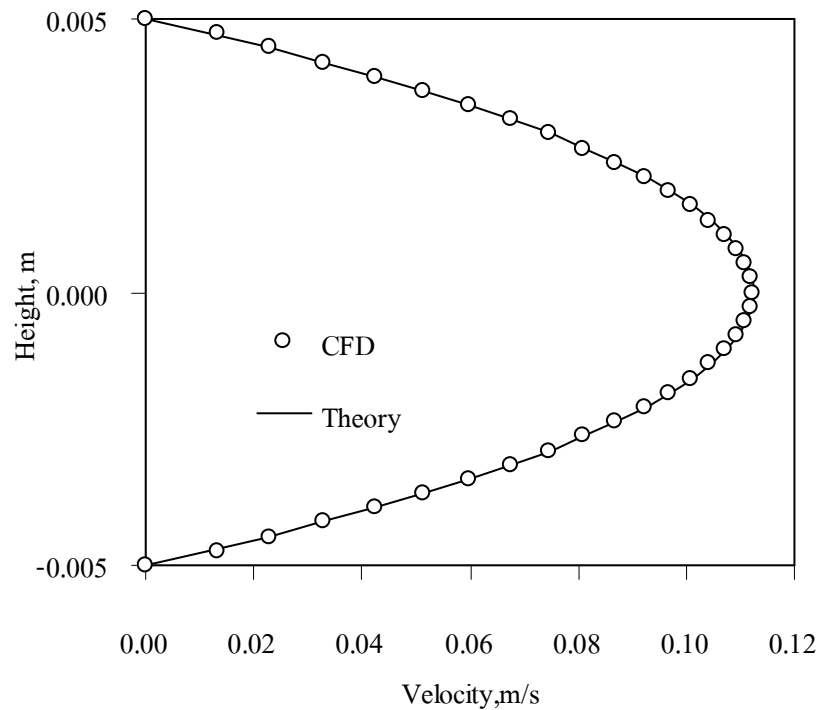
ผลการคำนวณปรากฏว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีเป็นอย่างดี โดยความเร็วมีลักษณะดังภาพที่ 3.9 ภาพที่ 3.10 แสดงการกระจายตัวของความดันภายในระบบ และภาพที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับความเร็วที่ได้จากทางทฤษฎี



รูปที่ 3.9 รูปสรความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ



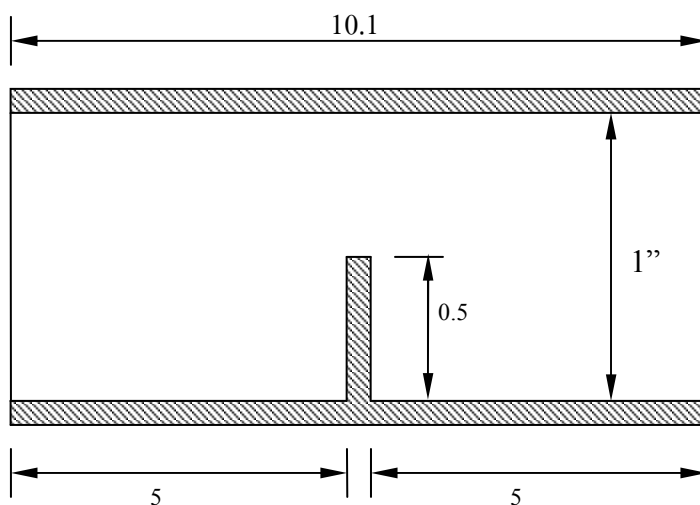
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของความดันความดันตลอดความยาวท่อ



รูปที่ 3.11 ความเร็วของการไหลเปรียบเทียบกับความเร็วทฤษฎี

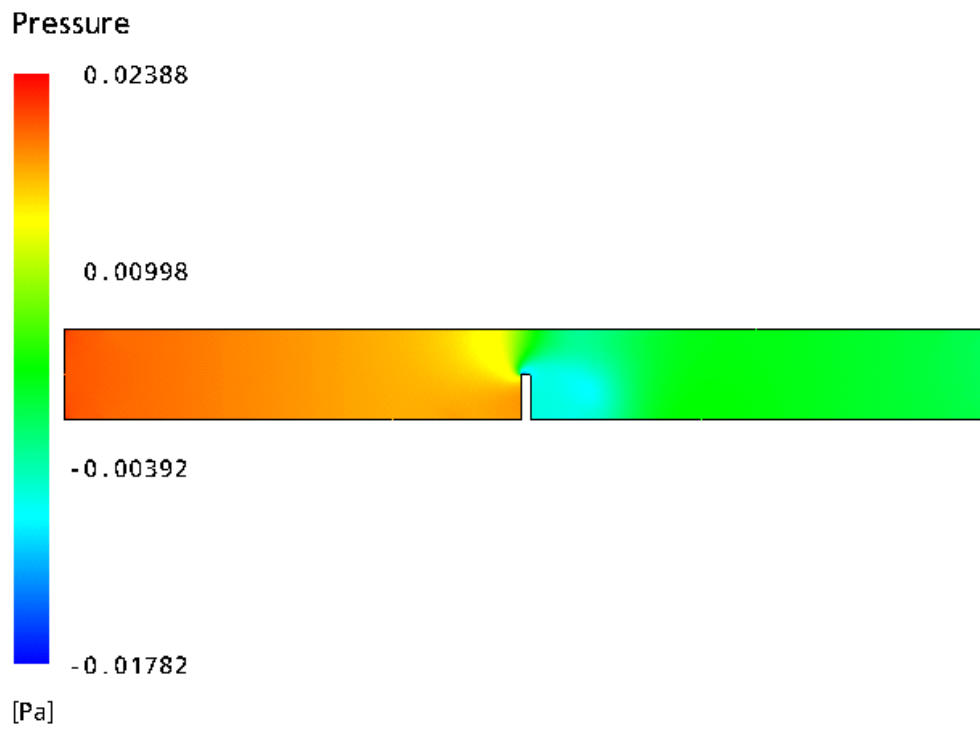
3.1.4 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบไม่อัดตัวที่สถานะคงตัว

การไหลนี้มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.12 ความยาวของท่อโดยรวมเป็น 5.1 นิ้ว ความสูงของท่อเป็น 1 นิ้ว และมีสิ่งกีดขวางตั้งอยู่ในตำแหน่งตรงกลาง ห่างจากปลายท่อและปากท่อในระยะที่เท่ากันคือ 5 นิ้ว สิ่งกีดขวางดังกล่าวมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงทั้งหมดของท่อคือ 0.5 นิ้ว โดยของไหลที่ไหลภายในท่อที่มีสิ่งกีดขวางดังกล่าวคืออากาศที่ความดัน 1 atm และอุณหภูมิ 20 °C การจำลองการไหลจะเป็นสามมิติซึ่งมีขนาดความหนาของเมชเพียงเมชเดียวในแนวแกน z เช่นเดียวกับการไหลที่ได้กล่าวมาข้างต้น (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ก.4)

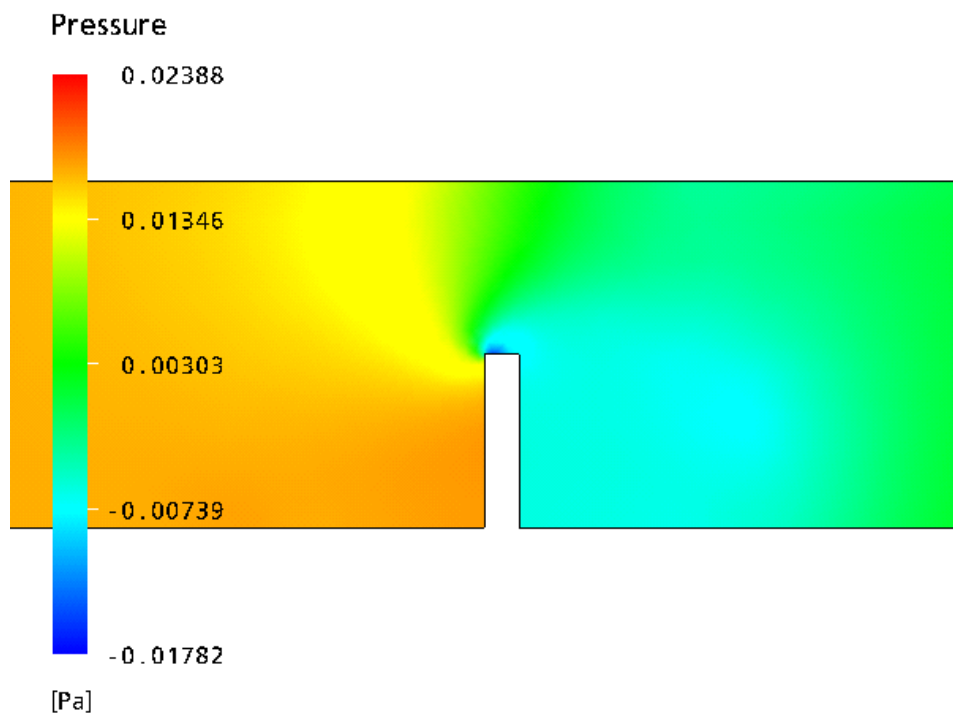


รูปที่ 3.12 แผนภาพท่อที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ภายใน

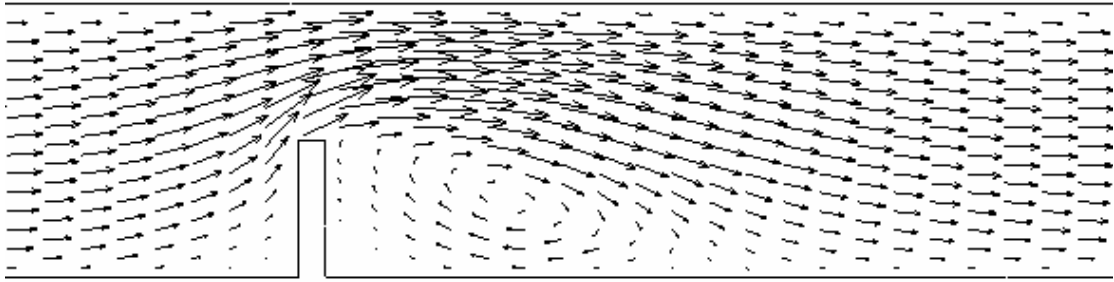
ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความดันภายในท่อมักมีค่าสูงที่ตำแหน่งปากท่อ ความดันบริเวณใกล้เคียงกับสิ่งกีดขวางมีความเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะบริเวณหลังสิ่งกีดขวางจะเห็นว่าความดันลดลงต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ และความดันต่ำสุดอยู่ที่บริเวณมุมยอดของสิ่งกีดขวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปสรความเร็วและจากเส้นแนวการไหล พบว่าเกิดการหมุนวนบริเวณหลังสิ่งกีดขวาง และความเร็วบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่นอย่างชัดเจน รูปสรความเร็วและเส้นแนวการไหลแสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ



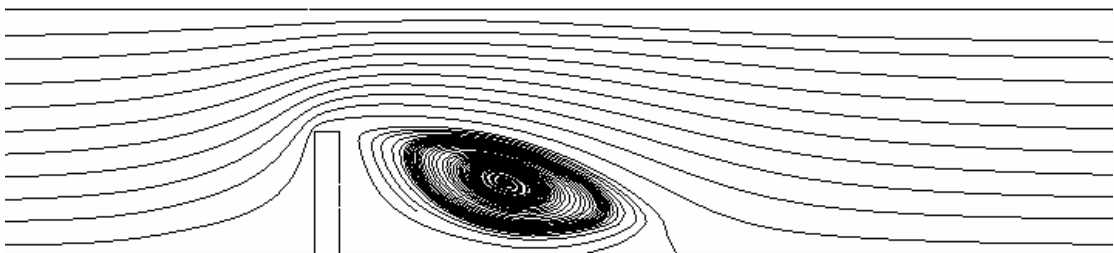
รูปที่ 3.13 ความดันตลอดแนวความยาวของท่อที่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.14 ความดันบริเวณใกล้สิ่งกีดขวาง



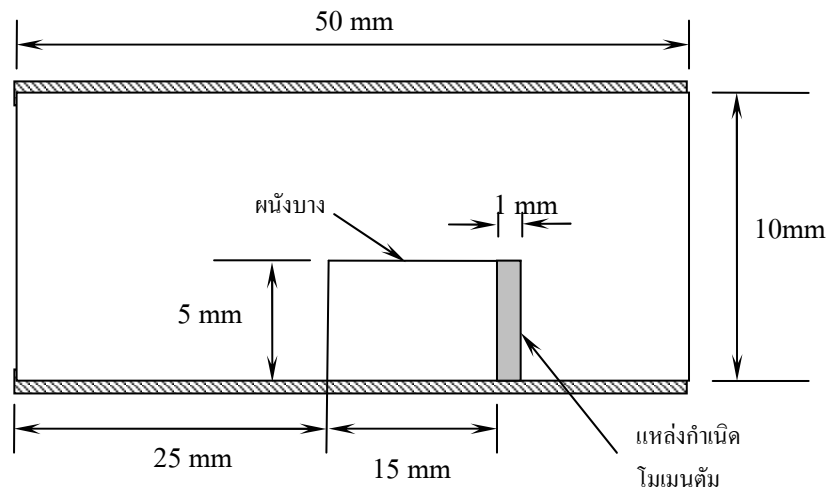
รูปที่ 3.15 รูปสรความเร็วภายในท่อที่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.16 เส้นแนวการไหลภายในท่อที่มีสิ่งกีดขวาง

3.1.5 การไหลผ่านแผ่นขนานเนื่องจากแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน

การไหลนี้เป็นการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมซึ่งมีความลึกไม่จำกัด ภายในท่อติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ซึ่งกำหนดให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน x มีค่าเป็น $10000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ แหล่งกำเนิดโมเมนตัมจะทำหน้าที่ดูดของไหลจากภายนอกให้ไหลผ่านเข้ามาในท่อซึ่งวางอยู่ในความดันบรรยากาศ ลักษณะของ โดเมนเป็นดังรูปที่ 3.17 (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ก.5)

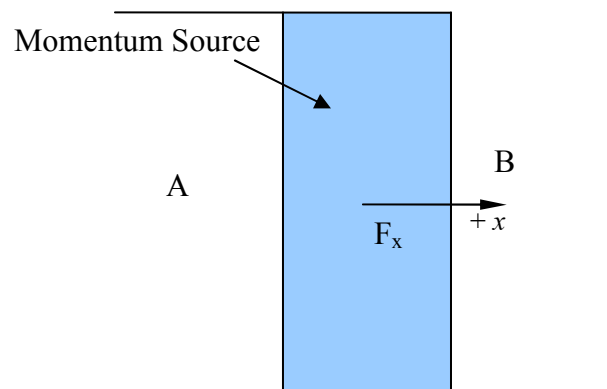


รูปที่ 3.17 แผนภาพท่อที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

การให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมก็คือการให้แรง ซึ่งโปรแกรม CFX จะกำหนดค่าดังกล่าวเข้าไปในสมการโมเมนตัมตามทิศที่ระบุโดยผู้ใช้ เช่นเมื่อผู้ใช้กำหนดค่า โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดเป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรดังสมการ

$$S_{mx} = \frac{F_{net,x}}{\nabla} \quad (\text{kg/m}^2/\text{s}^2) \quad (3.3)$$

แรงสัมพันธ์กับความดันคือ $F = PA$ ดังนั้นการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมจึงเปรียบเสมือนการให้ความดันโดยอ้อม ลักษณะการกำหนดค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมสามารถกำหนดได้ทั้งสามทิศทาง

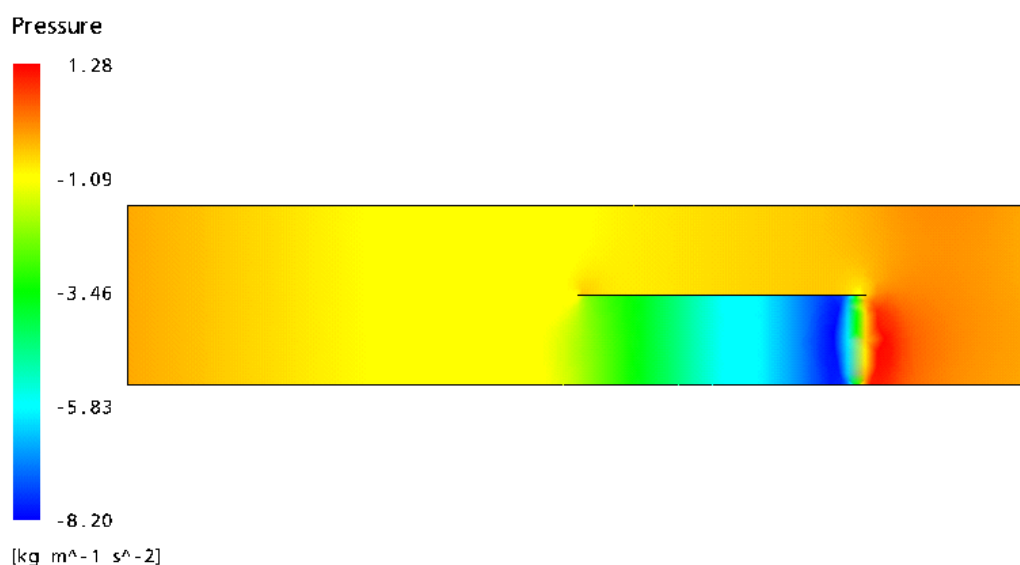


รูปที่ 3.18 แผนภาพลักษณะการกำหนดทิศทางของโมเมนตัมภายในโดเมน

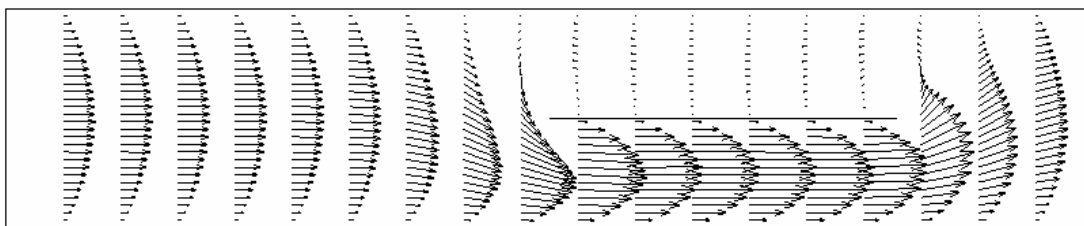
การเปลี่ยนแปลงความดันสามารถจะคาดการณ์ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.18 แหล่งกำเนิดโมเมนตัมถูกกำหนดให้กระทำในทิศ $+x$ ดังนั้นของไหลบริเวณ B จะได้รับแรงกดซึ่งทำให้ของไหลบริเวณดังกล่าวมีความดันสูงขึ้น ในขณะที่ของไหลบริเวณ A จะได้รับแรงดึง ซึ่งส่งผลให้ความดันความดันบริเวณดังกล่าวมีค่าลดต่ำลง ของไหลในบริเวณ B จึงควรจะมีความดันสูงกว่าความดันของของไหลในบริเวณ A ทั้งนี้เมื่อตรวจสอบค่าการกระจายของความดันภายในระบบที่ได้จากการจำลอง พบว่ามีความสอดคล้องกับลักษณะที่ได้คาดการณ์ไว้ รูปที่ 3.19 แสดงการกระจายของความดันภายในโดเมน ค่าความดันสูงสุดและต่ำสุดภายในโดเมนมีค่า 1.28 และ -8.20 ตามลำดับ นอกจากนี้หากพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงที่หน้าตัดใด ๆ กับความเร็วจะได้ว่าแรงสัมพันธ์กับความเร็วตามสมการ 3.4

$$F_x = \rho Au^2 \quad (3.4)$$

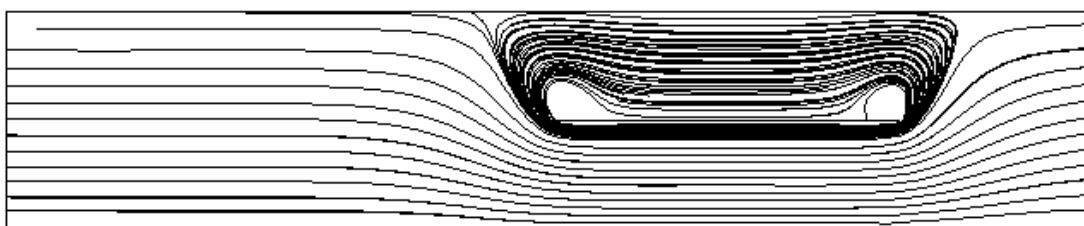
จากสมการจะเห็นว่าทำให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว สำหรับการไหลกรณีนี้ แหล่งกำเนิดโมเมนตัมถูกติดตั้งในระบบซึ่งเริ่มต้นไม่มีความเร็ว กล่าวคือท่อถูกวางในแนวระนาบ และเปิดปลายออกสู่บรรยากาศทั้งสองข้างก่อนการติดตั้ง ดังนั้นในตอนเริ่มต้นจึงไม่มีการไหลเกิดขึ้นภายในระบบ หลังจากติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัม พิจารณาผลจากการจำลอง จะเห็นว่าการไหลเกิดขึ้นภายในระบบ โดยลักษณะของรูปสรความเร็วและเส้นแนวการไหลภายในโดเมน แสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3.19 การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวท่อ



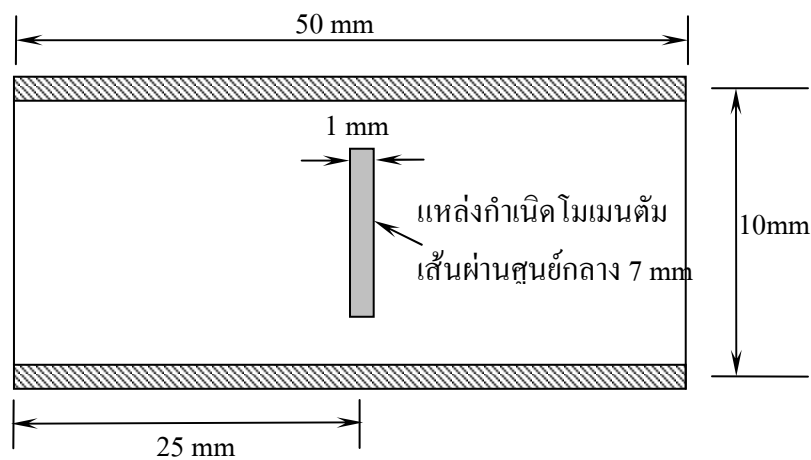
รูปที่ 3.20 รูปสรความเร็วภายในท่อ



รูปที่ 3.21 เส้นแนวการไหลภายในท่อ

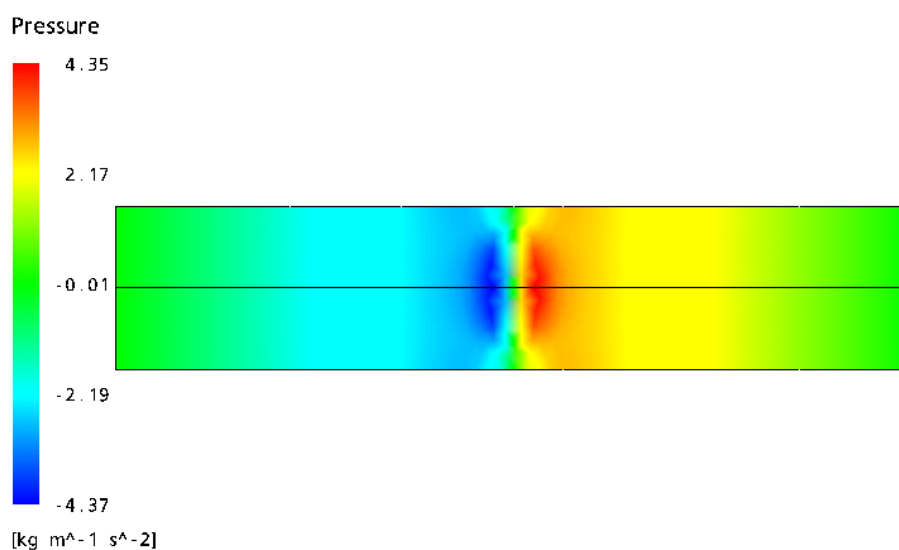
3.1.6 การไหลในท่อเนื่องจากการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกนและแนวรัศมี

การไหลนี้เป็นการไหลภายในท่อกลม ภายในท่อติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ซึ่งให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน x เป็น $10000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ แหล่งกำเนิดโมเมนตัมจะทำหน้าที่ดูดของไหลจากภายนอกให้ไหลผ่านเข้ามาในท่อซึ่งวางอยู่ในความดันบรรยากาศ ลักษณะของโดเมนเป็นดังรูปที่ 3.22 (รายละเอียดการจำลองแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ก.6)

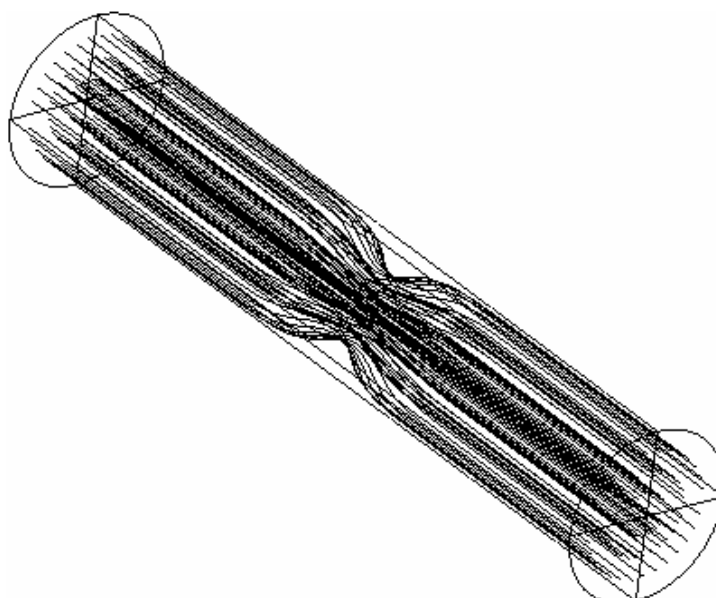


รูปที่ 3.22 แผนภาพท่อกลมที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายใน

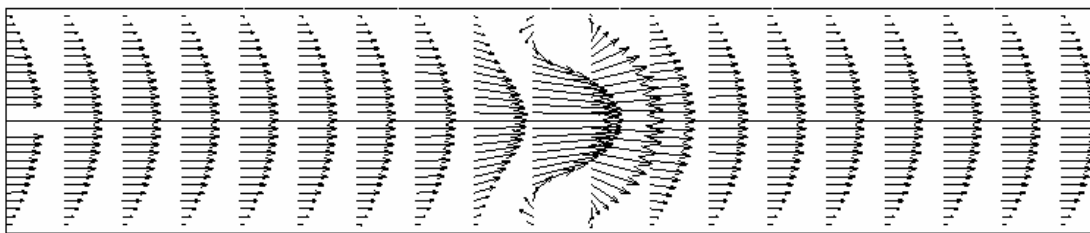
ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมเป็นไปตามรูปที่ 3.23 -3.25 ซึ่งจะเห็นว่าในบริเวณที่ของไหลภายในท่อถูกดูด เส้นแนวการไหลมีแนวโน้มวิ่งเข้าสู่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม โดยความดันก่อนถึงแหล่งกำเนิดโมเมนตัมและหลังแหล่งกำเนิดโมเมนตัมมีความสมเหตุสมผล กล่าวคือในบริเวณที่ถูกดูดจะมีค่าความดันต่ำ และบริเวณหลังแหล่งกำเนิดโมเมนตัมซึ่งได้รับแรงผลักจะมีความดันที่สูงขึ้น



รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของความดันตลอดความยาวท่อ

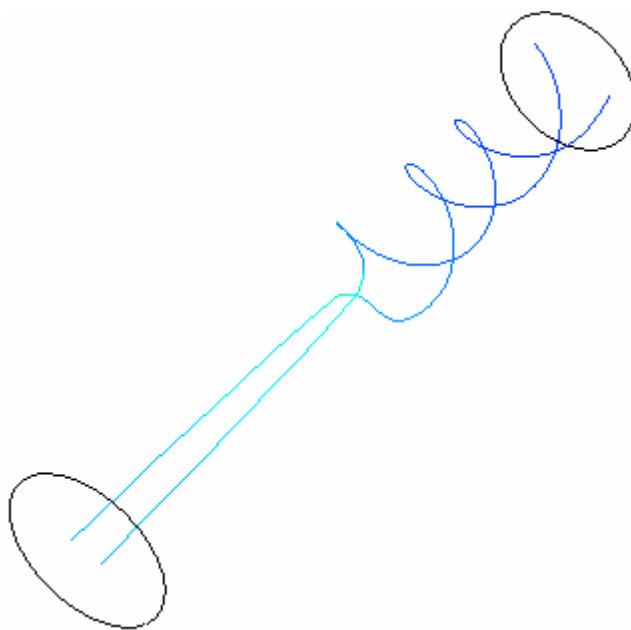


รูปที่ 3.24 เส้นแนวการไหลภายในท่อ

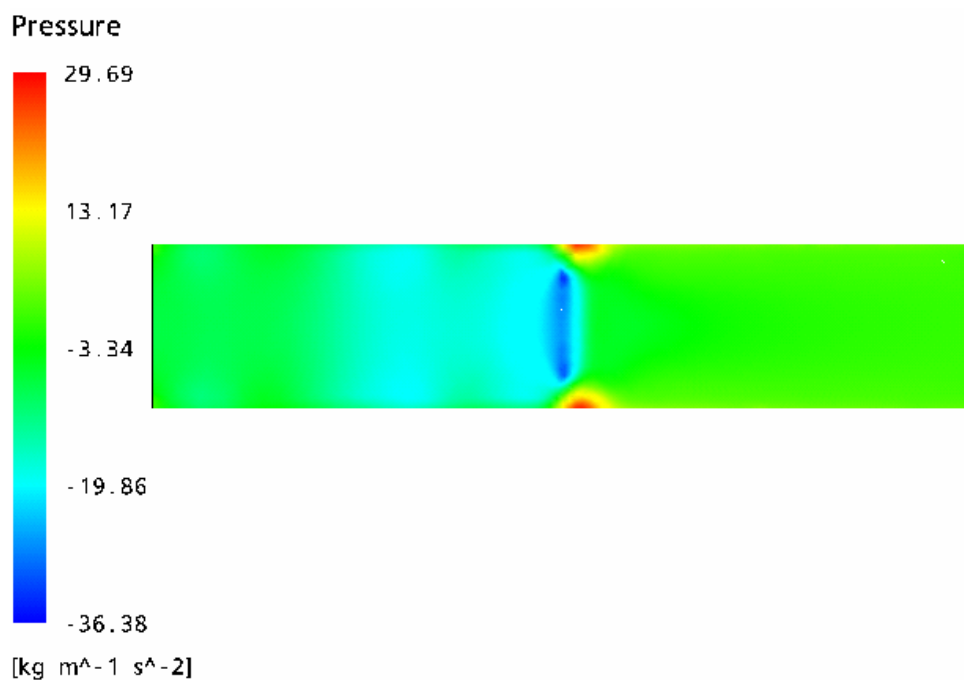


รูปที่ 3.25 รูปสรความเร็วภายในท่อ

นอกจากนี้ หากกำหนดให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมมีค่าในแนวรัศมีด้วยแล้ว รูปแบบของเส้นแนวการไหลจะมีการบิดไปหลังจากผ่านแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่บริเวณกลางท่อ โดยเกิดการหมุนวนเป็นเกลียวรอบท่อ ตลอดจนความดันในท่อที่ได้มีค่าเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.26 และ 3.27



รูปที่ 3.26 เส้นแนวการไหลเมื่อให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมี



รูปที่ 3.27 ความดันตลอดแนวความยาวท่อเมื่อให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมี

3.2 ลักษณะของถังตกผลึกและหลักการทำงาน

ถังตกผลึกที่จะทำการจำลองในงานวิจัยนี้มีขนาดและรูปแบบคล้ายคลึงกับถังตกผลึกที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.28 โดยกำหนดให้ถังตกผลึกดังกล่าวเป็นถังตกผลึกน้ำตาลจำลองประเภทต่อเนื่องโดยการทำความเย็นตัวถังเป็นทรงกระบอกก้นมนซึ่งมีขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 137 mm ภายในถังตกผลึกจำลองประกอบด้วย แผ่นกั้นแนวตั้ง (Vertical Baffle) จำนวน 4 แผ่น วางห่างกันในแนวรัศมีตัวละ 90 องศา แผ่นกั้นแนวตั้งนี้มีขนาดความกว้างของแผ่นเท่ากับ 24 mm สูง 98 mm และถูกติดตั้งไว้เพื่อเป็นตัวกั้นน้ำของไหลมีการไหลวนในแนวรัศมีน้อยที่สุด ส่วนกลางของตัวถังจะมีท่อหน้า (Draft tube) ซึ่งมีท่อทำความเย็นขดอยู่ภายใน ติดตั้งไว้ในแนวร่วมศูนย์กลางกับตัวถังตกผลึก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 69 mm และมีการติดตั้งใบพัดเข้าไปที่ปลายของท่อหน้า เพื่อให้ใบพัดดูดส่งของไหลให้ไหลลงสู่ด้านล่างแล้วไหลวนกลับขึ้นไปใหม่เป็นวงรอบ ประเภทของใบพัดที่ใช้เป็นใบพัดแบบปั่นของไหลให้เกิดการไหลในแนวแกน แกนของใบพัดจะตรงกับแกนของตัวถังตกผลึกพอดี



รูปที่ 3.28 ถังตกผลึกจำลองในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี

นอกจากนี้ยังมีท่อสำหรับปล่อยสารละลายเข้าไปในตัวถังอย่างต่อเนื่องและท่อสำหรับดูดสารละลายออกจากตัวถัง ท่อทั้งสองชนิดมีขนาดเท่ากันคือมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 6 mm และความยาวท่อที่หย่อนลงมาในระบบเท่ากับ 75 mm โดยท่อนำเข้าถูกติดตั้งในบริเวณห่างจากแกนกลางของถังออกมาเป็นระยะ 9 mm ซึ่งปลายท่อจะถูกหย่อนลงไปในพื้นที่ด้านในของท่อนำซึ่งทิศทางการไหลจะอยู่ในทิศไหลลง ส่วนท่อดูดออกถูกติดตั้งด้านนอกของท่อนำซึ่งการไหลของของไหลบริเวณดังกล่าวอยู่ในทิศที่ไหลขึ้น ระยะห่างระหว่างแกนของท่อดูดออกกับแกนของถังผลึกเป็น 48.5 mm

สำหรับการทำงานของถังตกผลึกนั้นจะใช้หลักการง่าย ๆ กล่าวคือ เมื่อต้องการให้เกิดการตกผลึกจะปล่อยสารละลายที่มีสภาพใกล้อิ่มตัวเข้าไปทางท่อนำเข้าด้วยอัตราการไหลน้อย ๆ สารละลายที่ไหลเข้าถังตกผลึกจะไหลผ่านท่อนำซึ่งมีขดลวดทำความเย็นอยู่ภายใน เมื่อสารละลายถูกทำให้เย็นลง ก็จะมีสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด ทำให้มีความสามารถในการละลายน้อยลง และเกิดการตกผลึกออกมาบางส่วน ทั้งนี้ในขณะที่สารละลายอยู่ในถังผลึกจะถูกใบพัดปัดป้อนให้ไหลผ่านท่อนำลงสู่ด้านล่างของตัวถังและไหลย้อนกลับขึ้นไปด้านบน โดยผ่านแผ่นกั้นแนวตั้งซึ่งจะช่วยให้ของไหลไหลผ่านขึ้นไปด้านบนโดยเกิดการไหลในแนวรัศมีน้อยลง หลังจากนั้นของไหลก็จะวนกลับมาผ่าน

ท่อนำและไหลลงสู่ด้านล่างเช่นเดิมเป็นวัฏจักร ลักษณะการไหลภายในตัวถังตกผลึกนั้นต้องการการไหลที่เป็นเอกรูปเพื่อให้คุณสมบัติของสารภายในถึงมีค่าใกล้เคียงกันที่สุด ซึ่งจะเป็นผลให้การเจริญเติบโตของผลึกมีความสม่ำเสมอและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

ของไหลที่ไหลอยู่ในระบบของถังตกผลึกเป็นสารละลายน้ำตาลซูโครส ซึ่งมีความหนาแน่นเป็น 1342.7 kg/m^3 มีค่าความหนืดเท่ากับ $236.77 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ซึ่งสารละลายน้ำตาลซูโครสดังกล่าวจะถูกปล่อยให้ไหลเข้าสู่ถังผลึกที่อัตราการไหล 25 L/h และถือว่าการตกผลึกเป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ที่ 29°C

3.3 การจำลองลักษณะทางกายภาพของถังตกผลึก

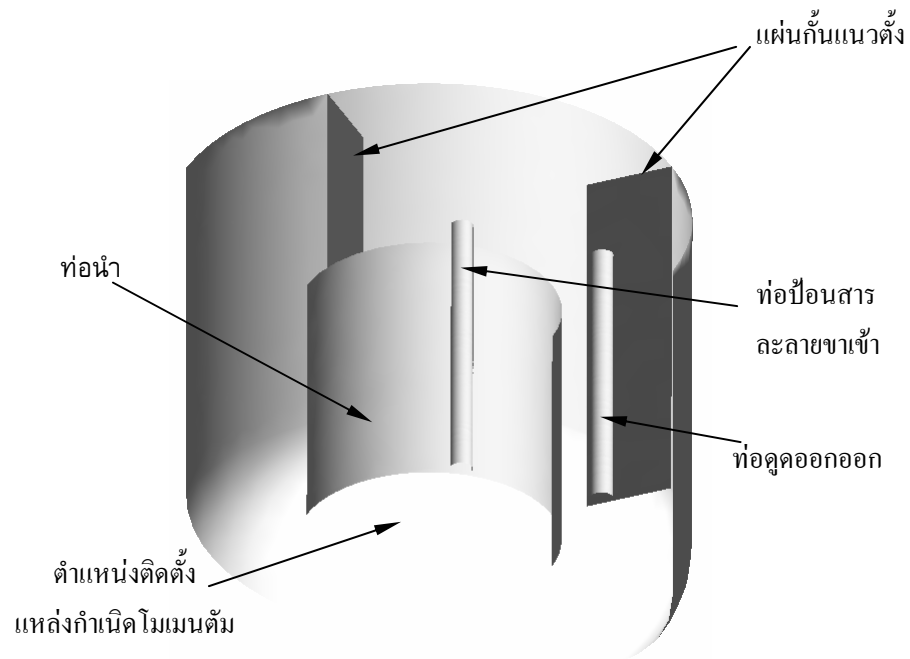
จากลักษณะของถังตกผลึกจำลองข้างต้น สามารถนำมาสร้างต้นแบบลงในโปรแกรมเพื่อการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม CFX ถังตกผลึกที่ถูกสร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.29 และเพื่อเป็นการทำให้ปัญหาง่ายขึ้น การจำลองลักษณะทางกายภาพของถังตกผลึกจะเป็นไปตามสมมุติฐานดังต่อไปนี้

3.3.1 กำหนดให้ท่อนำและแผ่นกั้นแนวตั้งเป็นวัสดุผิวบางที่มีความหนาน้อยมาก การสร้างลักษณะทางกายภาพภายใน โปรแกรมจึงกำหนดให้เป็นวัสดุที่ไม่มี ความหนา

3.3.2 กำหนดให้ตัวถังด้านบนมีฝาปิดอยู่และมีสารละลายน้ำตาลซูโครสบรรจุอยู่เต็มถึง ดังนั้นจึงไม่มีผิวอิสระของของไหลที่ด้านบนของถังตกผลึก

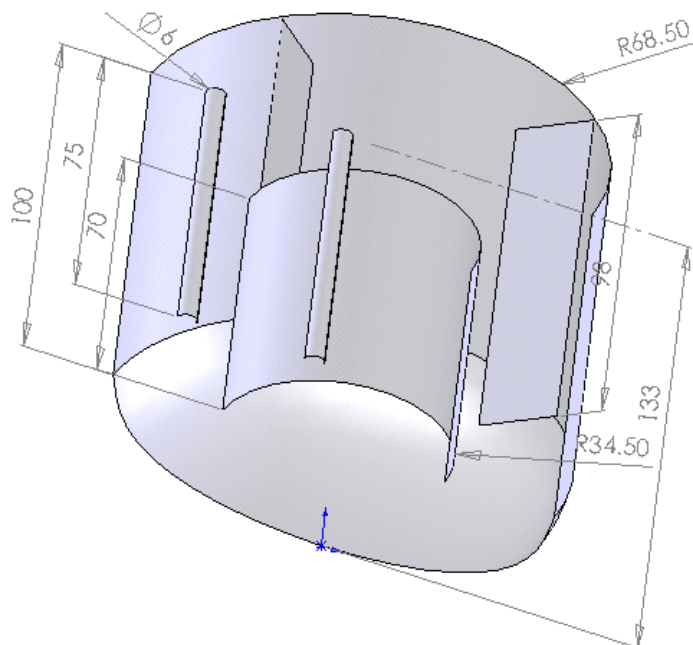
3.3.3 จุดประสงค์ในการติดตั้งท่อนำและแผ่นกั้นแนวตั้งเพิ่มเข้าไปก็เพื่อให้สารละลายเกิดการไหลวนในแนวแกน ดังนั้นจึงจำลองใบพัด ด้วยแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกนเท่านั้น

3.3.4 เนื่องจากระบบของถังตกผลึกมีความสมมาตร ในการจำลองจึงสร้างถังตกผลึกจำลองแค่เพียงครึ่งถังเท่านั้น



รูปที่ 3.29 ถังตกผลึกจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CFX5.5.1 (ผ่าครึ่ง)

ขนาดของถังตกผลึกจำลองและส่วนประกอบที่ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม CFX นั้นได้มาจากการวัดตัวถังตกผลึกจำลองที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 รายละเอียดของถังตกผลึกจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CFX

3.4 การสร้างเมช (Mesh)

ในการจำลองการไหลจะใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดโดยใช้เมชแบบไร้โครงสร้าง ปริมาตรทั้งหมดภายในถึงตลึงจะถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรเล็ก ๆ ซึ่งในเรียกปริมาตรเล็ก ๆ ที่ถูกแบ่งนี้ว่า “เมช” (Mesh) ซึ่งอาจมีรูปร่างเป็นพีระมิดหรือปริซึม หรือตามที่ผู้ใช้กำหนด โดยจุดยอดมุมภายในเมชเรียกว่าโหนด (Node) ในโปรแกรม CFX นั้นการแบ่งเมชจะเริ่มจากการแบ่งเมชสองมิติที่พื้นผิวก่อน (Surface Mesh) โดยรูปแบบที่เป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมถูกกำหนดให้เป็นรูปสามเหลี่ยม หลังจากนั้นโปรแกรมจะแบ่งเมชสามมิติภายในตัวถังโดยรูปแบบเมชที่ถูกแบ่งจะเป็นรูปพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือฐานสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมเช่นกัน อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถกำหนดรูปร่างของเมชเองได้ โดยสามารถกำหนดได้ทั้งในโปรแกรมและการนำ เมชที่ถูกกำหนดจากโปรแกรมอื่นภายนอกเข้าไปคำนวณได้ ทั้งนี้การสร้างเมชภายในถึงตลึงถูกสร้างขึ้นโดยใช้ฟังก์ชันการกำหนดเมชภายในโปรแกรม CFX

3.4.1 ขั้นตอนในการกำหนดเมช

การแบ่งเมชมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ การแบ่งเมชที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้การคำนวณไม่ลู่เข้า หรือ ได้ค่าผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง วิธีการที่ผู้ทำวิจัยนำมาใช้ในการหาช่วงเมชที่เหมาะสมและให้คำตอบที่มีความถูกต้องในช่วงที่ยอมรับได้ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคร่าว ๆ ดังนี้

- ขั้นที่ 1 ทำการแบ่งเมชโดยกำหนดค่าระยะห่างระหว่างกันให้มีค่าสูง ซึ่งจะทำได้เมชที่หยาบ (ค่าเริ่มต้นของโปรแกรมได้กำหนดไว้ให้เป็นประมาณ 5 % ของขนาดของโดเมน) หลังจากนั้นทำการคำนวณบันทึกผลที่ได้จากการจำลองการไหลไว้
- ขั้นที่ 2 ทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างเมชให้เล็กลง ซึ่งจะทำได้เมชที่ละเอียดมากกว่าเมชที่ได้จากการแบ่งในรอบแรก ทำการคำนวณใหม่อีกครั้ง และบันทึกผล
- ขั้นที่ 3 นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 มาเปรียบเทียบกัน
- ขั้นที่ 4 หากผลลัพธ์ที่ได้จากระบบเมชทั้งสองระบบยังมีความแตกต่างกันมากเกินค่าที่กำหนดไว้ ก็จะทำการปรับเมชให้ละเอียดลงอีกเรื่อย ๆ ทำอย่างนี้เป็นวัฏจักรจนกระทั่งได้เมชที่เหมาะสมที่จะทำให้คำตอบไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้

ขั้นตอนทั้งสี่ขั้นข้างต้นเป็นแนวทางคร่าว ๆ อย่างไรก็ตาม การกำหนดเมชนั้นจะต้องเหมาะสมกับลักษณะของโดเมนในแต่ละพื้นที่ด้วย การกำหนดเมชไม่จำเป็นต้องกำหนดให้มีขนาดที่เท่ากันตลอดทั้งโดเมน ในบริเวณที่มีพื้นที่การไหลแคบ ๆ เช่นในท่อนำเข้าและท่อคู่ตออกจะถูกกำหนดให้มีเมชละเอียดกว่าบริเวณอื่น ๆ รอบนอกเพื่อให้การคำนวณสมการของการไหล

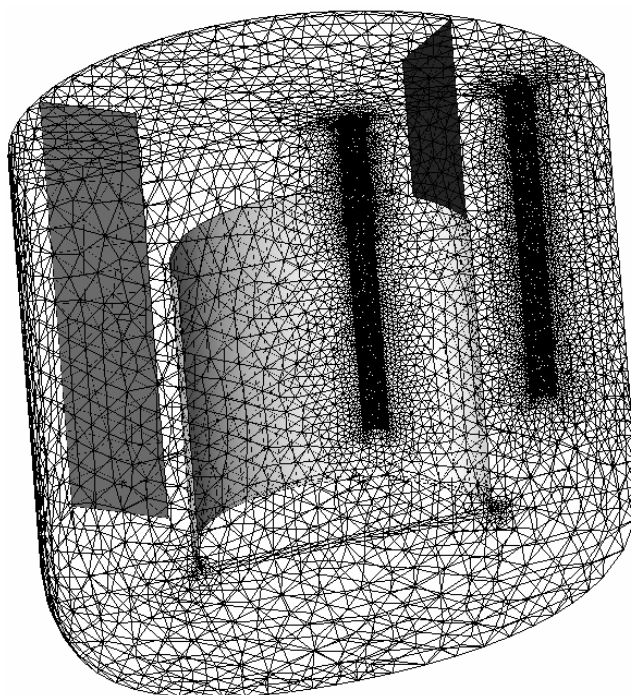
ถูกต้องมากขึ้น โดยเมชบริเวณดังกล่าวจะกำหนดให้มีความละเอียดเหมาะสมขนาดของท่อ การกำหนดเมชให้ละเอียดเฉพาะบางตำแหน่งสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันภายในโปรแกรมซึ่งมีลักษณะการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับการกำหนดเมชภายในโดเมน ซึ่งหากเมชถูกกำหนดให้มีขนาดละเอียดมาก ในขณะที่เมชบริเวณรอบนอกถูกกำหนดให้มีขนาดใหญ่ ขนาดของเมชทั้งสองตำแหน่งมีความแตกต่างกันมากก็จะเกิดปัญหาในการสร้างเมช เมชบางส่วนจะมีรูปร่างที่ไม่เหมาะสมเช่นอาจมีมุมที่เล็กจนเกินไป วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ จะต้องลดความแตกต่างของขนาดของเมชทั้งสองตำแหน่งลง

การสร้างเมชด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้เมชที่เหมาะสม ไม่ละเอียดจนเกินไปซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณผลไม่มากจนเกินไปและในขณะเดียวกันก็ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในช่วงที่ยอมรับได้ การกำหนดเมชให้ละเอียดในครั้งเดียว อาจจะทำให้ได้เมชที่เล็กและเสียเวลาในการคำนวณมากเกินไปโดยไม่จำเป็น อีกทั้งการกำหนดเมชที่ละเอียดนี้หากมีความผิดพลาดในการระบุค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโปรแกรม หรือต้องการคำนวณผลลัพธ์โดยการปรับค่าบางค่าเช่นค่าแหล่งกำเนิดโมเมนต์จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณแต่ละรอบมากและเวลารวมที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์มากเกินไป

3.4.2 ลักษณะของเมชที่สร้างขึ้นภายในถังตกผลึก

หลังจากทำการสร้างเมชตามขั้นตอนที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 แล้ว เมชที่ถูกแบ่งภายในถังตกผลึกมีลักษณะดังต่อไปนี้

- ก. เมชเล็ก ๆ ที่ถูกแบ่งนี้จะถูกกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างแต่ละเมชได้ไม่เกิน 5.5 mm ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ภายในถังโดยทั่ว ๆ ไป
- ข. พื้นที่บริเวณใกล้ ๆ ตลอดจนภายในท่อ خروجและท่อเข้านั้นกำหนดให้มีความห่างระหว่างเมชได้ประมาณ 0.5 mm เนื่องจากท่อทั้งสองมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับตัวถัง นั่นคือมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงแค่ 6 mm เท่านั้น บริเวณดังกล่าวจึงไม่สามารถแบ่งเมชให้มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของคำตอบที่จะได้จากการจำลอง
- ค. เมชที่สร้างภายในถังตกผลึกมีจำนวนโหนด จำนวนเมช และจำนวนหน้าทั้งหมด 73735 โหนด 376481 เมช และ 40716 หน้า ตามลำดับ ลักษณะของเมชที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การแบ่งเมชภายในถังตกผลึก

3.5 เงื่อนไขในการจำลอง การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น

3.5.1 เงื่อนไขในการจำลอง

ในการจำลองการไหลในถังตกผลึกนี้ ของไหลที่ใช้ในการจำลองคือสารละลายน้ำตาลซึ่งเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ($23677 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) มีความหนาแน่นเป็น 1342.7 kg/m^3 กำหนดให้การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบในย่านความเร็วต่ำและคงตัว กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่อุณหภูมิตั้งที่ ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนภายในระบบ การไหลจะถูกจำลองที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมต่างกันจำนวน 7 ค่า เริ่มตั้งแต่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น 0 (กรณีไม่มีการใช้ใบพัดในการปั่นของไหล) 1000 10000 15000 18000 30000 และ 50000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ ตามลำดับ (ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่กำหนดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของโมเมนตัมที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิด ในขณะที่แหล่งกำเนิดมีค่าเป็นศูนย์ได้เป็น 0 0.252 2.518 3.777 4.532 7.554 และ 12.589 % ตามลำดับ) ทั้งนี้ค่าความดันอ้างอิงในการจำลองกำหนดให้มีค่าเป็น 101325 Pa

3.5.2 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในถังตกผลึกโดยใช้โปรแกรม CFX สามารถกำหนดได้หลายประเภท ประเภทที่เลือกใช้ในการกำหนดเมชภายในถังตกผลึกมีทั้งหมด 4 ประเภท โดยใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปภายในโปรแกรม ดังนี้

- ก. Inlet
- ข. Outlet (Extrapolate)
- ค. Wall
- ง. Symmetry Plane

เงื่อนไขค่าขอบทั้งสี่ประเภทถูกกำหนดเข้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้

3.5.2.1 พื้นผิวหน้าตัดที่ทางเข้าของท่อนำเข้า

ตำแหน่งปากทางเข้าของท่อป้อนสารละลายขาเข้านี้จะมีการป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 25 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงกำหนดให้เงื่อนไขค่าขอบบริเวณดังกล่าวเป็นประเภท Inlet ทิศทางการไหลตั้งฉากกับพื้นผิวบริเวณที่กำหนด ทั้งนี้การกำหนดอัตราการไหลเปรียบเสมือนการกำหนดความเร็วในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว เนื่องจากโปรแกรมจะทำการคำนวณพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวและหาค่าของความเร็วเฉลี่ยออกมา ซึ่งความเร็วเฉลี่ยดังกล่าวจะถูกนำมากำหนดเป็นค่าความเร็วที่ผิวนั้น ๆ

3.5.2.2 พื้นผิวหน้าตัดของปลายท่อคูดอก

กำหนดให้เงื่อนไขค่าขอบมีความดันสถิตอ้างอิงเป็นศูนย์ ซึ่งมีทิศการไหลในทิศทางไหลออกซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิวดำแหน่งดังกล่าว ความเร็วทั้งสามแนวแกนที่ตำแหน่งดังกล่าวถือเป็นส่วนหนึ่งคำตอบที่จะได้จากการจำลอง โดยโปรแกรมจะใช้วิธีการ Extrapolate ในการคำนวณ

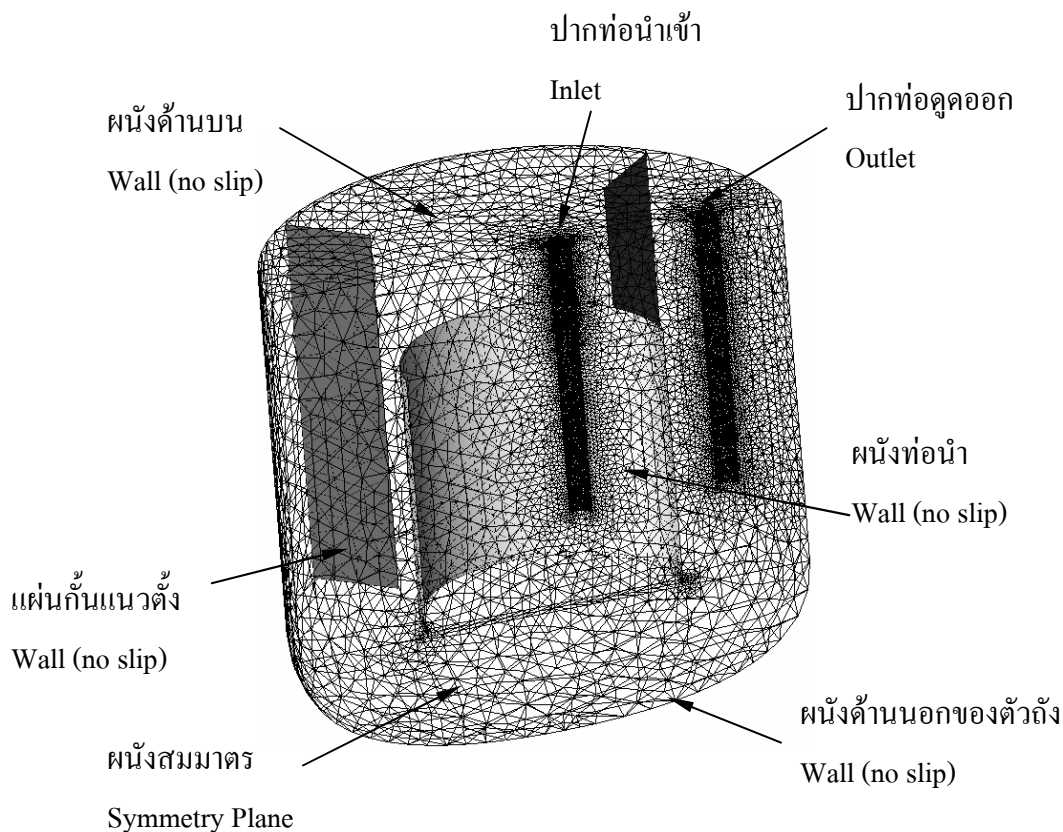
3.5.2.3 พื้นผิวสมมาตร (Symmetry Plane)

พื้นผิวบริเวณนี้ถูกกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นประเภท Symmetry Plane โดยลักษณะของเงื่อนไขค่าขอบที่กำหนดนี้จะไม่มีการไหลทะลุผ่านพื้นผิวนี้ ความเร็วในทิศที่ตั้งฉากกับพื้นผิวถูกกำหนดให้เป็น 0 นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติใด ๆ ที่อยู่นอกโดเมนจะมีค่าเท่ากับตำแหน่งที่ห่างจากโดเมนเข้ามาเป็นระยะเท่ากันซึ่งเปรียบเสมือนพื้นผิวนี้เป็นกระจก

3.5.2.4 บริเวณที่เป็นผนังของตัวถังตกผลึก ผนังท่อ และผนังแผ่นกั้นแนวตั้ง

ส่วนที่เป็นผนังทุกจุดจะถูกกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นประเภท wall แบบที่ไม่มีการไหล (No-slip) ความเร็วบริเวณที่ติดกับผนังมีค่าเป็น 0 ในทุกแนวแกน และไม่มีการไหลข้ามขอบเขตผนังดังกล่าว

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของถังตกผลึก

3.5.3 การกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

การจำลองการไหลแบ่งออกเป็นเจ็ดกรณีซึ่งแปรไปตามค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม การกำหนดค่าเริ่มต้นในแต่ละกรณีมีความต่อเนื่องกันคือ เริ่มต้นได้ทำการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็นศูนย์ ซึ่งกำหนดให้ค่าของความเร็วและความดันเริ่มต้นภายในโดเมนเป็นศูนย์ทั้งหมด เมื่อได้คำตอบจากการจำลองที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็นศูนย์แล้ว จะใช้ความเร็วและความดันที่เป็นคำตอบของการจำลองนี้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณหาคำตอบของการไหลซึ่งมีค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น 1000 และนำคำตอบที่ได้จากการจำลองการไหลที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น 1000 ไปเป็นค่าเริ่มต้นของการจำลองที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมถัดไปคือ 10000 15000 18000 30000 และ 50000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ ต่อไปตามลำดับ การกำหนดค่าเริ่มต้นแบบนี้เพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการทดสอบโปรแกรมจำลองการไหล CFX กับระบบการไหลมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลเฉลยแบบเชิงทฤษฎี การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขของโปรแกรมที่ใช้ และการตรวจสอบนี้ได้แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองการไหลมาตรฐาน โดยการใช้โปรแกรม CFX นี้ มีความละเอียดและเที่ยงตรงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังเป็นการฝึกความชำนาญของผู้ใช้โปรแกรมด้วย

นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของถังตกผลึกในโปรแกรม CFX ด้วย โดยแสดงขั้นตอนในการกำหนดเมชภายในถังอย่างละเอียด ซึ่งขั้นตอนการกำหนดเมชถือว่ามีความสำคัญต่อความถูกต้อง ความละเอียด และเวลาที่ใช้ ในการจำลองผลของโปรแกรมโดยตรง

ในส่วนสุดท้ายของบท ได้กล่าวถึงการกำหนดเงื่อนไขในการจำลองผล เงื่อนไขค่าขอบและเงื่อนไขค่าเริ่มต้น ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขเหล่านี้จะส่งผลต่อความถูกต้อง เวลาที่ใช้ในการคำนวณและเสถียรภาพต่อการลู่เข้าของคำตอบ

บทที่ 4

ผลการจำลองและการอภิปรายผล

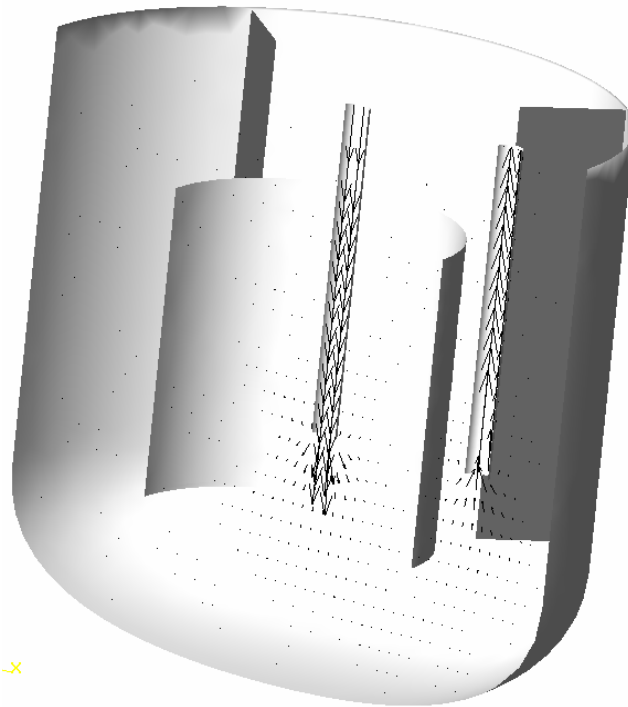
บทนี้เป็นการนำเสนอผลจากการจำลองเชิงตัวเลข โดยพิจารณารูปทรงความเร็วภายในตัวถัง ตกผลึก รูปทรงความเร็วบริเวณใกล้ท่อดูดออก เส้นแนวการไหล และคอนทัวร์ (Contour) ของขนาดของความเร็วภายในถังตกผลึก ตลอดจนการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการไหลภายในถังตกผลึก อันเนื่องมาจากการให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ต่างกัน

4.1 ผลการจำลอง

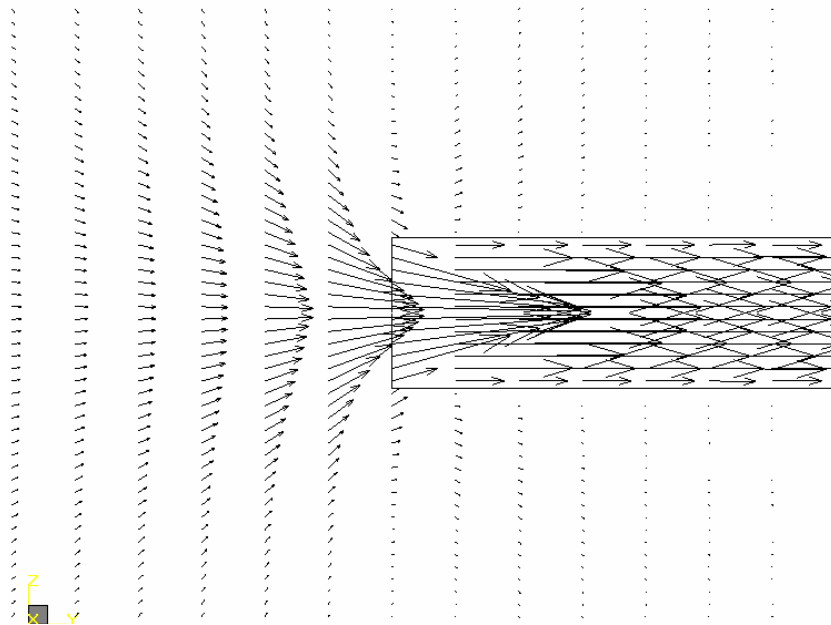
งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการไหลในถังตกผลึกน้ำตามที่ได้เสนอโครงสร้างถังตกผลึกจำลองและการสร้างกริดไว้ในหัวข้อที่ 3.3 – 3.4 การทดสอบแบ่งออกเป็น 7 กรณีตามค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ใช้คือ 0 1000 10000 15000 18000 30000 และ 50000 (0 0.252 2.518 3.777 4.532 7.554 และ 12.589 % ของค่าโมเมนตัมที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิด ในขณะที่ไม่ได้ติดตั้งแหล่งกำเนิด) ดังต่อไปนี้

4.1.1 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

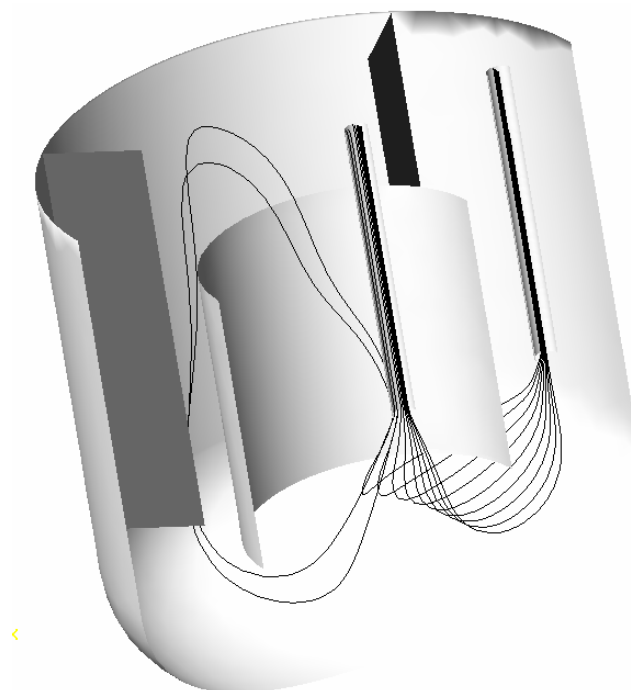
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็นศูนย์ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อนำ พบว่ามีค่าเป็น 0.00904 ความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าต่ำมาก รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นรูปทรงความเร็วภายในบริเวณถังตกผลึกมีค่าแตกต่างจากรูปทรงความเร็วภายในท่อดูดออกและท่อนำเข้าอย่างชัดเจน ในรูปที่ 4.2 ความเร็วภายในถังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วภายในท่อดูดออกและท่อดูดเข้า การไหลมีลักษณะลู่เข้าหาท่อดูดออกเป็นวงกว้างอย่างชัดเจนซึ่งไม่เป็นการดูดออกแบบไอโซไคนेटิกส์ (Non-Isokinetic Withdrawal) การลู่เข้าสู่ปากท่อจะเห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณาเส้นแนวการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.3 กรณีนี้การไหลภายในถังตกผลึกถือว่าค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตาม ความเร็วภายในถังตกผลึกยังมีค่าที่ต่ำมาก ซึ่งไม่สามารถพาผลึกลอยเข้าสู่ท่อดูดออกได้



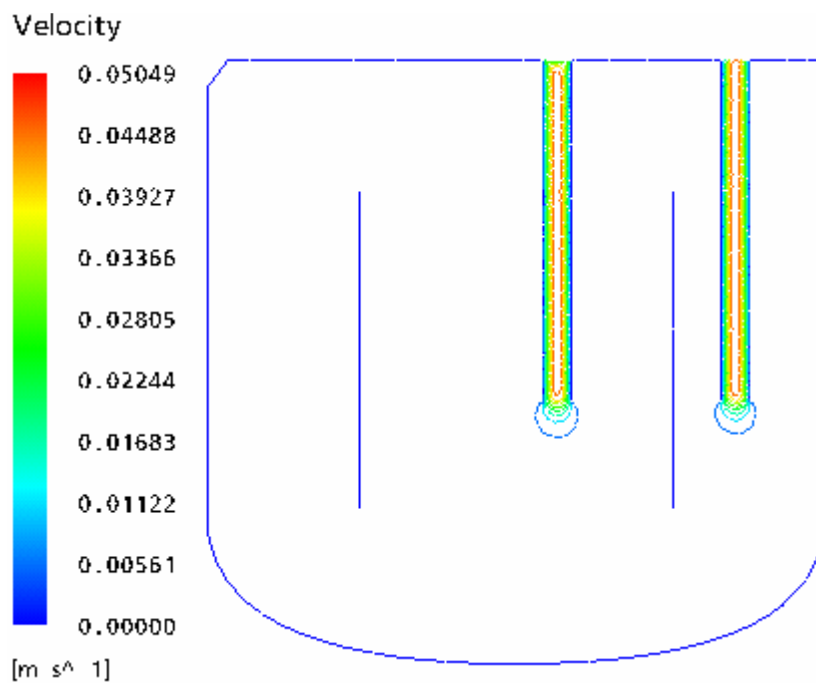
รูปที่ 4.1 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.2 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อคูดอกที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



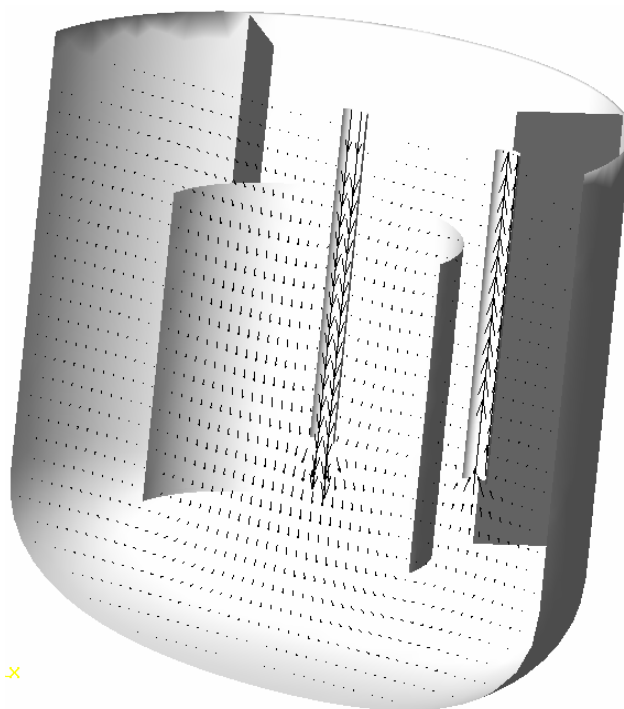
รูปที่ 4.3 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



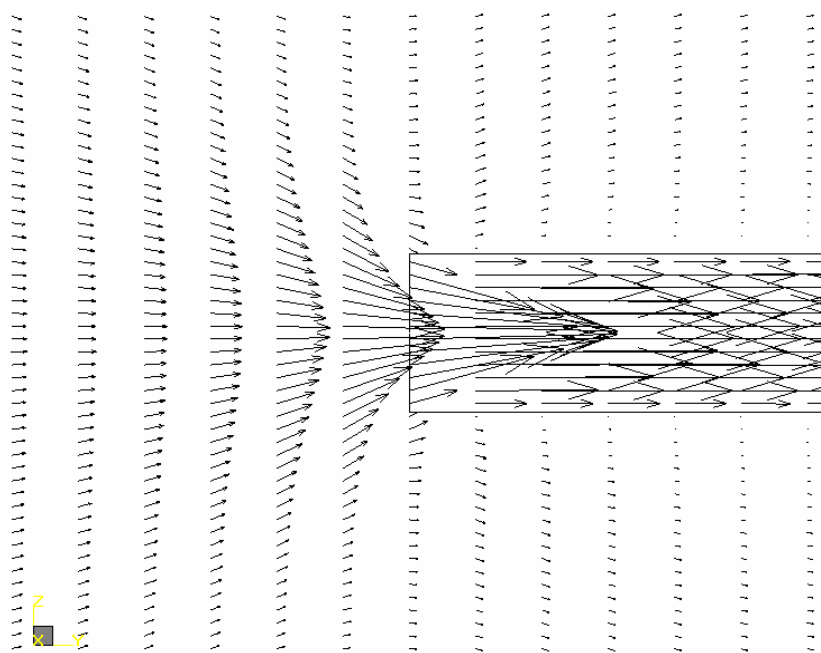
รูปที่ 4.4 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $0 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.2 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

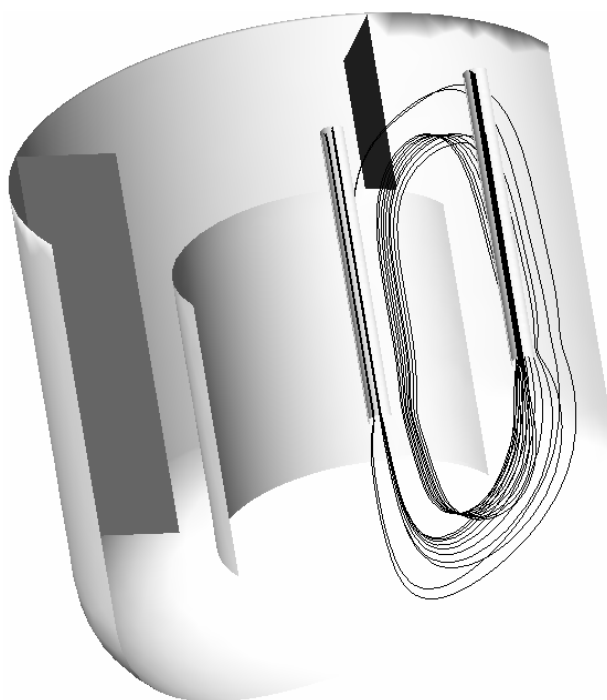
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อนำ พบว่ามีค่าเป็น 0.1067 ความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัม ความแตกต่างของความเร็วภายในท่อกับภายนอกท่อยังมีค่าสูง พิจารณาจากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นรูปสรความเร็วภายในบริเวณถังตกผลึกมีค่าแตกต่างจากรูปสรความเร็วภายในท่อ خروجและท่อนำเข้าอย่างชัดเจน รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นความเร็วบริเวณใกล้ท่อ خروجซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเร็วภายในท่อนำเข้าและเกิดการไหลลู่เข้าสู่ปากท่อเป็นวงกว้าง นั่นคือการดูดออกยังไม่เป็นไอโซไคนติกส์การลู่เข้าสู่ปากท่อจะเห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.7 กรณีนี้การไหลภายในถังตกผลึกถือว่าค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.8 อย่างไรก็ตามความเร็วเฉลี่ยในถังตกผลึกที่ได้มีค่ายังถือว่าเป็นค่าความเร็วที่ต่ำ และไม่สามารถพาผลึกให้ลอยเข้าสู่ท่อ خروجได้



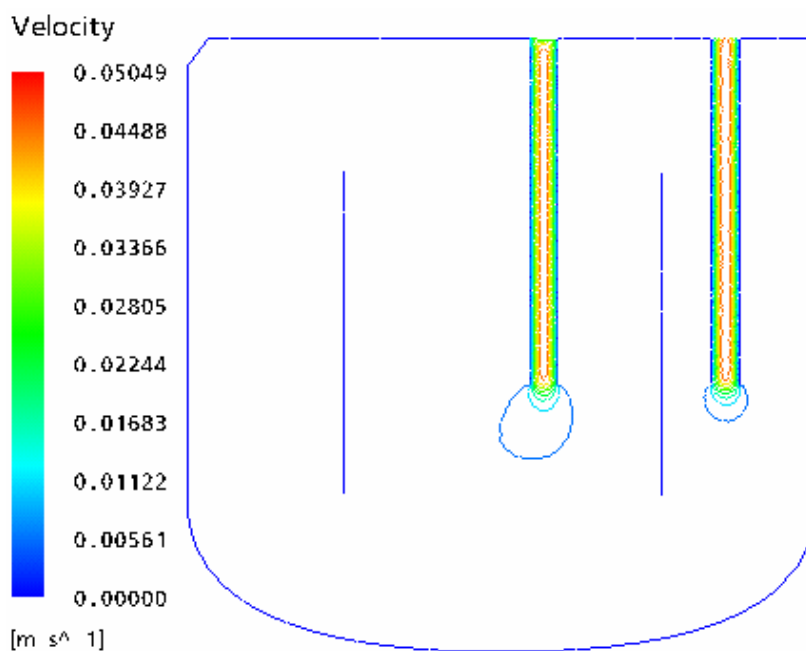
รูปที่ 4.5 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.6 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อจุดออกที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



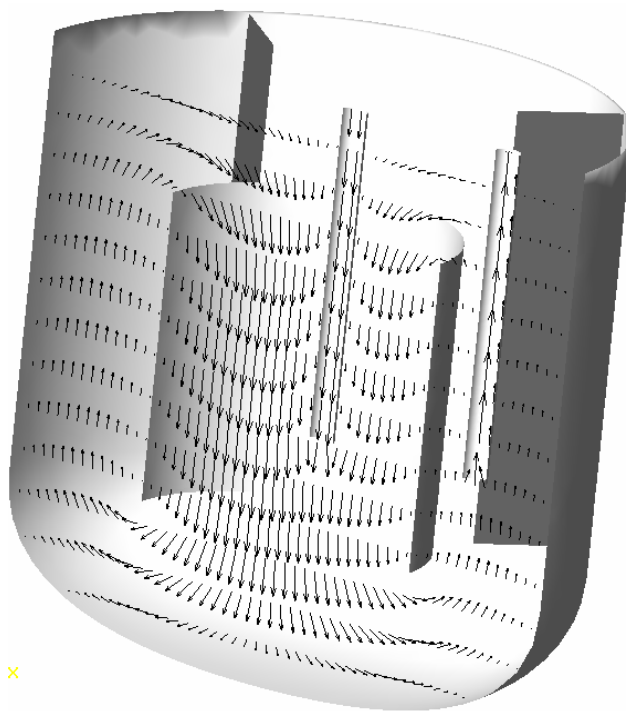
รูปที่ 4.7 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



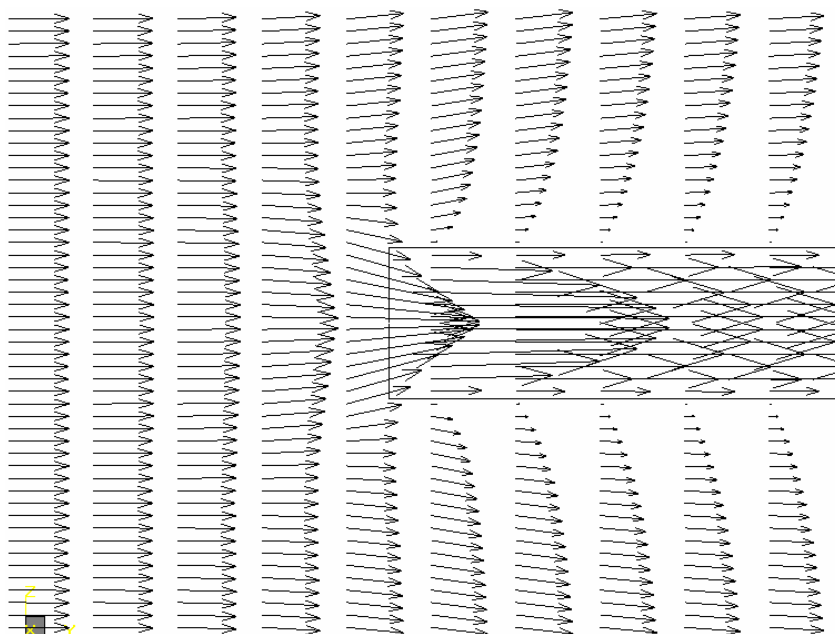
รูปที่ 4.8 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกลูก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.3 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

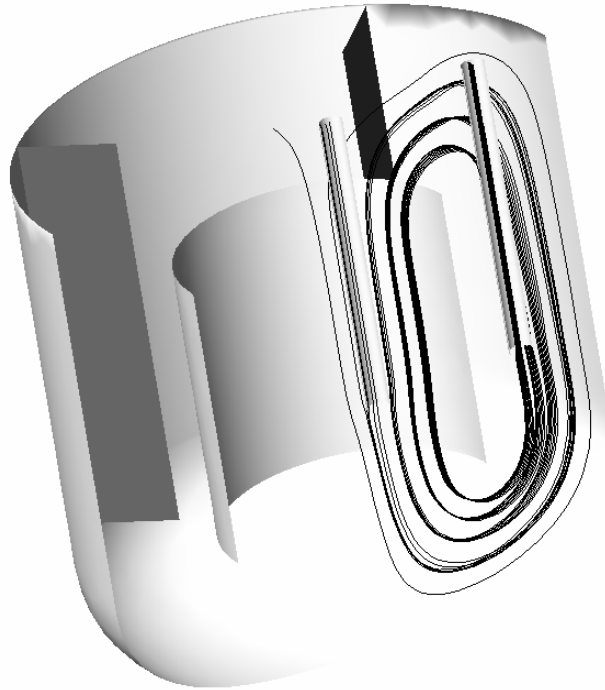
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกลูกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อ พบว่ามีค่าเป็น 0.9128 ความเร็วภายในถังตกลูกมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าสองกรณีแรกอย่างชัดเจน พิจารณาจากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นรูปสรความเร็วภายในบริเวณถังตกลูกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นความเร็วบริเวณใกล้ท่อ خروجซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเร็วภายในท่อ ทำให้เกิดการไหลลู่เข้าสู่ปากท่อ และถือว่าการคูดอกยังไม่เป็นไอโซโคเนติกส์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 พบว่าบริเวณเส้นแนวการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อมีวงแคบลงกว่าสองกรณีแรก และความเร็วการไหลภายในถังตกลูกไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.12 โดยความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณภายในท่อตรงฟัด เมื่อของไหลไหลผ่านส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และไหลวนกลับไปด้านนอกของท่อตรงฟัดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่า ทำให้ความเร็วบริเวณภายนอกท่อตรงฟัดมีค่าต่ำกว่าภายในท่อ นอกจากนี้ยังพบว่าที่บริเวณจุดศูนย์กลางของกันถังซึ่งความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้างอย่างชัดเจน



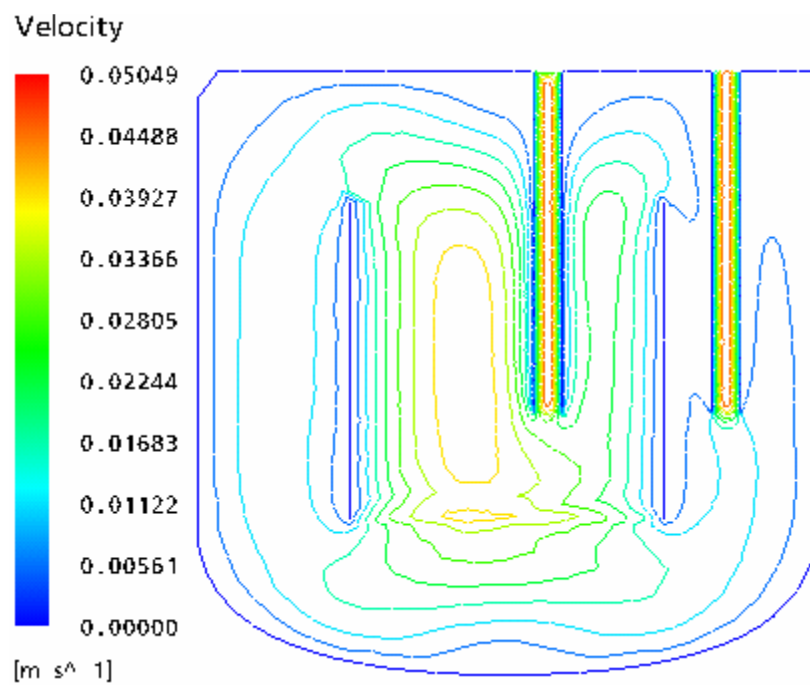
รูปที่ 4.9 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิด โมเมนต์ = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.10 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อออกที่แหล่งกำเนิด โมเมนต์ = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



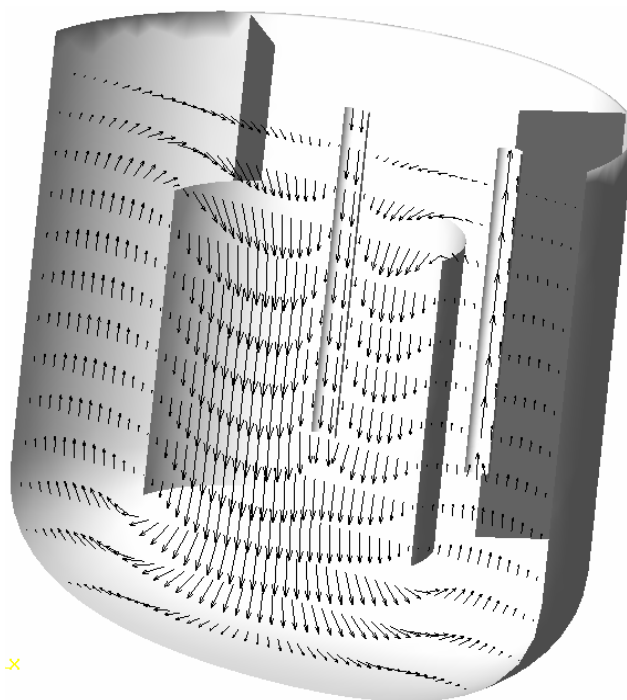
รูปที่ 4.11 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



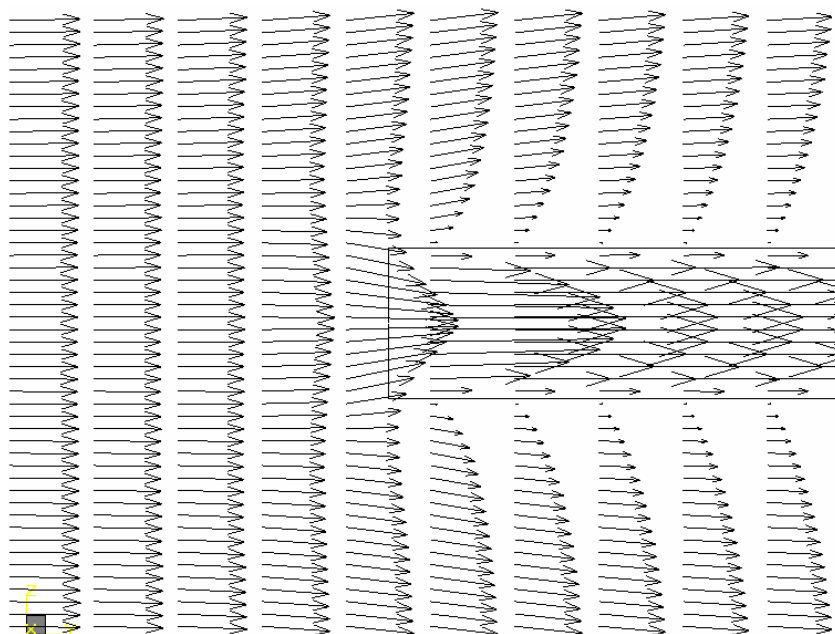
รูปที่ 4.12 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.4 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

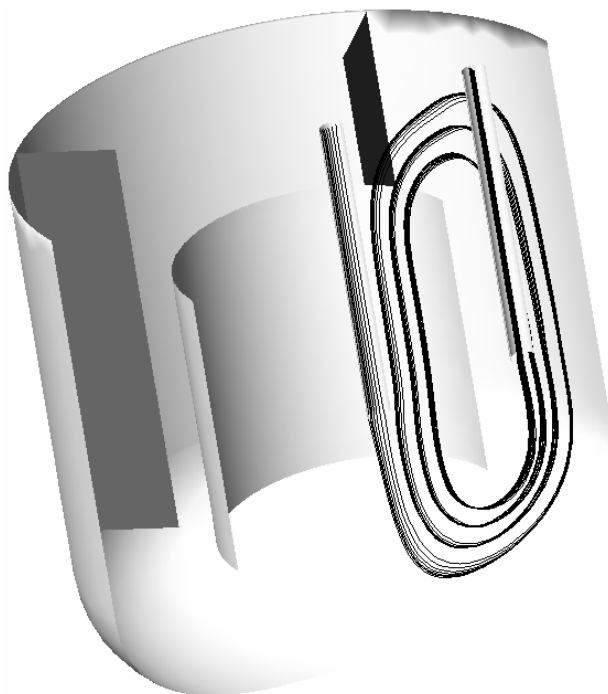
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อนำ พบว่ามีค่าเป็น 1.3142 ความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นกว่ากรณีที่ผ่านมา พิจารณาจากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นรูปสรความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าความเร็วบริเวณใกล้ท่อคูดอกมีค่าน้อยกว่าความเร็วภายในท่อ ซึ่งยังทำให้มองเห็นการไหลลู่เข้าสู่ปากท่ออยู่เล็กน้อย นั่นคือการคูดอกยังไม่เป็นไอโซไคเนติกส์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 พบว่าบริเวณเส้นแนวการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อมีวงแคบ แต่ไม่แตกต่างจากกรณีแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ มากนัก และความเร็วการไหลภายในถังตกผลึกมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.16 โดยความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณภายในท่อคราฟต์ เมื่อของไหลไหลผ่านส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และไหลวนกลับไปด้านนอกของท่อคราฟต์ เนื่องจากบริเวณภายนอกมีพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่าทำให้ความเร็วภายนอกท่อคราฟต์มีค่าต่ำกว่า และพบว่าที่บริเวณจุดศูนย์กลางของถังซึ่งความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้างเช่นเดียวกับกรณีแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น $10000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



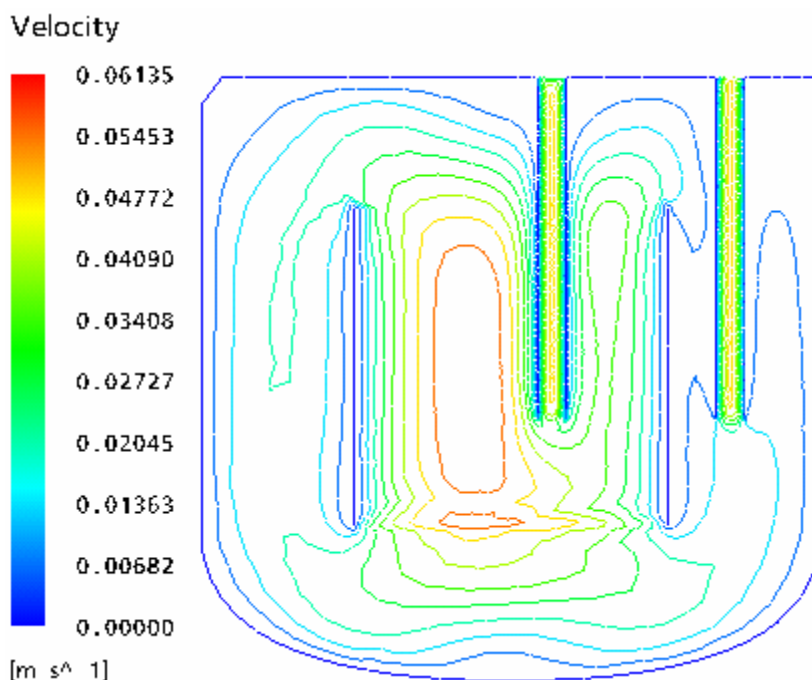
รูปที่ 4.13 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.14 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อจุดออกที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



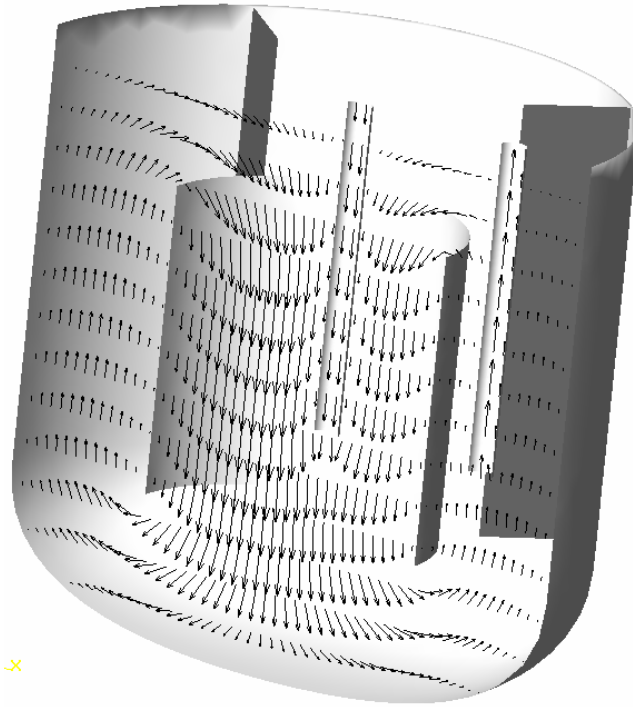
รูปที่ 4.15 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



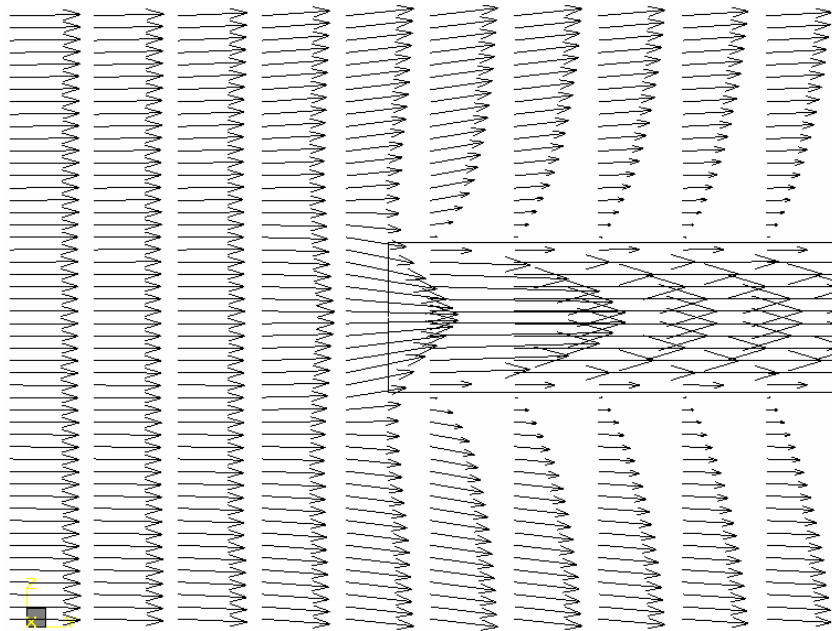
รูปที่ 4.16 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.5 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

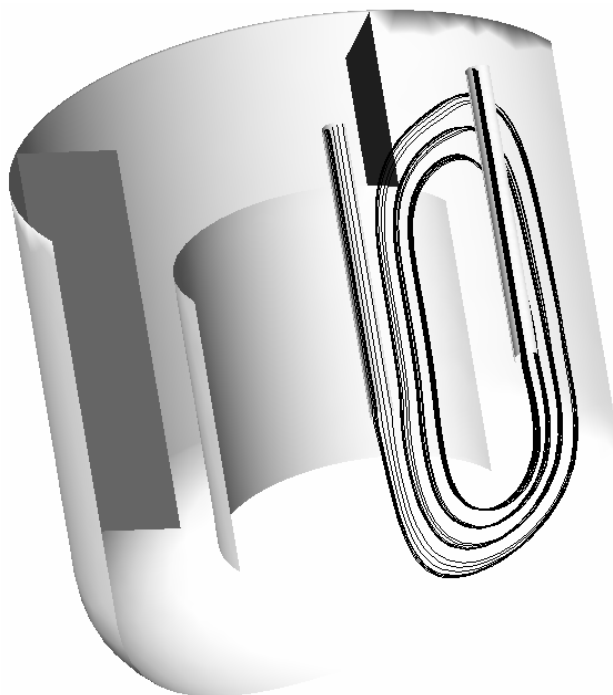
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อ พบว่ามีค่าเป็น 1.5422 ความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาจากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นรูปครความเร็ภายในถังตกผลึกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าความเร็วบริเวณใกล้ท่อ خروجมีค่าใกล้เคียงความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ การไหลเข้าสู่ปากท่อน้อยมาก เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.19 พบว่าบริเวณเส้นแนวการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อมักมีขนาดใกล้เคียงกับความบริเวณเส้นแนวการไหลภายในท่อ แต่ไม่แตกต่างจากกรณีแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $15000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ มากนัก กรณีนี้ถือว่าการ خروجมีลักษณะใกล้เคียงกับการ خروجแบบไอโซโคเนติกส์มาก นอกจากนี้พบว่าความเร็วการไหลภายในถังตกผลึกมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.20 โดยความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณภายในท่อตรงๆ เมื่อของไหลไหลผ่านส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และไหลวนกลับไปด้านนอกของซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่าทำให้ความเร็วภายนอกท่อตรงๆมีค่าต่ำกว่า ส่วนบริเวณจุดศูนย์กลางของถังซึ่งความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวผนังยังคงมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้างเช่นเดียวกับกรณีแหล่งกำเนิดโมเมนตัมอื่น ๆ



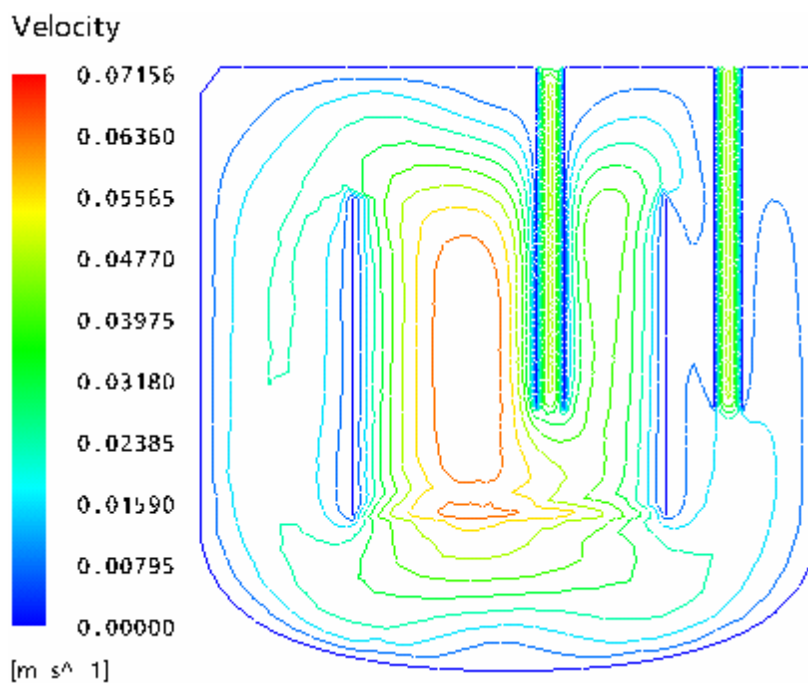
รูปที่ 4.17 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.18 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อออกที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



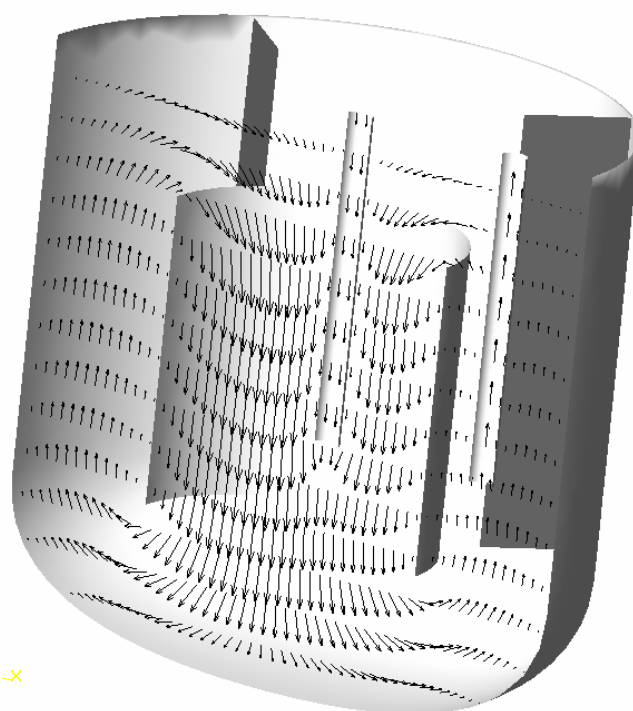
รูปที่ 4.19 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนต์ = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



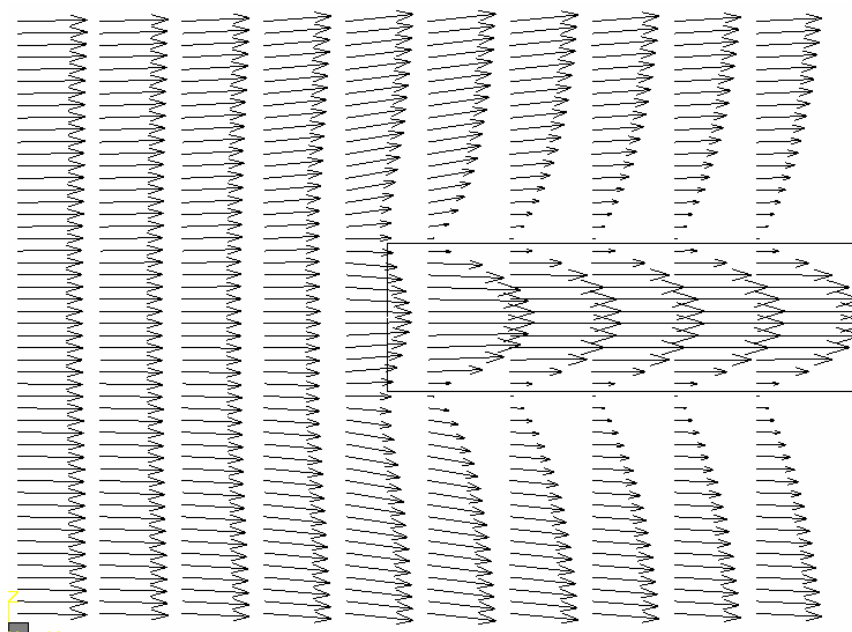
รูปที่ 4.20 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนต์ = $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.6 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

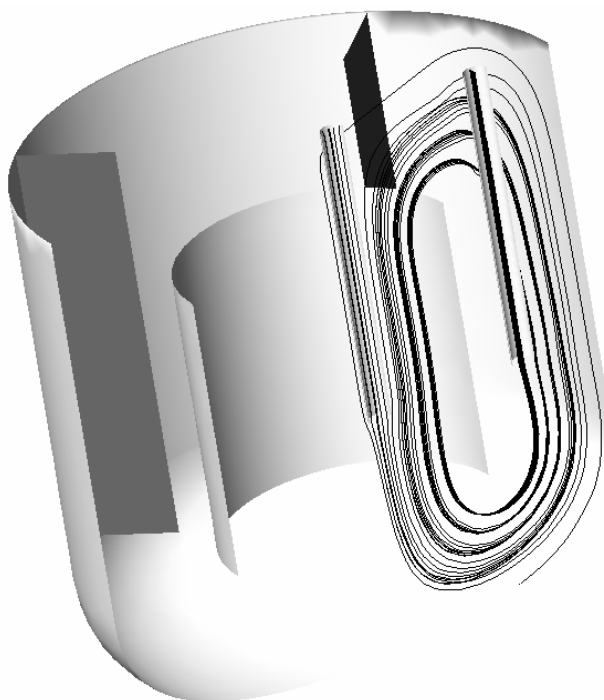
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อนำ พบว่ามีค่าเป็น 2.3774 พิจารณาจากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นรูปสรความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ รูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าความเร็วบริเวณใกล้ท่อคูดอกมีค่าสูงกว่าความเร็วภายในท่อ ซึ่งยังทำให้มองเห็นการไหลเบี่ยงออกจากปากท่อเล็กน้อย ซึ่งถือว่าไม่เป็นการคูดอกแบบไอโซไคนติกส์ แต่ก็มีความใกล้เคียง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.23 พบว่าบริเวณเส้นแนวการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อมีวงแคบ ความเร็วการไหลภายในถังตกผลึกยังคงมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.24 โดยความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณภายในท่อตราฟต์ เมื่อของไหลไหลผ่านส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และไหลวนกลับไปด้านนอกของท่อตราฟต์ ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่าทำให้ความเร็วภายนอกท่อตราฟต์มีค่าต่ำกว่าส่วนที่บริเวณจุดศูนย์กลางของถังถึงซึ่งความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น พบว่ามีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง



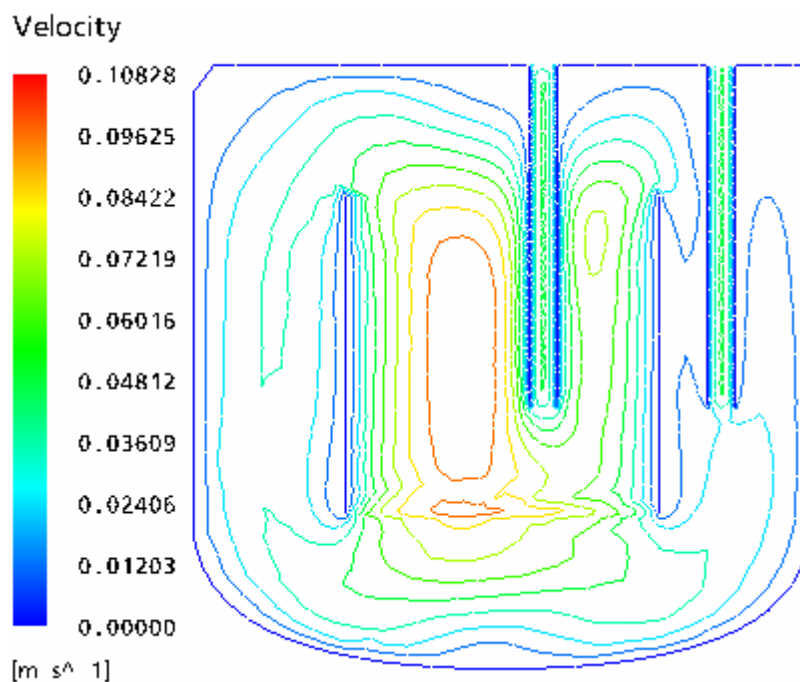
รูปที่ 4.21 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.22 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อจุดออกที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



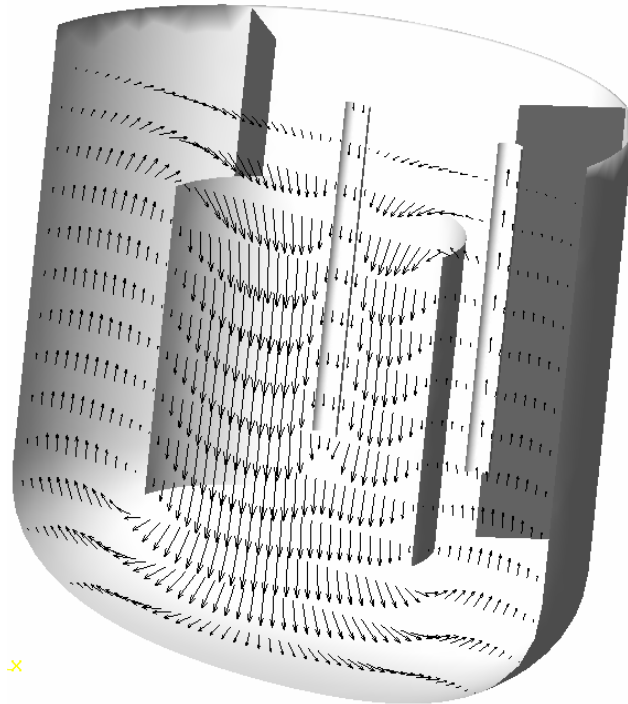
รูปที่ 4.23 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



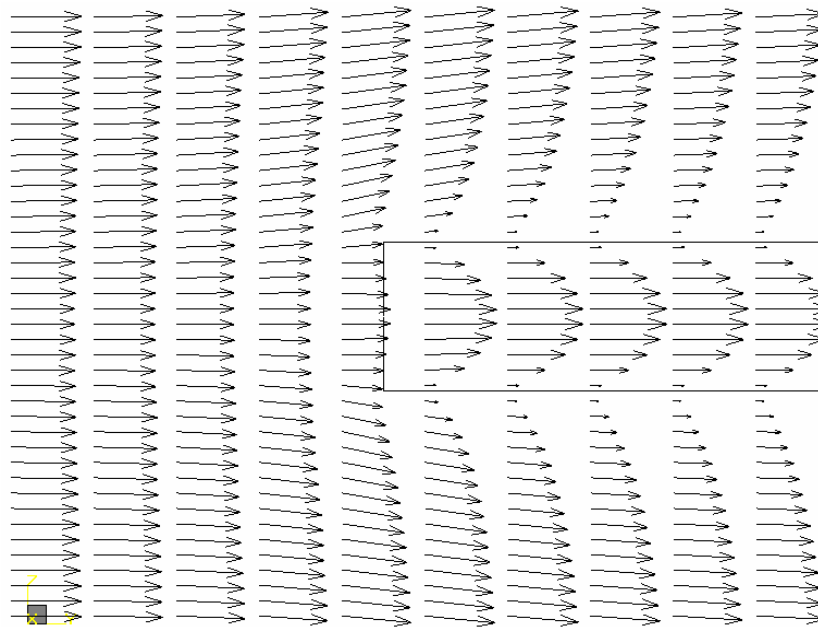
รูปที่ 4.24 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $30000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.1.7 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

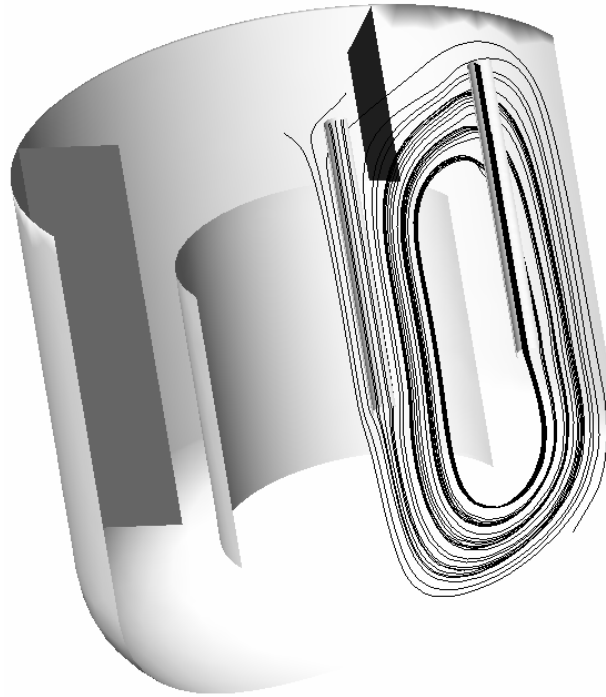
จากผลการจำลองการไหลภายในถังตกผลึกที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายในท่อนำ พบว่ามีค่าเป็น 3.5723 พิจารณาจากรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นรูปสรความเร็วภายในถังตกผลึกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าความเร็วบริเวณใกล้ท่อ خروجมีค่าสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยภายในท่ออย่างชัดเจน และการไหลมีแนวโน้มเบี่ยงออกจากปากท่ออย่างเด่นชัด ซึ่งถือว่าการดูดออกไม่เป็นไอโซโคเนติกส์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 พบว่าบริเวณเส้นแนวการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อมังแคบ ความเร็วการไหลภายในถังตกผลึกยังคงมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วในรูปที่ 4.28 โดยความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณภายในท่อกราฟต์ เมื่อของไหลไหลผ่านส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดโมเมนตัม และไหลวนกลับไปด้านนอกของท่อกราฟต์ ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่าทำให้ความเร็วภายนอกท่อกราฟต์มีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้พบว่าบริเวณจุดศูนย์กลางของกันถังซึ่งความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นพบว่ามีความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง



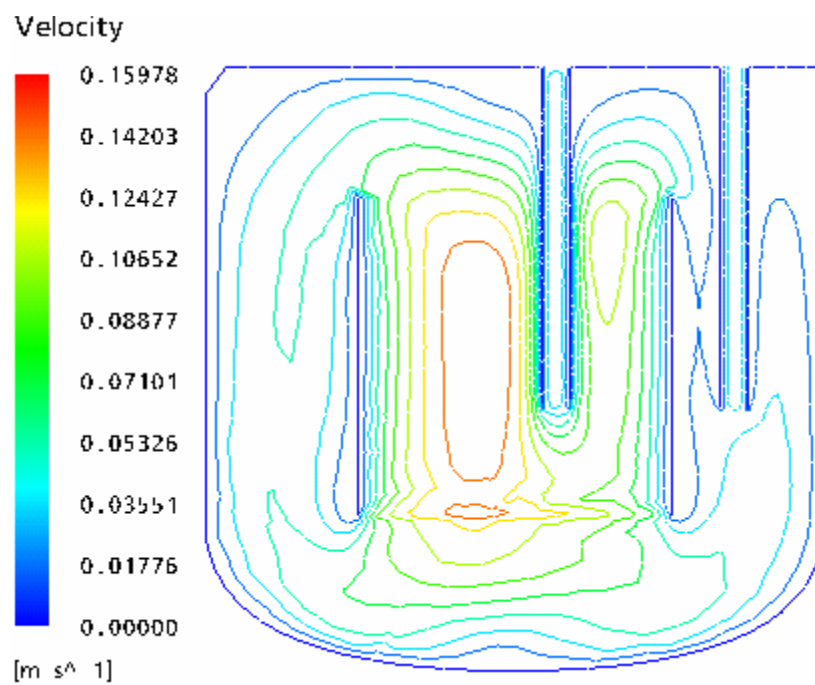
รูปที่ 4.25 รูปสรความเร็วที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.26 รูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อจุดออกที่แหล่งกำเนิดโมเมนตัม = $50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.27 เส้นแนวการไหล ที่แหล่งกำเนิด โมเมนตัม $= 50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$



รูปที่ 4.28 คอนทัวร์ของขนาดของความเร็วของการไหลในถังตกผลึก
ที่ค่าแหล่งกำเนิด โมเมนตัม $= 50000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$

4.2 อภิปรายผลการจำลอง

4.2.1 ความเป็นเอกรูปของการไหลภายในถังตกผลึก

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขภายในถังตกผลึกพบว่าการไหลภายในถังตกผลึกยังไม่มีความเป็นเอกรูปในทุกค่าของแหล่งกำเนิดโมเมนตัม พิจารณาจากรูปที่ 4.1 4.5 4.9 4.13 4.17 4.21 และ 4.25 ซึ่งแสดงรูปสรความเร็วภายในถังตกผลึกพบว่าความเร็วภายในท่อคราฟต์มีค่าสูงกว่าความเร็วภายนอกท่อคราฟต์ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดภายในท่อคราฟต์มีค่าน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดภายนอกนั่นเอง พิจารณาจากรูปเส้นคอนทัวร์ของขนาดของความเร็วที่ทุกค่าของโมเมนตัม สังเกตได้ว่าที่ก้นถังบริเวณจุดศูนย์กลาง จะมีความเร็วต่ำทำให้สามารถเกิดการตกตะกอนของผลึกและจับกันเป็นก้อนแข็งได้ ถึงแม้ว่าก้นของถังจะมีลักษณะโค้งแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยปรับลักษณะของก้นถังโดยเพิ่มวัสดุรูปกรวยเข้าไปแทนที่บริเวณที่มีความเร็วต่ำนั้น

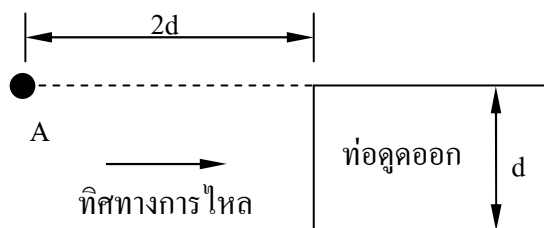
จากรูปที่ 4.4 4.8 4.12 4.16 4.20 4.24 และ 4.28 จะเห็นว่าการเพิ่มขนาดของแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลมากนัก แต่ทำให้ค่าความเร็วที่ได้เปลี่ยนไป โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็น $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ขึ้นไป จะเห็นว่าลักษณะการไหลมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันมาก นั่นคือช่วงของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ให้เข้าไปไม่มีผลต่อรูปแบบการไหล แต่จะมีผลต่อความเร็วของของไหลภายในถังตกผลึก

4.2.2 ความเป็นไอโซโคเนติกส์ในการดูดออก

พิจารณารูปสรความเร็วบริเวณใกล้ปากท่อดูดออก จะเห็นว่าผลการจำลองที่ค่าโมเมนตัมเป็น 0 และ $1000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ (รูปที่ 4.2 และ 4.6) ความเร็วภายในถังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วในท่อดูดออกและท่อนำเข้า การไหลมีลักษณะลู่เข้าหาท่อดูดออกเป็นวงกว้างอย่างชัดเจน ซึ่งไม่เป็นการดูดออกแบบไอโซโคเนติกส์ ในกรณีที่เพิ่มค่าโมเมนตัมเป็น 10000 15000 และ 18000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ (รูปที่ 4.10 4.14 และ 4.18) ความเร็วภายนอกท่อดูดออกจะเพิ่มขึ้นมากกว่าสองกรณีแรก และพบว่ามีการลู่เข้าของเส้นแนวการไหลบริเวณปากท่อน้อยลงเป็นลำดับ นั่นคือการไหลเข้าใกล้การดูดออกแบบไอโซโคเนติกส์มากขึ้น

ในขณะที่ค่าโมเมนตัม 30000 และ 50000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ นั้น พบว่าการไหลบริเวณปากท่อกมีการบานออกอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.22 และ 4.26

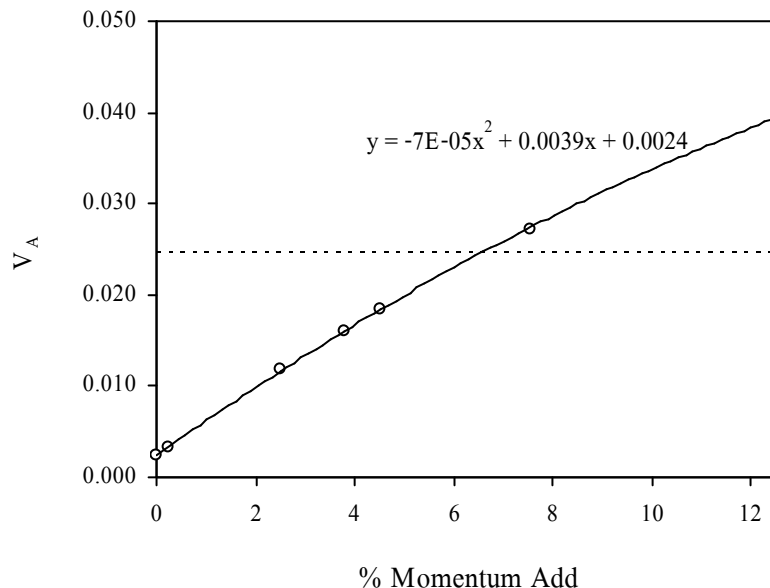
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ให้ กับ ความเร็ว และความดัน ที่จุด A ซึ่งห่างจากปากทางเข้าของท่อดูดออกเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งของจุด A

พบว่าความเร็วที่จุด A สัมพันธ์กับค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ให้งรูปที่ 4.30 เส้นประในแผนภาพแสดงความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ (0.0245859 m/s) ซึ่งหากจุด A มีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วดังกล่าวก็จะทำให้การดูดออกเข้าใกล้การดูดออกแบบไอโซโคเนติกส์มากขึ้น จากแผนภาพนี้พบว่าค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่เหมาะสมอันจะทำให้จุด A มีค่าความเร็วดังกล่าวและเข้าใกล้การดูดออกแบบไอโซโคเนติกส์มากที่สุดคือ

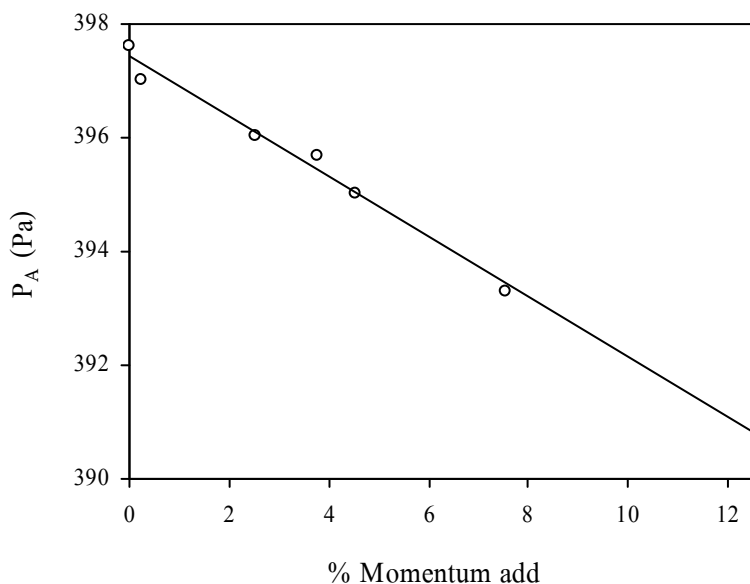
จุดที่เส้นประและเส้นแนวโน้มของความเร็วตัดกันพอดี อยู่ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเท่ากับ 6.431 % ของค่าโมเมนตัมเริ่มต้น



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ตำแหน่ง A กับค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

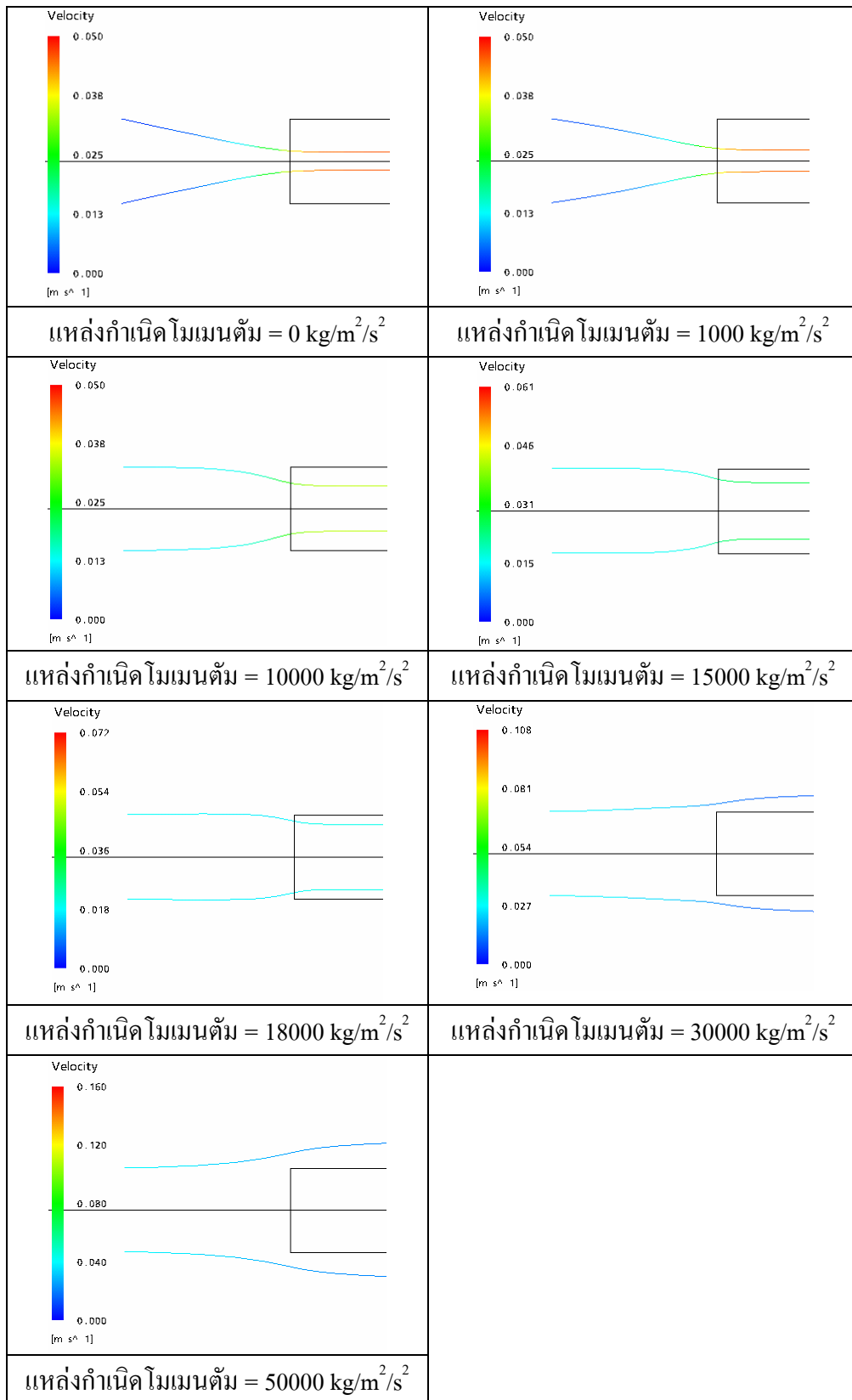
ในขณะที่ความดันที่จุด A แปรไปตามค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ให้เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.31 โดยความดันมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ซึ่งผลที่ได้สัมพันธ์

กับความเร็วที่ได้จากการจำลองและสอดคล้องกับสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli equation) กล่าวคือ ความดันภายในท่อนำมีค่าลดลงเมื่อความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของท่อยังคงเดิม



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่ง A กับค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

เส้นแนวการไหลจากจุด A ที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ให้แตกต่างกันมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.32 หากพิจารณาจากความเร็ว พบว่าที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 18000 และ 30000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ จะให้ค่าความเร็วที่จุด A เป็น 0.0185 m/s และ 0.0273 m/s ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัม 30000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ นั้นให้ค่าของความเร็วที่จุด A ใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยภายในท่อมากกว่าค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 18000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ แต่เมื่อพิจารณาจากเส้นแนวการไหลจะเห็นว่าที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม 30000 $\text{kg/m}^2/\text{s}^2$ มีการบานออกของเส้นแนวการไหลมากขึ้นน่าจะเกิดจากผลกระทบของผนังของผิวที่ที่ไม่มีการไหลเกิดขึ้น ทำให้เส้นแนวการไหลบานออกมากขึ้นเนื่องจากเกิดการตีบคานของโมเมนตัมจากผนังท่อและเกิดขึ้นชิดผิวขึ้นที่ผนังท่อ ดังกล่าว



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบเส้นแนวการไหลที่จุด A เมื่อค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเปลี่ยนไป

4.3 สรุป

4.3.1 การจำลองการตกผลึกภายในถังตกผลึกน้ำตาลแบบทำความเย็นนี้ แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการไหลที่มีลักษณะไม่เป็นเอกรูปไม่ว่าจะให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็นเท่าใดก็ตาม

4.3.2 เมื่อพิจารณาการไหลอันเนื่องมาจากคูดอกพบว่าที่ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่ต่ำเกินไป การไหลจะมีลักษณะลู่เข้าหาท่อคูดอก ส่วนในกรณีที่ค่าโมเมนตัมสูงเกินไป จะทำให้การไหลเกิดการเบี่ยงเบนออกจากท่อคูดอกอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งไม่เป็นการคูดอกแบบไอโซโคเนติกส์จากการจำลองผลพบว่า ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเท่ากับ $18000 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ ทำให้การไหลมีลักษณะใกล้เคียงกับการคูดอกแบบไอโซโคเนติกส์ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี

4.3.3 จะเห็นได้ว่า การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองการไหลในถังตกผลึกนั้นทำให้สามารถทำนายคุณลักษณะการไหลภายในถัง ณ จุดต่าง ๆ และช่วยให้สามารถกำหนดจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบการตกผลึกง่ายและรวดเร็วขึ้น ตลอดจนสามารถช่วยลดต้นทุนในการทดลอง ผลจากการจำลองนี้สามารถนำไปใช้พิจารณาเพื่อออกแบบหรือปรับปรุงกระบวนการตกผลึกของน้ำตาลให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพต่อไป อย่างไรก็ตาม การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังมีข้อจำกัด ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของตัวประมวลผลจะมีความเร็วและความถูกต้องสูง การตั้งสมมติฐานที่รัดกุมและเหมาะสมเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนตลอดจนเวลาในการคำนวณ เช่น การกำหนดให้การตกผลึกเป็นแบบอนุกรมมิกซ์ และไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เป็นปัจจัยสำคัญในการจำลองผลของระบบการตกผลึกนี้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในถังตกผลึกมากที่สุด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองการไหลให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัย ข้อดีและข้อเสียของการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป ตลอดจนข้อเสนอแนะในปรับปรุงงานวิจัยชิ้นนี้ต่อไป โดยในหัวข้อ 5.1 จะกล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัย และในหัวข้อที่ 5.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การไหลในถังตกผลึกน้ำตาลที่จำลองผลขึ้นมานี้มีลักษณะไม่เป็นเอกรูปถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้ง Baffle และ ท่อกราฟต์แล้วก็ตาม

5.1.2 ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่เปลี่ยนไป มีผลต่อการดูดออกแบบไอโซโคเนติกส์ ซึ่งที่ค่าโมเมนตัมน้อย ๆ จะทำให้ผลึกขนาดเล็ก ๆ ไหลเข้าสู่ท่อมากเกินไป และอาจทำให้การไหลมีแรงผลักดันไม่พอที่จะทำให้ผลึกขนาดใหญ่ลอยเข้าท่อดูดออกได้ ทำให้เกิดการตกตะกอนไปรวมกันที่ก้นถังและจับกันเป็นก้อนแข็งได้ ในทางกลับกันการกำหนดค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่มากเกินไปก็จะให้ผลตรงกันข้ามคือการไหลจะมีแนวโน้มที่จะไหลออกจากปากท่อ ผลึกขนาดเล็ก ๆ จะลอยตามเส้นแนวการไหลและเข้าสู่ปากท่อน้อย ส่วนผลึกขนาดใหญ่กว่า จะไหลเข้าปากท่อได้ ผลกระทบจากการไหลที่เกี่ยวข้องกับการดูดออกทั้งสองประเภทนี้ไม่เป็นผลดีต่อกระบวนการผลิตผลึก เนื่องจากจะทำให้เกิดการแยกขนาดของผลึกภายในถัง และยากต่อการควบคุมกระบวนการตกผลึกให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง

5.1.3 ผลกระทบอย่างอื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่มากเกินไป ได้แก่ การส่งผลให้เกิดการแตกหักของผลึก ซึ่งเกิดเนื่องจากการกระทบกันระหว่างผลึกกับใบพัดผลึกกับผลึกด้วยกัน หรือผลึกกับภาชนะ การแตกหักดังกล่าวก็จะส่งผลกระทบต่อเกรดของผลึก ทำให้ได้ผลผลิตผลึกที่มีคุณภาพต่ำ การให้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่มากเกินไปนอกจากจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตผลึกแล้วยังจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิตอีกด้วย

5.1.4 การทำวิจัยโดยนำความรู้เกี่ยวกับ CFD มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การไหลถังตกผลึกทำให้สามารถประหยัดต้นทุนในการทำวิจัยโดยได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ และลดความยุ่งยากใน

การวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในถังตกผลึกซึ่งเดิมจะได้จากการทำการทดลอง และในหลายกรณีไม่สามารถทำการวัดค่าได้อย่างละเอียดทั่วทั้งโดเมน นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์เพื่อออกแบบถังตกผลึกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

5.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาค โดยการจำลองอนุภาคลงไปในระบบด้วย เพื่อให้เห็นผลอย่างชัดเจน ว่าขนาดและความหนาแน่นของผลึกมีผลต่อการไหลภายในถังตกผลึกอย่างไรบ้าง และการไหลสามารถนำอนุภาคลอยเข้าสู่ท่อทางออกได้หรือไม่

5.2.2 ศึกษาลักษณะของใบพัดที่ใช้ในการกวนสารแต่ละประเภทว่ามีความสามารถในการกวนสารละลายภายในถังแตกต่างกันอย่างไร เพื่อการปรับปรุงลักษณะของใบพัด หรือการเลือกใช้ประเภทของใบพัดที่เหมาะสมที่จะทำให้ประหยัดพลังงานมากที่สุดและได้คุณภาพของผลึกที่ดี

5.2.3 ศึกษาผลกระทบจากการวางตำแหน่งของท่อดูดออก ทั้งความสูง และระยะจากจุดศูนย์กลาง รวมถึงรูปร่างของท่อ เพื่อให้ได้ลักษณะของท่อตำแหน่งที่เหมาะสมในการดูดออกมากที่สุด อันจะไม่ทำให้เกิดการแยกขนาดของผลึก

5.2.4 พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิในการจำลองการไหล เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้นในการทำนายค่าต่าง ๆ เนื่องจาก ในระบบที่ใหญ่ขึ้น การผสมกันภายในถังจะทำได้ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิในการตกผลึกในแต่ละตำแหน่งในถังอาจไม่เท่ากัน

5.2.5 ขยายขอบเขตในการใช้ CFD ไปสู่การจำลองการไหลของอุปกรณ์ตกผลึกที่มีใช้อยู่จริงในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบที่มีความจำเพาะเจาะจงในแต่ละปัญหามากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ทวิช จิตรสมบูรณ์. และ สุวรรณ อรรฐาเมศร์. (2000). โมย่า: โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์การไหล. **Suranaree Journal of Science and Technology** 7: 30-41.
- อัศวิทธิ์ ปัทมะเวณ. (2540). ตามรอยน้ำตาล เล่มที่3. ชุบน้ำตาลไม่รู้จัก. กรุงเทพฯ : ที.พี.พรินท์
- Bakker, A., Fasano, J. B., and Myers, K. J. (1994) Effects of Flow Pattern on the Solids Distribution in a Stirred Tank. In **8th European Conference on Mixing** (pp 1-8). Cambridge, U.K.: IChemE Symposium
- Bakker, A., LaRoche, R. D., Wang, M., and Calabrese, R. V. (1998). **Sliding Mesh Simulation of Laminar Flow in Stirred Reactors** [On-line]. Available: <http://www.bakker.org/cfm>.
- Barresi, A., and Baldi, G. (1987). Solid dispersion in an agitated vessel. **Chemical Engineering Science** 42: 2949-2956
- Brucato A., Micale, G., Montante, G. and Scuzzarella, A. (2002). **Experimental investigation and CFD simulation of dense solid-liquid suspensions in a fully baffled mechanically stirred tank** [On-line]. Available: <http://www.software.aeat.com/cfxcommunity>
- Buurman, C., Resoort, G., and Plaschkes, A., (1986). Scaling-up rules for solid suspension in stirred vessels. **Chemical Engineering Science** 41:2865-2871.
- Ginter, D. M., and Loyalka, S. K. (1996). Apparent size-dependent growth in aggregating crystallizers. **Chemical Engineering Science** 55(14): 3685-3695.
- Gros, H., Kilpio, T., and Nurmi, J. (2001). Continuous cooling crystallization from solution. **Powder Technology** 121: 106-155.
- Jaworski, Z., Nienow, A.W., Koutsakos, E., Dyster K., and Bujalski, W. (1991). An LDA Study of Turbulent Flow in a Baffled Vessel Agitated by a Pitched Blade Turbine. **Chemical Engineering Journal of Research and Development** 69: 313-320.
- Kramer, H. J. M., Dijkstra, J. W., Verheijen, P. J. T., and Van Rosmalen, G. M. (2000). Modeling of industrial crystallizers for control and design purposes. **Powder Technology**, 108: 185-191
- . Lamberto, D. J., Alvarez, M. M., and Muzzio, F. J. (1999). Experimental and computation investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. **Chemical Engineering Science** 54: 919-942 .

- Liiri, M., Koironen, T., and Aittamaa, J. (2002). Secondary nucleation due to crystal-impeller and crystal-vessel collisions by population balances in CFD-modelling. **Journal of Crystal growth** 237-239: 2188-2193.
- Liu, M., Andreasen, C.D., and Laroche, R. D. (2000) Visualization and quantification of laminar flow mixing in a stirred tank reactor. In B. Sen Gupta and S. Ibrahim (eds.). **Mixing and Crystallization** (15 27). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Maggioris, D., Goulas, A., Alexopoulos, A. H., Chatzi, E. G., and Kiparissides, C. (1998). Use of CFD in Prediction of Particle Size Distribution in Suspension Polymer Reactors. **An International Journal of Computer Applications in Chemical Engineering** 22: 315-22.
- Mathlouthi, M. (1995). **Sucrose: properties and applications**. New York : Blackie Academic & Professional.
- McCabe, and Warren, L. (1899). **Unit Operations of Chemical Engineering**. Singapore: McGraw-Hill.
- Mermann, A. (ed.). (2001). **Crystallization technology handbook**. New York : Mareel Dekker.
- Micale, G., and Montante, G. (1999). **On the simulation of two-phase solid-liquid stirred vessels** [On-line]. Available : <http://www.software.aeat.com/cfxcommunity>
- Montante, G., Lee, K. C., Brucato, A., and Yianneskis, M. (2001). Experiments and predictions of the transition of the flow pattern with impeller clearance in stirred tanks. **Chemical Engineering Science** 25: 729-735.
- Montante, G., Lee, K. C., Brucato, A., and Yianneskis, M. (2001). Numerical simulation of the dependency of flow pattern on impeller clearance in stirred vessels. **Chemical Engineering Science** 56: 3751-3770.
- N'yvlt, J. (1992). **Design of Crystallizers**. United State: CRC Press
- Nasr-El-Din, H. A., Mac Taggart, R. S., and Masliyah, J. H. (1996). Local solids concentration measurement in a slurry mixing tank. **Chemical Engineering Science** 51 (8): 1209-1220
- .Nasr-El Din, H. A., Mac Taggart, R. S., and Masliyah, J. H. (1996). Local solid concentration measurement in a slurry mixing tank. **Chemical Engineering Science** 51: 1209-1220.
- Ohtaki, H. (1998). **Crystallization Process**. Japan : Wiley.
- Pennington, N. L., and Baker, C. W. (eds.). (1990). **Sugar a user guide to sucrose**. New York: Van Nostrand Reinhold.

- Rigby, G. D., Lane, G., and Evans, G. M. (2000) CFD modeling of hydrodynamic conditions within the wake of mixing impeller blades. In B. Sen Gupta and S. Ibrahim (eds.). **Mixing and Crystallization** (1-13). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Sahu, A. K., Kumar, P., Patwardhan, A. W., and Joshi, J.B. (1999). CFD modeling and mixing in stirred tanks. **Chemical Engineering Science** 54: 2285-2293
- Sha, Z. and Palosaari, S. (2000) Mixing and crystallization in suspensions. **Chemical Engineering Science** 55: 1797-1896.
- Sha, Z. Oinas, P. Louhi-Kultance, M. Yang G., and Palosaari, S. (2000) Application of CFD simulation to suspension crystallization-factors affecting size-dependent classification, **Powder Technology** 121: 20-25
- Sha, Z. Palosaari, S. Oinas, P., and Ogawa, K. (2001) CFD Simulation of Solid suspension in a stirred tank, **Journal of Chemical Engineering of Japan** 34(5): 621-626
- Shamlou, P., A, and Koutsakos, E. (1989). Solids suspension and distribution in liquids under turbulent agitation. **Chemical Engineering Science**, 44(3): 529-542.
- Shamlou, P., Ayazi, and Koutsakos, E. (1989). Solids suspension and distribution in liquids under turbulent agitation. **Chemical Engineering Science** 44(3): 529-542
- Shaw, C. T. (1992). **Using computational fluid Dynamics**. UK : Printice Hall International.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (1995). **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method**. Malaysia: Longman Scientific & Technical.
- White, F. M. (1994). **Viscous Fluid Flow**. Singapore: McGraw-Hill.
- White, F. M. (1999). **Fluid Mechanics**. Singapore: McGraw-Hill.

ภาคผนวก ก

โครงสร้างและการทำงานของโปรแกรม CFX 5

CFX 5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน และอื่น ๆ โดยอาศัยการแก้สมการการไหลของของไหล (ในรูปพิเศษ) ในบริเวณที่สนใจ การทำงานของโปรแกรม CFX มีขั้นตอนของการทำงานแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ก.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการกำหนดข้อมูลของปัญหาก่อนที่จะส่งไปทำการคำนวณ โดยจะเกี่ยวข้องกับข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

- การกำหนดลักษณะรูปร่างของปัญหา (ในโปรแกรม CFX การกำหนดรูปร่างของปัญหาจะต้องอยู่บนพื้นฐานของสามมิติเท่านั้น)
- การระบุเงื่อนไขค่าขอบของปัญหา และค่าเริ่มต้น
- การสร้างกริดภายในโดเมน
- การกำหนดคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความดันอ้างอิง เป็นต้น

ก.2 ขั้นตอนการประมวลผล (Processing)

ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการแก้ปัญหา และหาคำตอบของปัญหาออกมา โดยมีขั้นตอนการทำงานแยกเป็นข้อย่อย ๆ ได้ดังนี้

- สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจะถูกอินทิเกรตและประยุกต์เข้ากับแต่ละปริมาตรจำกัดเล็ก ๆ ที่ถูกแบ่ง
- สมการที่ถูกอินทิเกรตดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนไปเป็นระบบสมการพีชคณิต ระบบสมการพีชคณิตเหล่านั้นจะถูกแก้โดยกระบวนการคำนวณซ้ำ การแก้ไขปัญหาโดยการคำนวณซ้ำ ๆ จะสิ้นสุดลงเมื่อเกิดการลู่เข้า หรือผู้ใช้สั่งให้โปรแกรมหยุดทำการคำนวณ การคำนวณซ้ำแต่ละรอบจะรายงานผลของค่าความผิดพลาด คำตอบที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงหรือไม่ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าต่าง ๆ ภายในโดเมน การเลือกใช้วิธีการคำนวณที่เหมาะสม การกำหนดกริด ตลอดจนการให้ค่าเงื่อนไขขอบและค่าเริ่มต้นในการคำนวณ หลังจากการคำนวณเสร็จสิ้น โปรแกรมจะทำการบันทึกผลการคำนวณซึ่งจะถูกส่งต่อไปที่ส่วนของการแสดงผลต่อไป

ก.3 ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processing)

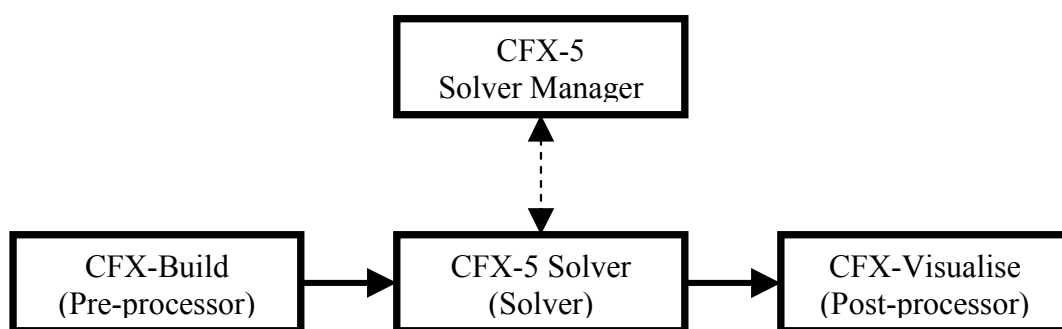
เป็นขั้นตอนสุดท้ายของโปรแกรม ซึ่งจะนำค่าที่ได้จากขั้นตอนการประมวลผลมาแสดง โปรแกรม CFX สามารถแสดงผลได้ในรูปแบบดังต่อไปนี้

- รูปร่างของโดเมน และปริมาตรจำกัดเล็ก ๆ ตลอดจนกริดที่แบ่งได้
- รูปสรความเร็ว แสดงทิศทางและขนาดของความเร็ว
- ตัวแปรสเกลาร์ต่าง ๆ เช่นความดัน และความเร็ว
- เส้นแนวการไหล
- เส้นคอนทัวร์
- พื้นผิว
- การเปลี่ยนตำแหน่ง เช่นการหมุน การเคลื่อนตัวของของไหลภายในโดเมน

CFX 5 ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยทั้งหมด 4 โปรแกรมด้วยกัน โดยโปรแกรมทุกส่วนจะทำงานประสานกัน ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ขั้นตอนก่อนการประมวลผลจนกระทั่งสิ้นสุดขั้นตอนการแสดงผล โปรแกรมทั้งสี่ส่วนดังกล่าวได้แก่

- CFX-Build (Pre-processor)
- CFX-5 Solver (Solver)
- CFX-5 Solver Manager (CFD job manager)
- CFX-Visualise (Post-processor)

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมมีความสัมพันธ์กันดังแผนภาพในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การเชื่อมโยงกันของโปรแกรมย่อย

จากรูปที่ ก.1 CFX-5 Solver Manager เป็นโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ใช้ และแสดงผลการรู้เข้าค่าความผิดพลาดในแต่ละรอบที่คำนวณ ตลอดจนข้อมูลต่าง ๆ ก่อนการคำนวณที่จะถูกส่งเข้าสู่

กระบวนการประมวลผลในโปรแกรม CFX-5 Solver และผลการคำนวณบางส่วนเมื่อสิ้นสุดการคำนวณ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกบันทึกลงในไฟล์ชนิดหนึ่งเรียกว่า Output file ไฟล์ดังกล่าวสามารถเรียกขึ้นมาเพื่อตรวจสอบข้อมูลการป้อนเข้าตลอดจนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้โดยใช้โปรแกรม Text editor ที่มีอยู่โดยทั่วไป

ภาคผนวก ข
การทดสอบโปรแกรม

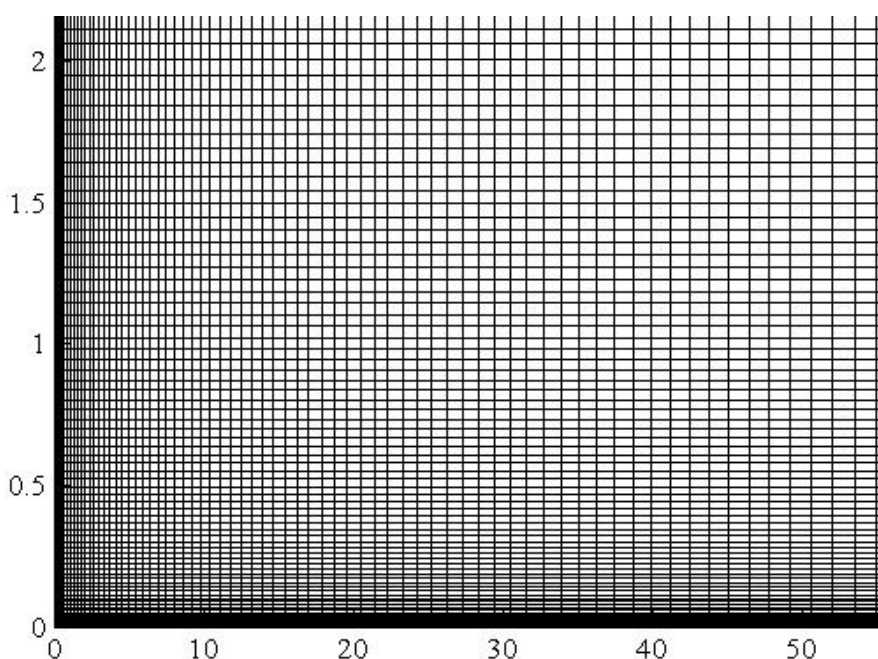
ข.1 การไหลในชั้นผิวบางในย่านความเร็วต่ำ

ข.1.1 โดเมนและปัญหา

การไหลนี้เป็นการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ ซึ่งมีคำตอบทางทฤษฎีที่เรียกว่าคำตอบของบลาลเซียส รูปแบบของโดเมนที่ใช้ทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์และการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ เป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อที่ 3.1.1 จากนั้น ทำการประมาณค่าความหนาของชั้นขีดผิวโดยใช้ความสัมพันธ์ $\delta = 5.5x / \sqrt{Re_x} \approx 0.0075$ (White, 1991) เพื่อใช้กำหนดความสูงของโดเมนในแนวแกน y โดยกำหนดให้มีค่าเป็น 5δ หรือ 3.75 mm ซึ่งที่ความสูงดังกล่าวถือว่ามีความสูงพอที่จะไม่ได้รับผลกระทบจากความหนืด

ข.1.2 เมช

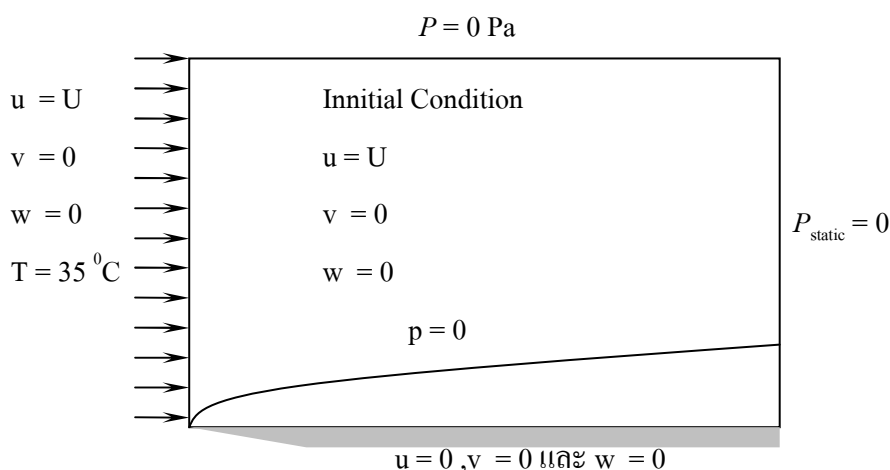
เมชภายในโดเมนถูกแบ่งให้มีความหนาแน่นสูงในบริเวณของชั้นผิวบางและบริเวณทางเข้าเพื่อให้สามารถแก้สมการได้อย่างถูกต้องในย่านใกล้แผ่นเรียบซึ่งการไหลมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมากกว่าบริเวณที่ห่างออกไป โดยกำหนดจำนวนเมช ทั้งหมด 100 เมช ในแนวแกน x โดยให้เมชมีการขยายขนาดขึ้นแบบเชิงเส้น โดยที่เมชสุดท้ายมีขนาดเป็น 260 เท่าของเมชแรก ในแนวแกน y กำหนดให้มีจำนวนเมชทั้งหมด 100 เมช มีการขยายขนาดขึ้นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน เมชสุดท้ายมีขนาดเป็น 600 เท่าของเมชแรก ส่วนในทางแกน z มีความหนา 1 เมช มีความหนาในแนวพุ่งออกจากหน้ากระดาษเท่ากับ 0.5 mm ลักษณะของเมชที่ได้แสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 เมชในแนวแกน x และแกน y (บางส่วน) สำหรับปัญหาการไหลในชั้นผิวบาง

ข.1.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบเป็นดังนี้ ตำแหน่งทางเข้าถูกกำหนดให้มีความเร็วขนานกับแผ่นเรียบและเป็นความเร็วค่าเดียว (White, 1994) มีค่า 70.36 m/s ความเร็วในทิศทางอื่นมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนความดันนั้นถือว่าเป็นค่าขอบที่จะได้จากการจำลองโดยการทำให้ Extrapolate ตำแหน่งทางออกกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นประเภท Outlet (Extrapolate) โดยให้มีความดันเป็น 0 เมื่อเทียบกับความดันอ้างอิง ความเร็วทุกทิศทางถือว่าเป็นค่าขอบของการจำลองโดยการ Extrapolate เช่นเดียวกันกับขอบเขตของโดเมน ส่วนเงื่อนไขค่าขอบที่ผิวของแผ่นเรียบกำหนดให้เป็นผนังที่ไม่มี การไหลของของไหล ดังนั้นความเร็วที่ผนังนี้มีค่าเป็นศูนย์ทุกทิศทาง สำหรับพื้นผิวที่ขนานกับหน้ากระดานทั้งด้านหน้าและด้านหลัง กำหนดให้เป็นผิวสมมาตร (Symmetry plane) ซึ่งมีความเร็วในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวดังกล่าวเป็นศูนย์ และค่าของตัวแปรที่อยู่ภายนอกโดเมนมีค่าเท่ากับค่าที่อยู่ภายในโดเมนเสมือนว่าผิวดังกล่าวเป็นกระจกสะท้อนอยู่ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของการทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 เงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นเรียบ

ค่าเริ่มต้นในการคำนวณภายในโดเมนกำหนดให้ความเร็วทิศขนานกับการไหล (แกน x) มีค่าเท่ากับความเร็วเริ่มต้นคือ 70.36 m/s ส่วนความเร็วในแกนที่เหลือ (แกน y และ z) และความดัน มีค่าเป็นศูนย์ตลอดโดเมน

ข.2 การไหลผ่านแผ่นขนานแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

ข.2.1 โดเมนและปัญหา

การไหลนี้เป็นการไหลแบบความเร็วขนาน ผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการไหลประเภทนี้สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการนาเวียร์-สโตก โดยตรงซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ 3.1 ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และเพื่อความต่อเนื่องของการพิจารณาสมการที่เกี่ยวข้อง จึงได้นำเสนอสมการนี้อีกครั้ง ดังนี้

$$u = -\frac{dP}{dx} \frac{h^2}{2\mu} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) \quad (\text{ข.1})$$

ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ (u_{av}) คือ ปริมาตรการไหลต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งมีค่าดังสมการ ข.2 (White, 1994)

$$u_{av} = \frac{-h^2}{3\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{2}{3} u_{max} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ u_{max} คือค่าความเร็วสูงสุดในท่อซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $h = 0$ m จากสมการ ข.1 และ ข.2 คำนวณเกรเดียนต์ของความดันได้ดังสมการ ข.3

$$\frac{dp}{dx} = \frac{3\mu u_{av}}{h^2} \quad (\text{ข.3})$$

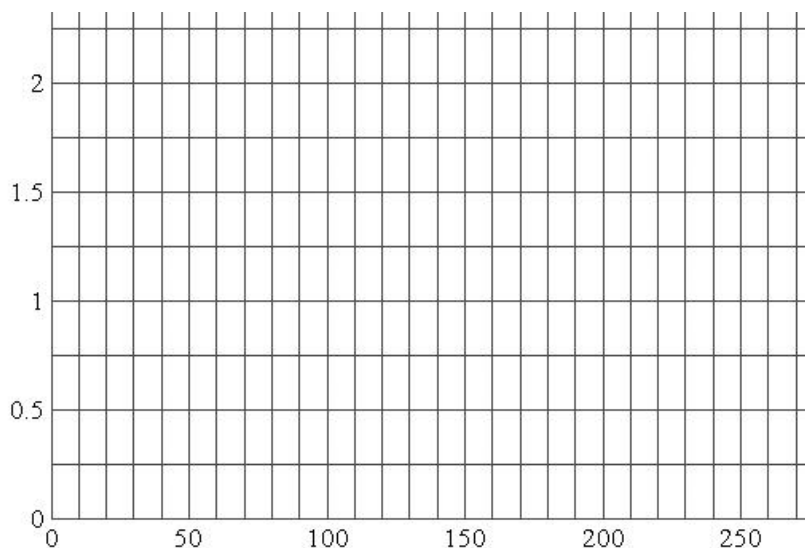
ค่า Reynold number (Re) คำนวณได้จากสมการ ข.4 (Kays และ Crawford, 1996)

$$\text{Re} = \frac{\rho u_{av} (2h)}{\mu} \quad (\text{ข.4})$$

รายละเอียดต่าง ๆ ของโดเมนได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1.2 และในรูปที่ 3.4

ข.2.2 เมช

เมชในการไหลนี้ถูกกำหนดให้เป็นเมชเอกรูป (Uniform Grid) มีจำนวนเมชในแกน x แกน y และแกน z เป็น 50 20 และ 1 เมช ตามลำดับ ลักษณะของเมชที่ได้เป็นดังรูปที่ ข.3

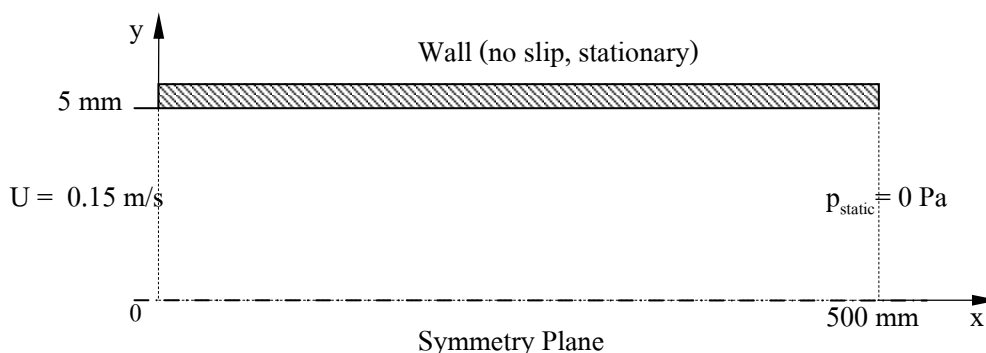


รูปที่ ข.3 เมช (บางส่วน) สำหรับปัญหาการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานภายใต้ความดัน

ข.2.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้น

การคำนวณในขั้นต้นได้ประมาณความเร็วเฉลี่ยภายในท่อให้มีค่าเป็น 0.15 m/s ซึ่งจะทำให้ Reynold number (Re) มีค่าเป็น 100 ค่า Re ดังกล่าวถือว่ายังอยู่ในช่วงการไหลที่เป็น laminar (White, 1994) จากค่าความเร็วเฉลี่ยภายในท่อที่ประมาณดังกล่าว สามารถนำไปคำนวณหาความเร็วสูงสุดในท่อและเกรเดียนต์ของความดันตามสมการ ข.2 และ ข.3 ได้ 0.225 m/s และ 0.234 Pa ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ความแตกต่างของความดันที่ปากทางเข้าและทางออกของท่อ มีค่าเป็น 0.1755 Pa (ความแตกต่างของความดันสถิตมีค่าเท่ากับ 0.162)

ในการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโปรแกรม CFX ได้กำหนดให้ความเร็วที่ปากทางเข้าเป็นความเร็วค่าเดียวมีค่าเป็น 0.15 m/s ความเร็วในทิศทางที่เหลือกำหนดให้มีค่าเป็น 0 และความดันถือเป็นส่วนหนึ่งของการ Extrapolate เงื่อนไขค่าขอบที่ทางออกกำหนดให้มีความดันสถิตเป็น 0 เมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ส่วนความเร็วทุกทิศทางเป็นคำตอบของการคำนวณซึ่งได้จากการ Extrapolate ส่วนที่เป็นพื้นผิวแผ่นคู่ขนานกำหนดให้มีความเร็วที่ผิวสัมผัสมีค่าเป็น 0 ในทุกทิศทาง และความดันหาจากการ Extrapolate และเงื่อนไขค่าขอบที่เส้นสมมาตรที่แสดงในรูปตลอดจนพื้นผิวสมมาตรที่ขนานกับหน้ากระดาดทั้งด้านบนและด้านล่างกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบแบบผิวสมมาตร คือไม่มีฟลักซ์ไหลผ่านผิวดังกล่าว และผิวดังกล่าวทำหน้าที่เสมือนกระจกสะท้อนค่าภายนอกโดเมนให้เท่ากับค่าภายในโดเมน โดยลักษณะ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นไปตามรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานภายใต้ความดัน

ข.3 การไหลในท่อแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

ข.3.1 โดเมนและปัญหา

การไหลนี้เป็นการไหลแบบความเร็วขานาน ผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการไหลประเภทนี้สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการนาเวียร์-สโตคโดยตรงซึ่งจะได้คำตอบสมการที่ 3.2 ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และเพื่อความต่อเนื่องของการพิจารณาสมการที่เกี่ยวข้อง จึงได้นำเสนอสมการนี้อีกครั้ง ดังนี้

$$u = -\frac{dP}{dx} \frac{1}{4\mu} (R^2 - r^2) \quad (\text{ข.5})$$

ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ (u_{av}) คือ ปริมาตรการไหลต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งมีค่าดังสมการ ข.6 (White, 1994)

$$u_{av} = \frac{-R^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{1}{2} u_{max} \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อ u_{max} คือค่าความเร็วสูงสุดในท่อซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $r = 0$ m. จากสมการ ข.5 และ ข.6 คำนวณเกรเดียนต์ของความดันได้ดังสมการ ข.7

$$\frac{dp}{dx} = \frac{8\mu u_{av}}{R^2} \quad (\text{ข.7})$$

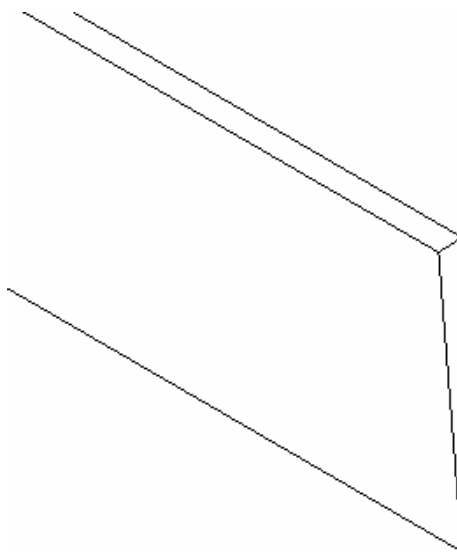
ค่า Reynold number (Re) หาได้จากสมการ ข.8 (Kays และ Crawford, 1996)

$$\text{Re} = \frac{\rho u_{av} (2r)}{\mu} \quad (\text{ข.8})$$

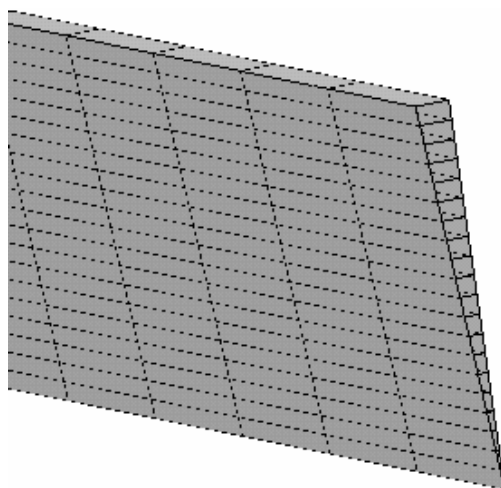
ในการคำนวณได้กำหนดค่าทุกคุณสมบัติเหมือนการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานทุกประการ ยกเว้นการกำหนดให้ท่อเป็นท่อกลม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 5 mm ความแตกต่างของความดันสถิตที่ขาเข้าและที่ขาออกถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันคือ 0.162 Pa รายละเอียดต่าง ๆ ของโดเมนได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1.3 และในรูปที่ 3.8

ข.3.2 เมช

เนื่องจากโดเมนเป็นทรงกระบอกซึ่งสมมาตรในแนวแกนที่ 3 (แกน z) ดังนั้นโดเมนสำหรับคำนวณจึงสามารถกำหนดเพียง 5 องศารอบแกน z เท่านั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลา และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ โดยเมชในแนวแกน x y และ z ถูกแบ่งออกเป็น 20 50 และ 1 เมช ตามลำดับ ลักษณะของโดเมนและเมชที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังรูปที่ ข.5 และ ข.6



รูปที่ ข.5 การแบ่งโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ (บางส่วน)

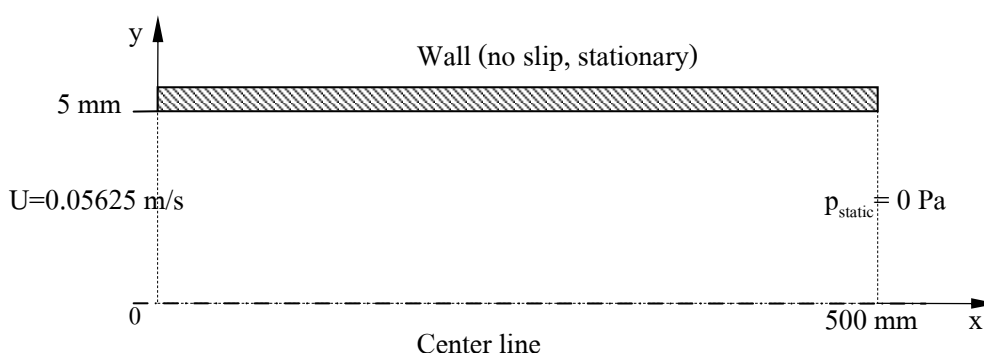


รูปที่ ข.6 ลักษณะของเมช (บางส่วน)

ข.3.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้น

จากการกำหนดค่าความแตกต่างของความดันให้มีค่าเท่ากับความแตกต่างของความดันที่ใช้ในปัญหาการไหลผ่านแผ่นคู่ขนาน ทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยภายในจากสมการ ข.6 ซึ่งมีค่าเป็น 0.05625 m/s และค่า Reynold number (Re) มีค่าเป็น 100 ค่า Re ดังกล่าวถือว่ายังอยู่ในช่วงการไหลที่เป็น laminar (White, 1994) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาความเร็วสูงสุดในท่อ ได้ 0.1125 m/s จากสมการ ข.5

ในการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโปรแกรม CFX ได้กำหนดให้ความเร็วที่ปากทางเข้าเป็นความเร็วค่าเฉลี่ยมีค่าเป็น 0.05625 m/s ความเร็วในทิศทางที่เหลือกำหนดให้มีค่าเป็น 0 และความดันถือเป็นส่วนหนึ่งของการ Extrapolate เงื่อนไขค่าขอบที่ทางออกกำหนดให้มีความดันสถิตเป็น 0 เมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ส่วนความเร็วทุกทิศทางเป็นคำตอบของการคำนวณซึ่งได้จากการ Extrapolate ส่วนที่เป็นผนังของท่อกำหนดให้มีความเร็วที่ผิวสัมผัสมีค่าเป็น 0 ในทุกทิศทาง และความดันหาจากการ Extrapolate และเงื่อนไขค่าขอบที่ผิวสมมาตรที่ทำมุมกันให้มีเงื่อนไขขอบแบบ Periodic Pairs กล่าวคือที่หน้าตัดทั้งสองจะมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่ากันตลอดพื้นผิวโดยลักษณะ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นไปตามรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบสำหรับปัญหาการไหลในท่อภายใต้ความดัน

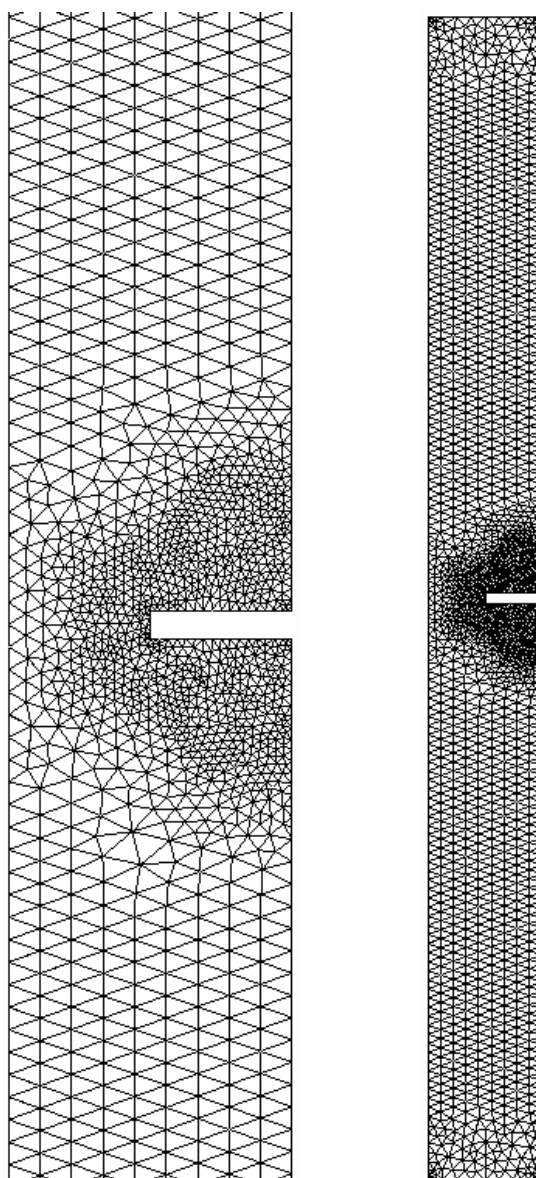
ข.4 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคง

ข.4.1 โดเมนและปัญหา

รายละเอียดของปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวางได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1.4 และในรูปที่ 3.12

ข.4.2 เมช

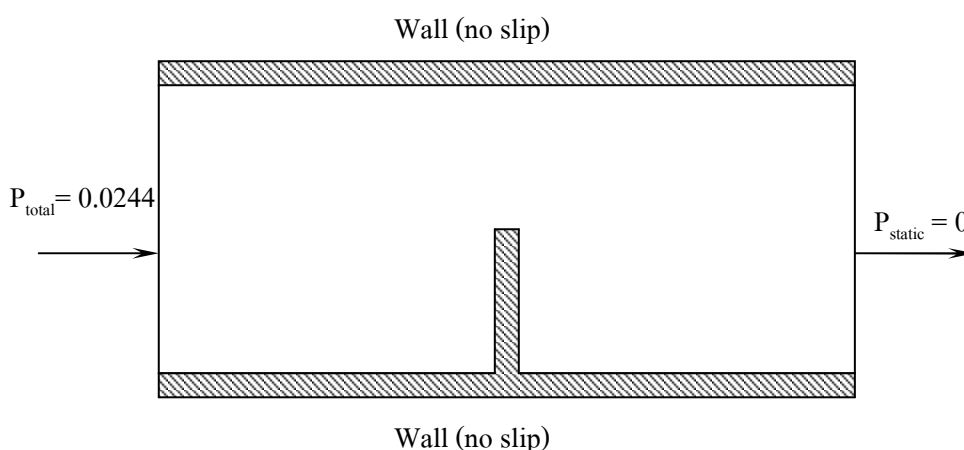
สำหรับเมชในปัญหานี้ได้เลือกใช้เมชแบบไร้โครงสร้างซึ่งเป็นการกำหนดเมชภายในโปรแกรมที่สะดวกและรวดเร็ว โดยโดยกำหนดให้เมชมีความละเอียดในบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางเนื่องจากคาดการณ์ว่าบริเวณดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงของความดันและความเร็วมากกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยเมชที่ได้จากการสร้างภายในโปรแกรมมีจำนวนโหนด จำนวนเมช และจำนวนหน้าเท่ากับ 4422 โหนด 12583 เมช และ 8468 หน้า ตามลำดับ ลักษณะของเมชแสดงในรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 การแบ่งเมชสำหรับปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวาง (ภาพขยายและภาพเต็ม)

ข.4.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นไปตามรูปที่ ข.9 กล่าวคือความดันรวมที่ทางเข้ามีค่าเป็น 0.0244 Pa (ทั้งนี้ จากการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของปัญหาการไหลในท่อและการไหลผ่านแผ่นคู่ขนานภายใต้แรงดันนั้น การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบที่ตำแหน่งทางเข้า ไม่ว่าจะกำหนดให้เป็นความเร็วหรือค่าความดันรวมก็จะให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันมาก) ค่าความเร็วในแนวแกนอื่น ๆ กำหนดให้มีค่าเป็น 0 ส่วนความดันให้เป็นส่วนหนึ่งของคำตอบ ซึ่งคำนวณได้จากการ Extrapolate ของพื้นผิวสมมาตรซึ่งขนานกับกระดาษกำหนดให้มีเงื่อนไขค่าขอบแบบ Symmetry Plane และค่าความเร็วและความดันเริ่มต้นในการคำนวณกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ ข.9 การกำหนดเงื่อนไขค่าของของปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวาง

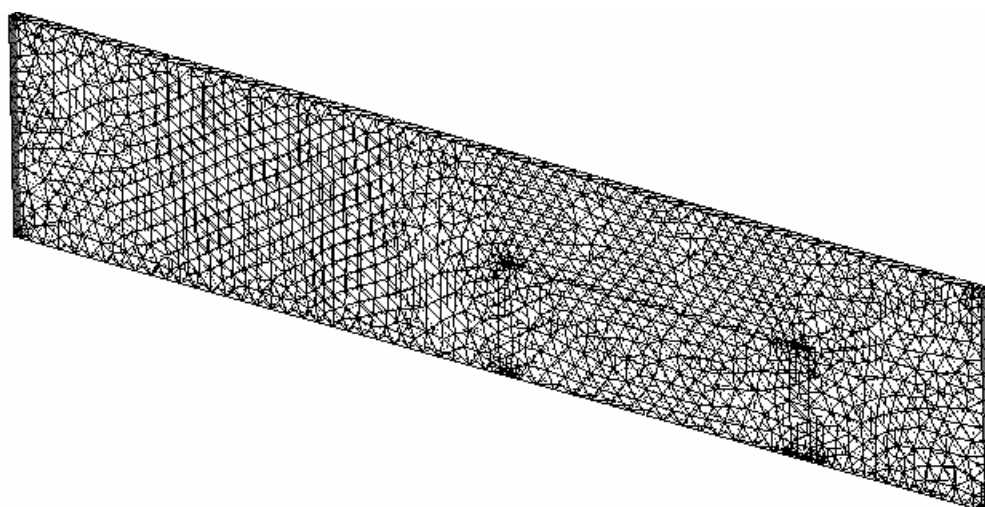
ข.5 การไหลผ่านแผ่นขนานเนื่องจากแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน

ข.5.1 โดเมนและปัญหา

รายละเอียดของปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวางได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1.5 และในรูปที่ 3.17

ข.5.2 เมช

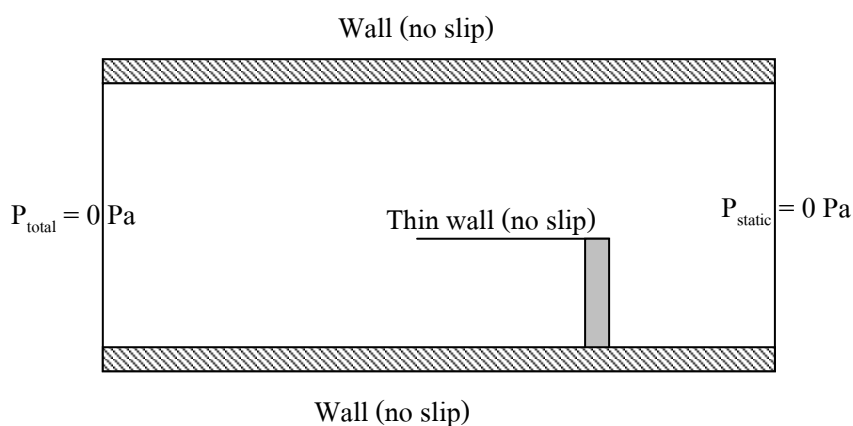
สำหรับการไหลนี้ได้กำหนดให้เมชภายในโดเมนเป็นเมชแบบไร้โครงสร้างโดยเมชที่ได้จากการสร้างภายในโปรแกรมมีจำนวน โหนด จำนวนเมช และจำนวนหน้าเท่ากับ 2485 โหนด 6998 เมช และ 4968 หน้า ตามลำดับ ลักษณะของเมชแสดงในรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 เมชไร้โครงสร้างที่กำหนดภายในโดเมน

ข.5.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นไปตามรูปที่ ข.11 ที่ปากทางเข้าของท่อกำหนดค่าให้มีความดันรวมเท่ากับความดันภายนอก เมื่อของไหลภายในท่อถูกผลักดันให้เกิดการไหลโดยแหล่งกำเนิดโมเมนตัมค่าความดันสถิตจะลดลงส่วนความดันพลวัตจะมีค่ามากขึ้น โดยทั้งสองส่วนรวมกันจะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศนั่นเอง ที่ปากท่อทางออกถูกกำหนดความดันสถิตย์ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ และผนังท่อผิวบางที่ถูกติดตั้งอยู่ภายในถูกสร้างให้เป็นพื้นผิวบางซึ่งไม่คิดความหนาในการคำนวณ ผิวนี้ถูกกำหนดให้มีเงื่อนไขค่าขอบประเภท Wall แบบไม่มีการไถล และส่วนของพื้นผิวสมมาตรซึ่งขนานกับกระดาศกำหนดให้มีเงื่อนไขค่าขอบแบบ Symmetry Plane ซึ่งค่าความเร็วและความดันเริ่มต้นในการคำนวณภายในโดเมนกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ ข.11 ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโดเมน

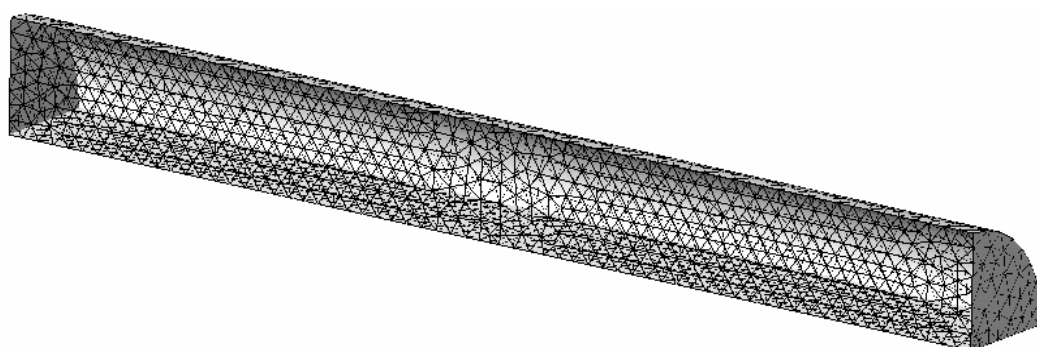
ข.6 การไหลในท่อเนื่องจากการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกนและในแนวรัศมี

ข.6.1 โดเมนและปัญหา

รายละเอียดของปัญหาการไหลในท่อผ่านสิ่งกีดขวางได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1.6 และในรูปที่ 3.22

ข.6.2 เมช

สำหรับการไหลนี้ได้กำหนดให้เมชภายในโดเมนเป็นเมชแบบไร้โครงสร้าง โดยสร้างเมชเพียงแค่ $\frac{1}{4}$ ของโดเมนทั้งหมดเท่านั้นเนื่องจากโดเมนมีความสมมาตรในแนวแกน ในความเป็นจริง ควรจะสร้างเมชเป็นรูปพายโดยใช้มุมเล็ก ๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมชที่สร้างสำหรับโดเมนนี้ได้ใช้มุมถึง 90 องศา เพื่อความสะดวกในการแสดงผลในโปรแกรม ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ใช้เวลาในการคำนวณไม่นานมากนัก (ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง) เมชที่ได้จากการสร้างภายในโปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ ข.12



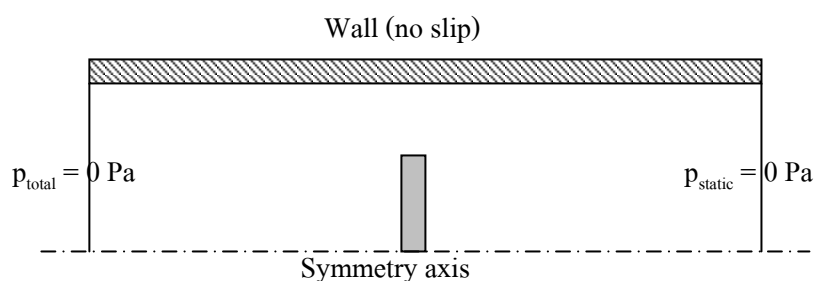
รูปที่ ข.12 เมชที่ใช้ภายในโดเมน

จำนวนโหนด จำนวนเมชและจำนวนหน้าที่ได้จากการแบ่งเมชมีจำนวนทั้งสิ้น 4249 โหนด 19547 เมช และ 3520 หน้า ตามลำดับ

ข.6.3 เงื่อนไขค่าขอบ และค่าเริ่มต้น

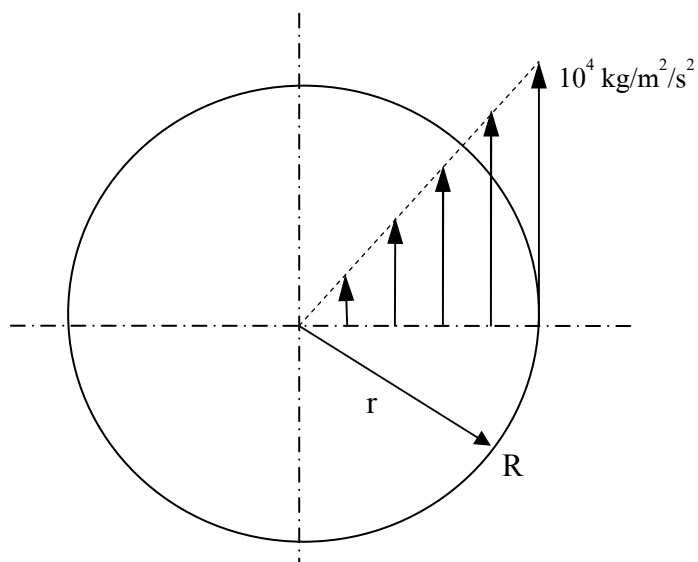
การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นไปตามรูปที่ ข.13 ซึ่งคล้ายคลึงกับการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบในปัญหาการไหลผ่านแผ่นขยานซึ่งติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายใน โดยกำหนดความดันที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ และความดันสถิตที่ทางออกมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ที่ผนังท่อกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเป็นแบบ Wall แบบไม่มีการไถล และส่วนของโดเมนที่เป็นผิวสมมาตรกำหนดให้มีลักษณะเงื่อนไขค่าขอบเป็นประเภท Periodic pairs สำหรับในส่วน

ของค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ได้กำหนดให้ความเร็วในทุกทิศทางและความดันเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ตลอดโดเมน



รูปที่ ข.13 ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบภายในโดเมน

สำหรับในกรณีทดสอบแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน ได้กำหนดให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมีให้มีค่ามากที่สุดเท่ากับโมเมนตัมในแนวแกน และเปลี่ยนแปลงไปตามรัศมี โดยที่ระยะ $r = R$ ของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมมีค่าเท่ากับแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน ในที่นี้มีค่าเท่ากับ $10^4 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$ และที่ระยะ $r = 0$ จะได้ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเป็นศูนย์ด้วย ลักษณะการกำหนดค่าให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวรัศมีเป็นดังรูปที่ ข.14



รูปที่ ข.14 ลักษณะการให้โมเมนตัมในแนวแกน

ภาคผนวก ค
ตารางสรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตาราง ค.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการดำเนินงานวิจัย	ปีที่ศึกษา	กลุ่มผู้วิจัย	รายละเอียด	ผลการศึกษา
ทดลอง	1968 1987 1989 2000	Buurman,Resoort and Plaschkes// Barresi and Baldi // Shamlou,Ayazi andKoutsakos// Sha and Palosaari	ศึกษาการผสม และผลกระทบของการไหลต่อการกระจายตัวของผลึกภายในถึงผลึกแบบต่อเนื่อง	การไหลภายในถึงผลึกมีการผสมไม่สมบูรณ์ดังสมมติฐาน MSMPR และการกระจายตัวของผลึกภายในถึงเป็นฟังก์ชันของความสูงของระดับของไหลความเป็นเอกรูปของการกระจายตัวของอนุภาคขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ในการปั่นของไหลความหนาแน่นภายในถึงตกผลึกไม่เท่ากับความหนาแน่นในสารละลายที่ดูออก
	1991	Joworski et al,	ศึกษาความเร็วของของไหลในถึงผลึกโดยใช้เทคนิค LDV ในการตรวจวัด	พบว่าบริเวณก้นถังมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณอื่นและเป็นสาเหตุให้เกิดการตกตะกอนในบริเวณดังกล่าว
CFD	1998 2001	Bakker, Fasano and Mayers // Montente, Lee, Brucato and Yannesis	ศึกษาผลกระทบจากประเภทและขนาดของใบพัดรวมถึงจำนวนใบพัด ที่มีต่อการไหลและการกระจายตัวของอนุภาค	การใช้ใบพัดต่างประเภทกันและขนาดต่างกันให้การผสมที่แตกต่างกัน และการกระจายตัวของอนุภาคจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดในถัง
	1998	Maggiolis et al,	ทำนายการไหลภายในถึงปฏิกรณ์สำหรับผลิตโพลีเมอร์ และใช้ในการทำนายการแตกหักและหลอมรวมกันของเม็ดโพลีเมอร์	ฟังก์ชันการแตกหักเสียหายและการหลอมรวมกัน สัมพันธ์กับขนาดของเม็ดโพลีเมอร์และอัตราการสูญเสียพลังงาน (Energy dissipation rate) บริเวณที่มีความเร็วต่ำจะเกิดการหลอมรวมกันของเม็ดโพลีเมอร์
	1999	Lamberto et al,	ศึกษาการแบ่งวงรอบของการไหล	การแบ่งวงรอบของการไหลสัมพันธ์กับค่าเลขเรย์โนลด์และตำแหน่งการวางใบพัด
	2001	Sha et al,	ใช้ CFD ในการศึกษาหาฟังก์ชันการแบ่งแยกของขนาดผลึก	ฟังก์ชันการแบ่งแยกสัมพันธ์กับความสูง ความเร็วของใบพัดตลอดจนรูปร่างของถังตกผลึก

ตาราง ก.1 (ต่อ)

วิธีการดำเนินงานวิจัย	ปีที่ศึกษา	กลุ่มผู้วิจัย	รายละเอียด	ผลการศึกษา
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	2002	Brucato et al,	ศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความหนาของชั้นของไหลที่ไม่มีอนุภาคปะปนอยู่	เมื่อความเร็วรอบของใบพัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นดังกล่าวลดลง
	1999	Sahu et al,	เสนอแนวคิดในการทำนายอัตราการสูญเสียพลังงานแบบปั่นป่วน (Turbulent energy dissipation rate) ภายในถังกวน ว่าไม่ควรใช้ค่าเดียวกันตลอดโดเมน ควรจะปรับเปลี่ยนไปตามความสูงของถัง	ไม่เห็นผลที่แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายค่าดังกล่าวโดยใช้วิธีอื่น
	2002	Liiri, Koironen and Aittamaa	เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดที่โตที่สุดของผลึกที่แตกหักเสียหาย โดยการนำความเร็วเฉพาะจุดมาใช้แทนความเร็วเฉลี่ยภายในถัง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้นกว่าแบบจำลองเดิมที่นิยมใช้อยู่

ภาคผนวก ง

รายละเอียดของ code บางส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าเข้าสู่โปรแกรม

ง.1 การไหลในชั้นผิวบางในย่านความเร็วต่ำ

This run of the CFX-5.5.1 Solver started at 14:32:34 on 31 Jul 2003 by user jackie1 on JACKIE (intel_athlon_winnt5.1) using the command:

C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch -ccl
Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\winnt\solver-pvm.exe.

Setting up CFX-5 Solver run ...

```
+-----+
|               CFX Command Language for Run               |
+-----+
```

LIBRARY :

```
MATERIAL : myair
  Option = Pure Substance
PROPERTIES :
  Option = General Fluid
  Density = 1.018 [kg m^-3]
  Dynamic Viscosity = 2.06E-5 [kg m^-1 s^-1]
END
```

END

END

EXECUTION CONTROL :

```
PARTITIONER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
PARTITIONING TYPE :
  MeTiS Type = k-way
  Option = MeTiS
END
```

END

END

RUN DEFINITION :

```
Definition File = BLrefine.def
Run Mode = Full
```

END

SOLVER STEP CONTROL :

```
Runtime Priority = Standard
```

EXECUTABLE SELECTION :

```
Double Precision = Off
Use 64 Bit = Off
```

END

PARALLEL ENVIRONMENT :

```
Option = Serial
Parallel Mode = PVM
```

END

END

FLOW :

SOLUTION UNITS :

```
Mass Units = [kg]
Length Units = [m]
Time Units = [s]
Temperature Units = [K]
Angle Units = [rad]
Solid Angle Units = [sr]
```

END

SIMULATION TYPE :

```
Option = Steady State
```

END

DOMAIN : BLrefine

```
Location = BLrefine
Coord Frame = Coord 0
Fluids List = myair
```

DOMAIN MODELS :

DOMAIN MOTION :

```
Option = Stationary
```



```
END
BUOYANCY MODEL :
  Option = Non Buoyant
END
REFERENCE PRESSURE :
  Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
END
END
FLUID MODELS :
TURBULENCE MODEL :
  Option = Laminar
END
HEAT TRANSFER MODEL :
  Option = None
END
THERMAL RADIATION MODEL :
  Option = None
END
END
BOUNDARY : inflow
  Boundary Type = INLET
  Location = inflow
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Normal Speed
    Normal Speed = 7.E1 [m s^-1]
  END
  END
END
BOUNDARY : outflow
  Boundary Type = OUTLET
  Location = outflow
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Average Static Pressure
    Relative Pressure = 0.00 [Pa]
  END
  END
END
BOUNDARY : freestream
  Boundary Type = OUTLET
  Location = freestream
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Static Pressure
    Relative Pressure = 0.00 [Pa]
  END
  END
END
BOUNDARY : plate
  Boundary Type = WALL
  Location = plate
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  WALL INFLUENCE ON FLOW :
    Option = No Slip
```

```

    END
  END
END
BOUNDARY : symback
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = symback
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : symfront
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = symfront
  Coord Frame = Coord 0
END
INITIALISATION :
  Option = Automatic
END
SOLVER CONTROL :
  CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 1000
    Timescale Control = Auto Timescale
  END
  CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Type = RMS
    Residual Target = 1.E-10

  END
  ADVECTION SCHEME :
    Option = Upwind
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = Yes
  END
END
COMMAND FILE :
  Version = 5.5.1
END
+-----+
| Solver                                     |
+-----+
+-----+
| CFX-5 Solver 5.5.1                       |
| Version 2002.05.29-23.00                 |
| Wed May 29 23:00:33 2002 |
|
| Copyright 1996-2002 AEA Technology plc.  |
+-----+
+-----+
| Job Information                           |
+-----+
Run mode:   serial run
Host computer: JACKIE
Job started: Thu Jul 31 14:32:48 2003
+-----+
| Memory Usage Information                  |
+-----+
Data Type      Kwords  Words/Node   Kbytes  Bytes/Node
Real           5436.1   266.45      21234.7 1065.79
Integer        1579.4    77.42       6169.6  309.66

```

```

Character      812.0    39.80    792.9    39.80
Logical       10.0     0.49     39.1     1.96
Double        16.0     0.78    125.0     6.27
+-----+
|           Total Number of Nodes, Elements, and Faces           |
+-----+
Domain Name : BLrefine
  Total Number of Nodes           = 20402
  Total Number of Elements        = 10000
  Total Number of Hexahedrons     = 10000
  Total Number of Faces           = 20400
+-----+
|           Average Scale Information                               |
+-----+
Domain Name : BLrefine
  Global Length                   = 5.7236E-03
  Density                         = 1.0180E+00
  Dynamic Viscosity               = 2.0600E-05
  Velocity                        = 0.0000E+00
+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation              |
+-----+
Subsystem Name : Momentum and Mass
  U-Mom
  V-Mom
  W-Mom
  P-Mass
CFD Solver started: Thu Jul 31 14:32:57 2003
+-----+
|           Convergence History                                  |
+-----+
=====
!           Timescale Information                               !
+-----+
!   Equation   |   Type   |   Timescale   !
+-----+-----+-----+
! U-Mom       | Auto Timescale | 2.45296E-05  !
! V-Mom       | Auto Timescale | 2.45296E-05  !
! W-Mom       | Auto Timescale | 2.45296E-05  !
! P-Mass      | Auto Timescale | 2.45296E-05  !
+-----+-----+-----+
+-----+
|           Variable Range Information                            |
+-----+
Domain Name : BLrefine
+-----+
|   Variable Name   |   min   |   max   |
+-----+-----+-----+
| Velocity u       | -4.35E-03 | 7.84E+01 |
| Velocity v       | -4.87E-01 | 1.30E+01 |
| Velocity w       | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Pressure         | -5.69E+00 | 2.31E+03 |
| Density          | 1.02E+00 | 1.02E+00 |
| Dynamic Viscosity | 2.06E-05 | 2.06E-05 |
+-----+-----+-----+
+-----+
|           CPU Requirements of Numerical Solution              |
+-----+
+-----+
Subsystem Name      Discretization   Linear Solution
                   (secs. %total)   (secs. %total)
+-----+-----+-----+
Momentum and Mass   3.21E+03 61.7 %   1.99E+03 38.3 %
+-----+-----+-----+
Summary             3.21E+03 61.7 %   1.99E+03 38.3 %
+-----+-----+-----+
|           Job Information                                     |
+-----+

```

Host computer: JACKIE
 Job finished: Thu Jul 31 16:13:09 2003
 Total CPU time: 5.494E+03 seconds
 or: (0: 1: 31: 34.471)
 (Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.
 This run of the CFX-5 Solver has finished.

๓.2 การไหลผ่านแผ่นขนานแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

This run of the CFX-5.5.1 Solver started at 23:52:37 on 26 Jul 2003 by user jackie1 on JACKIE (intel_athlon_winnt5.1) using the command:
 C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch -ccl
 Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
 C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\winnt\solver-pvm.exe.
 Setting up CFX-5 Solver run ...

```

+-----+
|               CFX Command Language for Run               |
+-----+

```

LIBRARY :

MATERIAL : myair1atm20c
 Option = Pure Substance
 PROPERTIES :
 Option = General Fluid
 Density = 1.2 [kg m⁻³]
 Dynamic Viscosity = 1.8E-5 [kg m⁻¹ s⁻¹]
 END

END

END

EXECUTION CONTROL :

PARTITIONER STEP CONTROL :

Runtime Priority = Standard

PARTITIONING TYPE :

MeTiS Type = k-way

Option = MeTiS

END

END

RUN DEFINITION :

Definition File = Puniform.def

Run Mode = Full

END

SOLVER STEP CONTROL :

Runtime Priority = Standard

EXECUTABLE SELECTION :

Double Precision = Off

Use 64 Bit = Off

END

PARALLEL ENVIRONMENT :

Option = Serial

Parallel Mode = PVM

END

END

END

FLOW :

SOLUTION UNITS :

Mass Units = [kg]

Length Units = [m]

Time Units = [s]

Temperature Units = [K]

Angle Units = [rad]

Solid Angle Units = [sr]

END

SIMULATION TYPE :

```
Option = Steady State
END
DOMAIN : Puniform
Location = Puniform
Coord Frame = Coord 0
Fluids List = myair1atm20c
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END
END
FLUID MODELS :
  TURBULENCE MODEL :
    Option = Laminar
  END
  HEAT TRANSFER MODEL :
    Option = None
  END
  THERMAL RADIATION MODEL :
    Option = None
  END
END
BOUNDARY : in
Boundary Type = INLET
Location = in
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Total Pressure
    Relative Pressure = 1.755E-1 [Pa]
  END
  FLOW DIRECTION :
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
END
BOUNDARY : out
Boundary Type = OUTLET
Location = out
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Average Static Pressure
    Relative Pressure = 0.00 [Pa]
  END
END
BOUNDARY : topwall
Boundary Type = WALL
Location = topwall
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  WALL INFLUENCE ON FLOW :
    Option = No Slip
  END
END
```



```

+-----+
Boundary   : in           8.7247E-16
Boundary   : out          1.4231E-15
Boundary   : symback     1.9340E-04
Boundary   : symfront    -1.9340E-04
Boundary   : topwall     -1.9843E-14

```

```

Global Balance : -1.9843E-14

```

```

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

```

```

+-----+
|                P-Mass                |
+-----+

```

```

Boundary   : in           1.7203E-06
Boundary   : out          -1.7203E-06

```

```

Global Balance : -4.7748E-11

```

```

Global Imbalance, in %: -0.0028 %

```

```

=====
Wall Force and Moment Summary
=====

```

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|                Pressure Force On Walls                |
+-----+
X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
topwall    0.0000E+00 7.7368E-05 0.0000E+00

```

```

+-----+
|                Viscous Force On Walls                |
+-----+

```

```

X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
topwall    1.5794E-06 -6.2038E-09 1.9843E-14

```

```

+-----+
|                Pressure Moment On Walls                |
+-----+

```

```

X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
topwall   -7.7368E-08 0.0000E+00 1.2863E-05

```

```

+-----+
|                Viscous Moment On Walls                |
+-----+

```

```

X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
topwall    6.2038E-12 1.5794E-09 -7.8909E-09

```

```

+-----+
|                Locations of Maximum Residuals                |
+-----+

```

```

| Equation | Node # | X | Y | Z |
+-----+
| U-Mom    | 1634 | 1.000E-02 | 2.750E-03 | 2.000E-03 |
| V-Mom    | 2050 | 9.000E-02 | 4.750E-03 | 2.000E-03 |
| W-Mom    | 1 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |

```

```

| P-Mass   | 2095 | 3.000E-02 | 5.000E-03 | 2.000E-03 |
+-----+

```

```

+-----+
|                Peak Values of Residuals                |
+-----+

```

```

| Equation | Loop # | Peak Residual | Final Residual |
+-----+
| U-Mom    | 1 | 9.66905E-01 | 3.38722E-07 |
| V-Mom    | 17 | 2.55053E-05 | 8.72484E-08 |
| W-Mom    | 1 | 2.19165E-06 | 6.12190E-08 |
| P-Mass   | 1 | 4.12962E-04 | 2.52018E-08 |
+-----+

```



```

+-----+
|                False Transient Information                |
+-----+
| Equation      | Type   | Elapsed Pseudo-Time |
+-----+
| U-Mom        | Auto   | 1.38681E+01         |
| V-Mom        | Auto   | 1.38681E+01         |
| W-Mom        | Auto   | 1.38681E+01         |
| P-Mass       | Auto   | 1.38681E+01         |
+-----+
+-----+
|                Average Scale Information                |
+-----+
Domain Name : Puniform
Global Length           = 1.7100E-02
Density                 = 1.2000E+00
Dynamic Viscosity       = 1.8000E-05
Velocity                = 1.5644E-01
Advection Time          = 1.0931E-01
Reynolds Number         = 1.7834E+02
+-----+
+-----+
|                Variable Range Information                |
+-----+
Domain Name : Puniform
+-----+
| Variable Name          | min   | max   |
+-----+
| Velocity u             | 5.35E-04 | 2.15E-01 |
| Velocity v             | -1.16E-02 | 1.83E-04 |
| Velocity w             | -2.94E-15 | 2.94E-15 |
| Pressure               | 5.76E-10 | 1.65E-01 |
| Density                 | 1.20E+00 | 1.20E+00 |
| Dynamic Viscosity      | 1.80E-05 | 1.80E-05 |
+-----+
+-----+
|                CPU Requirements of Numerical Solution    |
+-----+

Subsystem Name          Discretization   Linear Solution
                      (secs. %total) (secs. %total)
-----
Momentum and Mass      4.40E+02 78.7 %   1.19E+02 21.3 %
Summary                4.40E+02 78.7 %   1.19E+02 21.3 %
+-----+
|                Job Information                            |
+-----+
Host computer: JACKIE
Job finished: Sun Jul 27 00:08:07 2003
Total CPU time: 6.349E+02 seconds
                or: ( 0: 0: 10: 34.913 )
                  ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

```

End of solution stage.
This run of the CFX-5 Solver has finished.

๓.3 การไหลในท่อแบบความเร็วต่ำภายใต้ความดัน

This run of the CFX-5.5 Solver started at 1:34:7 on 7 Aug 2003 by user Administrator on CFX_LAB (intel_p2_winnt5.0) using the command:
C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\cfx5solve -stdout-comms -batch -ccl -
Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\winnt\solver-pvm.exe.
Setting up CFX-5 Solver run ...

```

+-----+
|
+-----+

```

```

| Solver |
+-----+
| CFX-5 Solver 5.5 |
| Version 2001.10.11-23.00 Thu Oct 11 23:00:10 2001 |
| Copyright 1996-2001 AEA Technology plc. All rights reserved. |
+-----+
| Job Information |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: CFX_LAB
Job started: Thu Aug 7 01:34:34 2003

```

+-----+
| Memory Usage Information |
+-----+

```

Data Type	Kwords	Words/Node	Kbytes	Bytes/Node
Real	2489.1	1190.37	9722.9	4761.47
Integer	267.9	128.11	1046.4	512.44
Character	682.6	326.43	666.6	326.43
Logical	10.0	4.78	39.1	19.13
Double	8.0	3.83	62.5	30.61

```

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

```

Domain Name : Puniform tube

```

Total Number of Nodes          = 2091
Total Number of Elements       = 1000
  Total Number of Prisms       = 50
Total Number of Hexahedrons    = 950
Total Number of Faces          = 2090

```

```

+-----+
| Command File |
+-----+

```

LIBRARY :

MATERIAL : myair
Option = Pure Substance
PROPERTIES :
Option = General Fluid
Density = 1.2 [kg m⁻³]

Dynamic Viscosity = 1.8E-5 [kg m⁻¹ s⁻¹]

END

END

END

EXECUTION CONTROL :

PARTITIONER STEP CONTROL :

Runtime Priority = Standard

PARTITIONING TYPE :

MeTiS Type = k-way

Option = MeTiS

```

END
END
RUN DEFINITION :
  Definition File = d:/cfxwork/5.0/Poiseuilli_tube/Puniform_tube.def
  Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION :
  Double Precision = Off
END
PARALLEL ENVIRONMENT :
  Option = Serial
  Parallel Mode = PVM
END
END
FLOW :
SOLUTION UNITS :
  Mass Units = [kg]
  Length Units = [m]
  Time Units = [s]
  Temperature Units = [K]
  Angle Units = [rad]
  Solid Angle Units = [sr]

END
SIMULATION TYPE :
  Option = Steady State
END
DOMAIN : Puniform tube
  Location = Puniform tube
  Coord Frame = Coord 0
  Fluids List = myair
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END
  FLUID MODELS :
    TURBULENCE MODEL :
      Option = Laminar
    END
    HEAT TRANSFER MODEL :
      Option = None
    END
    THERMAL RADIATION MODEL :
      Option = None
    END
  END
  BOUNDARY : inflow
    Boundary Type = INLET
    Location = inflow
    Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :

  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Normal Speed
    Normal Speed = 5.625E-2 [m s^-1]

```

```

    END
  END
END
BOUNDARY : outflow
  Boundary Type = OUTLET
  Location = outflow
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
      Option = Average Static Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
  END
END
BOUNDARY : tubewall
  Boundary Type = WALL
  Location = tubewall
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : periodic1
  Boundary Type = PERIODIC
  Location = periodic1
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : periodic2
  Boundary Type = PERIODIC
  Location = periodic2
  Coord Frame = Coord 0
END
INITIALISATION :
  Option = Automatic
END
SOLVER CONTROL :
  CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 1000
    Timescale Control = Auto Timescale
  END
  CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Type = RMS
    Residual Target = 1.E-10
  END
  ADVECTION SCHEME :
    Option = Upwind
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = Yes
  END
END
COMMAND FILE :
  Version = 5.5
END
+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

Domain Name : Puniform tube
  Global Length           = 8.1669E-03
  Density                 = 1.2000E+00

```

Dynamic Viscosity = 1.8000E-05
Velocity = 0.0000E+00

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom

V-Mom

W-Mom

P-Mass

CFD Solver started: Thu Aug 7 01:34:38 2003

CFD Solver finished: Thu Aug 7 02:11:06 2003

Execution terminating: maximum number of time-step iterations,
or maximum time has been reached.

=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====

```

+-----+
|           U-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         1.8338E-07
Boundary   : outflow        -5.5039E-09
Boundary   : Periodic       5.1369E-19
Boundary   : tubewall       -1.7788E-07
Global U-Mom Balance:      -7.9297E-12
Global Imbalance, in %:    0.0000 %

```

```

+-----+
|           V-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         4.6994E-10
Boundary   : outflow        -5.8538E-10
Boundary   : Periodic       1.7611E-05
Boundary   : tubewall       -1.7611E-05
Global V-Mom Balance:      -7.2760E-12
Global Imbalance, in %:    0.0000 %

```

```

+-----+
|           W-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         2.0517E-11
Boundary   : outflow        -2.5560E-11
Boundary   : Periodic       7.6895E-07
Boundary   : tubewall       -7.6890E-07
Global W-Mom Balance:      3.8654E-11
Global Imbalance, in %:    0.0000 %

```

```

+-----+
|           P-Mass          |
+-----+
Boundary   : inflow         7.3538E-08
Boundary   : outflow        -7.3533E-08
Global P-Mass Balance:      4.5972E-12
Global Imbalance, in %:    0.0063 %

```

=====
Wall Force and Moment Summary
=====

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include
it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|           Pressure Force On Walls           |
+-----+
X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
tubewall  0.0000E+00  1.7612E-05  7.6893E-07

```

Viscous Force On Walls				
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.	
tubewall	1.7788E-07	-7.2127E-10	-3.0343E-11	
Pressure Moment On Walls				
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.	
tubewall	-1.1627E-14	-1.2807E-07	2.9333E-06	
Viscous Moment On Walls				
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.	
tubewall	5.7377E-15	3.8598E-11	-8.8592E-10	
Locations of Maximum Residuals				
Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	153	5.000E-01	5.000E-04	0.000E+00
V-Mom	104	1.000E-02	5.000E-04	0.000E+00
W-Mom	1181	7.000E-02	7.471E-04	6.537E-05
P-Mass	979	9.000E-02	4.750E-03	0.000E+00
Peak Values of Residuals				
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual	
U-Mom	2	1.75172E-02	9.38670E-07	
V-Mom	2	1.30030E-03	1.32501E-07	
W-Mom	2	1.57456E-04	1.00550E-06	
P-Mass	1	6.28939E-05	3.48850E-08	
False Transient Information				
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time		
U-Mom	Auto	3.36503E+01		
V-Mom	Auto	3.36503E+01		
W-Mom	Auto	3.36503E+01		
P-Mass	Auto	3.36503E+01		
Average Scale Information				

Domain Name : Puniform tube
Global Length = 8.1669E-03
Density = 1.2000E+00
Dynamic Viscosity = 1.8000E-05
Velocity = 8.0797E-02
Advection Time = 1.0108E-01
Reynolds Number = 4.3991E+01

Variable Range Information		
----------------------------	--	--

Domain Name : Puniform tube

Variable Name	min	max
Velocity u	2.68E-04	1.15E-01
Velocity v	-9.04E-03	1.43E-04
Velocity w	-7.88E-04	1.47E-05
Pressure	-1.16E-09	1.65E-01

```

| Density                | 1.20E+00 | 1.20E+00 |
| Dynamic Viscosity      | 1.80E-05 | 1.80E-05 |
+-----+
|           CPU Requirements of Numerical Solution           |
+-----+

Subsystem Name          Discretization   Linear Solution
                      (secs. %total) (secs. %total)
-----
Momentum and Mass      1.26E+03 83.4 %   2.51E+02 16.6 %
Summary                1.26E+03 83.4 %   2.51E+02 16.6 %
+-----+
|           Job Information           |
+-----+
Host computer: CFX_LAB
Job finished: Thu Aug 7 02:11:11 2003
Total CPU time: 1.733E+03 seconds
                or: ( 0: 0: 28: 52.541 )
                   ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

```

End of solution stage.
This run of the CFX-5 Solver has finished.

ง.4 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคง

This run of the CFX-5.5.1 Solver started at 16:43:33 on 27 Jul 2003 by user jackie1 on JACKIE (intel_athlon_winnt5.1) using the command:

```
C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch -ccl
-
```

Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\winnt\solver-pvm.exe.

Setting up CFX-5 Solver run ...

```

+-----+
|           CFX Command Language for Run           |
+-----+

```

```

LIBRARY :
MATERIAL : GeneralBump
Option = Pure Substance
PROPERTIES :
Option = General Fluid
Density = 1.2 [kg m^-3]
Dynamic Viscosity = 1.8E-5 [kg m^-1 s^-1]
END
END
EXECUTION CONTROL :
PARTITIONER STEP CONTROL :
Runtime Priority = Standard
PARTITIONING TYPE :
MeTiS Type = k-way
Option = MeTiS
END
END
RUN DEFINITION :
Definition File = bump.def
Run Mode = Full

```

```
END
SOLVER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION :
  Double Precision = Off
  Use 64 Bit = Off
END
PARALLEL ENVIRONMENT :
  Option = Serial
  Parallel Mode = PVM
END
END
END
FLOW :
SOLUTION UNITS :
  Mass Units = [kg]
  Length Units = [m]
  Time Units = [s]
  Temperature Units = [K]
  Angle Units = [rad]
  Solid Angle Units = [sr]
END
SIMULATION TYPE :
  Option = Steady State
END
DOMAIN : bump
  Location = bump
  Coord Frame = Coord 0
  Fluids List = GeneralBump
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END
END
FLUID MODELS :
  TURBULENCE MODEL :
    Option = Laminar
  END
  HEAT TRANSFER MODEL :
    Option = None
  END
  THERMAL RADIATION MODEL :
    Option = None
  END
END
BOUNDARY : inlet
  Boundary Type = INLET
  Location = inlet
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Total Pressure
    Relative Pressure = 2.4443E-2 [Pa]
  END
  FLOW DIRECTION :
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
END
END
```



```

+-----+
|               CFX-5 Solver 5.5.1               |
| Version 2002.05.29-23.00           Wed May 29 23:00:33 2002 |
|                                         |
| Copyright 1996-2002 AEA Technology plc.         |
+-----+

```

```

+-----+
|               Job Information               |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: JACKIE

Job started: Sun Jul 27 16:43:47 2003

```

+-----+
|               Memory Usage Information               |
+-----+

```

Data Type	Kwords	Words/Node	Kbytes	Bytes/Node
Real	2882.9	651.95	11261.4	2607.79
Integer	782.4	176.93	3056.1	707.71
Character	808.6	182.86	789.7	182.86
Logical	10.0	2.26	39.1	9.05
Double	16.0	3.62	125.0	28.95

```

+-----+
|               Total Number of Nodes, Elements, and Faces               |
+-----+

```

Domain Name : bump

Total Number of Nodes	=	4422
Total Number of Elements	=	12583
Total Number of Tetrahedrons	=	12583
Total Number of Faces	=	8468

```

+-----+
|               Average Scale Information               |
+-----+

```

Domain Name : bump

Global Length	=	1.4879E-02
Density	=	1.2000E+00
Dynamic Viscosity	=	1.8000E-05
Velocity	=	0.0000E+00

```

+-----+
|               The Equations Solved in This Calculation               |
+-----+

```

```
+-----+
```

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom

V-Mom

W-Mom

P-Mass

CFD Solver started: Sun Jul 27 16:43:51 2003

ง.5 การไหลผ่านแผ่นขนานเนื่องจากแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน

This run of the CFX-5.5 Solver started at 6:14:53 on 7 Aug 2003 by user Administrator on CFX_LAB (intel_p2_winnt5.0) using the command:

```
C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\cfx5solve -stdout-comms -batch -ccl -
```

Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\winnt\solver-pvm.exe.

Setting up CFX-5 Solver run ...

```
+-----+
```

```
| Solver |
|-----|
| CFX-5 Solver 5.5 |
| Version 2001.10.11-23.00 Thu Oct 11 23:00:10 2001 |
| Copyright 1996-2001 AEA Technology plc. All rights reserved. |
+-----+
```

```
+-----+
```

```
| Job Information |
+-----+
```

Run mode: serial run

Host computer: CFX_LAB

Job started: Thu Aug 7 06:15:22 2003

```
+-----+
```

```
| Memory Usage Information |
+-----+
```

Data Type	Kwords	Words/Node	Kbytes	Bytes/Node
Real	1960.9	789.08	7659.7	3156.34
Integer	476.8	191.87	1862.5	767.49
Character	712.9	286.88	696.2	286.88
Logical	10.0	4.02	39.1	16.10
Double	8.0	3.22	62.5	25.75

```
+-----+
```

```
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+
```

Domain Name : MSplane

Total Number of Nodes = 2485

```

Total Number of Elements          =    6998
  Total Number of Tetrahedrons    =    6998

Total Number of Faces              =    4968
+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
LIBRARY :
MATERIAL : myair
  Option = Pure Substance
PROPERTIES :
  Option = General Fluid
  Density = 1.3427E3 [kg m^-3]
  Dynamic Viscosity = 2.3677E-1 [kg m^-1 s^-1]
END
END
END

EXECUTION CONTROL :
PARTITIONER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
PARTITIONING TYPE :
  MeTiS Type = k-way
  Option = MeTiS
END
END
RUN DEFINITION :
  Definition File = MSplane.def
  Run Mode = Full
END

SOLVER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION :
  Double Precision = Off
END
PARALLEL ENVIRONMENT :
  Option = Serial
  Parallel Mode = PVM
END
END
FLOW :
SOLUTION UNITS :
  Mass Units = [kg]
  Length Units = [m]
  Time Units = [s]
  Temperature Units = [K]
  Angle Units = [rad]
  Solid Angle Units = [sr]
END
SIMULATION TYPE :
  Option = Steady State
END
DOMAIN : MSplane
  Location = MSplane
  Coord Frame = Coord 0
  Fluids List = myair
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END

```

```
END
FLUID MODELS :
  TURBULENCE MODEL :
    Option = Laminar
  END
  HEAT TRANSFER MODEL :
    Option = None
  END
  THERMAL RADIATION MODEL :
    Option = None
  END
END
SUBDOMAIN : innerduct
  Location = innerduct
  Coord Frame = Coord 0
END
SUBDOMAIN : pump
  Location = pump
  Coord Frame = Coord 0
SOURCES :
  MOMENTUM SOURCE :
    Momentum Source X Component = 1.E4 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Y Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Z Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
  END
END
BOUNDARY : inflow
  Boundary Type = INLET
  Location = inflow
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
      Option = Total Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
    FLOW DIRECTION :
      Option = Normal to Boundary Condition
    END
  END
END
BOUNDARY : outflow
  Boundary Type = OUTLET
  Location = outflow
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
      Option = Average Static Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
  END
END
BOUNDARY : ductwall
  Boundary Type = WALL
  Location = ductwall
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
END
```

```
BOUNDARY : innerductwall011
  Boundary Type = WALL
  Location = innerductwall01
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : innerductwall012
  Boundary Type = WALL
  Location = innerductwall01
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : innerductwall021
  Boundary Type = WALL
  Location = innerductwall02
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : innerductwall022
  Boundary Type = WALL
  Location = innerductwall02
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : symfront
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = symfront
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : symback
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = symback
  Coord Frame = Coord 0
END
INITIALISATION :
  Option = Automatic
END
SOLVER CONTROL :
  CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 1000
    Timescale Control = Auto Timescale
  END
  CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Type = RMS
    Residual Target = 1.E-10
  END
  ADVECTION SCHEME :
    Option = Upwind
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = Yes
```

END
 END
 END
 COMMAND FILE :
 Version = 5.5
 END

```

+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

```

Domain Name : MSplane
 Global Length = 6.2996E-03
 Density = 1.3427E+03
 Dynamic Viscosity = 2.3677E-01
 Velocity = 0.0000E+00

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom

V-Mom

W-Mom

P-Mass

CFD Solver started: Thu Aug 7 06:15:26 2003
 CFD Solver finished: Thu Aug 7 06:48:28 2003

```

=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====

```

```

+-----+
|           U-Mom           |
+-----+
Boundary   : ductwall       -1.6428E-05
Boundary   : inflow        -2.7160E-08
Boundary   : innerductwall011 -7.7205E-06
Boundary   : innerductwall021 -8.4022E-07
Boundary   : outflow       -5.0066E-08
Boundary   : innerductwall012  2.2816E-07
Boundary   : innerductwall022 -1.6257E-07
Sub-Domain : pump          2.5000E-05
-----
Global U-Mom Balance:      1.8190E-12
Global Imbalance, in %:   0.0000 %

```

```

+-----+
|           V-Mom           |
+-----+
Boundary   : ductwall       -3.7412E-05
Boundary   : inflow        -3.9857E-09
Boundary   : innerductwall011  3.9245E-05
Boundary   : innerductwall021  1.4291E-06
Boundary   : outflow       -9.8761E-08
Boundary   : innerductwall012 -2.8770E-06
Boundary   : innerductwall022 -2.8201E-07
-----
Global V-Mom Balance:      6.9065E-12

```

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

```

+-----+
|                W-Mom                |
+-----+
Boundary   : ductwall                2.7280E-08
Boundary   : inflow                  2.8021E-09
Boundary   : innerductwall011        -2.4443E-09
Boundary   : innerductwall021         1.0175E-09
Boundary   : outflow                  4.1313E-10
Boundary   : symback                  -5.7455E-04
Boundary   : symfront                  5.7453E-04
Boundary   : innerductwall012         2.0688E-09
Boundary   : innerductwall022        -1.7488E-09

```

Global W-Mom Balance: -2.9240E-11

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

```

+-----+
|                P-Mass                |
+-----+
Boundary   : inflow                  1.1777E-05
Boundary   : outflow                 -1.1777E-05

```

Global P-Mass Balance: -2.7285E-12

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

=====

Wall Force and Moment Summary

=====

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|                Pressure Force On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
ductwall        6.3132E-13  3.7426E-05  3.5609E-16
innerductwall011  0.0000E+00 -3.8763E-05  0.0000E+00
innerductwall021  0.0000E+00 -1.6946E-06  0.0000E+00
innerductwall012  0.0000E+00  2.9144E-06  0.0000E+00
innerductwall022  0.0000E+00  3.3913E-07  0.0000E+00

```

```

+-----+
|                Viscous Force On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
ductwall        1.6428E-05 -1.3253E-08 -2.7280E-08
innerductwall011  7.7205E-06 -4.8226E-07  2.4443E-09
innerductwall021  8.4022E-07  2.6549E-07 -1.0175E-09
innerductwall012 -2.2816E-07 -3.7313E-08 -2.0688E-09
innerductwall022  1.6257E-07 -5.7121E-08  1.7488E-09

```

```

+-----+
|                Pressure Moment On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
ductwall        -9.3551E-09  1.3673E-16  1.2721E-06
innerductwall011  9.6909E-09  0.0000E+00 -1.3157E-06

```


innerductwall021	4.2051E-10	0.0000E+00	-6.8330E-08
innerductwall012	-7.2861E-10	0.0000E+00	9.2502E-08
innerductwall022	-8.4343E-11	0.0000E+00	1.3749E-08

```

+-----+
|           Viscous Moment On Walls           |
+-----+

```

	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
ductwall	-4.1166E-11	4.8183E-09	-1.4099E-08
innerductwall011	1.3246E-10	1.8698E-09	-5.0852E-08
innerductwall021	-7.1549E-11	2.5605E-10	6.6032E-09
innerductwall012	-1.1085E-12	1.2207E-11	-5.3712E-10
innerductwall022	2.2463E-11	-3.0292E-11	-3.1214E-09

```

+-----+
|           Locations of Maximum Residuals           |
+-----+

```

Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	96	4.000E-02	1.875E-03	0.000E+00
V-Mom	286	3.750E-02	7.690E-04	5.000E-04
W-Mom	2407	3.236E-02	6.794E-04	3.221E-04
P-Mass	90	3.953E-02	7.596E-11	5.000E-04

```

+-----+
|           Peak Values of Residuals           |
+-----+

```

Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	1	5.11329E-04	3.13453E-10
V-Mom	2	5.12196E-05	1.61526E-10
W-Mom	2	1.23111E-05	2.37204E-11
P-Mass	2	1.77214E-03	2.55305E-09

```

+-----+
|           False Transient Information           |
+-----+

```

Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	3.28797E+01
V-Mom	Auto	3.28797E+01
W-Mom	Auto	3.28797E+01
P-Mass	Auto	3.28797E+01

```

+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

```

Domain Name : MSplane

Global Length	= 6.2996E-03
Density	= 1.3427E+03
Dynamic Viscosity	= 2.3677E-01
Velocity	= 2.2268E-03
Advection Time	= 2.8290E+00
Reynolds Number	= 7.9551E-02

```

+-----+
|           Variable Range Information           |
+-----+

```

Domain Name : MSplane

Variable Name	min	max
Velocity u	-5.24E-04	6.58E-03
Velocity v	-2.06E-03	2.07E-03
Velocity w	-3.94E-05	3.31E-05
Pressure	-8.20E+00	1.28E+00
Density	1.34E+03	1.34E+03
Dynamic Viscosity	2.37E-01	2.37E-01

CPU Requirements of Numerical Solution

Subsystem Name	Discretization (secs. %total)	Linear Solution (secs. %total)
Momentum and Mass	1.39E+03 85.5 %	2.37E+02 14.5 %
Summary	1.39E+03 85.5 %	2.37E+02 14.5 %

Job Information

Host computer: CFX_LAB
 Job finished: Thu Aug 7 06:48:34 2003
 Total CPU time: 1.820E+03 seconds
 or: (0: 0: 30: 20.087)
 (Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.

ง.6 การไหลในท่อเนื่องจากการให้แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในแนวแกน

This run of the CFX-5.5 Solver started at 8:25:56 on 7 Aug 2003 by user Administrator on CFX_LAB (intel_p2_winnt5.0) using the command:

C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\cfx5solve -stdout-comms -batch -ccl -

Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from C:\CFX\CFX-5.5\bin\5.5\winnt\solver-pvm.exe.

Setting up CFX-5 Solver run ...

```

+-----+
| Solver                                     |
+-----+
+-----+
| CFX-5 Solver 5.5                         |
| Version 2001.10.11-23.00                 | Thu Oct 11 23:00:10 2001 |
|                                           |
| Copyright 1996-2001 AEA Technology plc.  | All rights reserved.   |
+-----+

```

```

+-----+
|           Job Information           |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: CFX_LAB

Job started: Thu Aug 7 08:26:24 2003

```

+-----+
|           Memory Usage Information   |
+-----+

```

Data Type	Kwords	Words/Node	Kbytes	Bytes/Node
Real	2392.3	563.02	9344.8	2252.07
Integer	783.4	184.37	3060.1	737.48
Character	688.7	162.09	672.6	162.09
Logical	10.0	2.35	39.1	9.41
Double	8.0	1.88	62.5	15.06

```

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

```

Domain Name : MStube

```

Total Number of Nodes           = 4249
Total Number of Elements        = 19547
  Total Number of Tetrahedrons   = 19547
Total Number of Faces           = 3520

```

```

+-----+
|           Command File             |
+-----+

```

LIBRARY :

MATERIAL : myair

Option = Pure Substance

PROPERTIES :

Option = General Fluid

Density = 1.3427E3 [kg m⁻³]

Dynamic Viscosity = 2.3677E-1 [kg m⁻¹ s⁻¹]

END

END

END

EXECUTION CONTROL :

PARTITIONER STEP CONTROL :

Runtime Priority = Standard

PARTITIONING TYPE :

MeTiS Type = k-way

Option = MeTiS

END

END

RUN DEFINITION :

Definition File = MStube.def

Run Mode = Full

END

SOLVER STEP CONTROL :

Runtime Priority = Standard

EXECUTABLE SELECTION :

Double Precision = Off

END

```
PARALLEL ENVIRONMENT :
  Option = Serial
  Parallel Mode = PVM
END
END
FLOW :
SOLUTION UNITS :
  Mass Units = [kg]
  Length Units = [m]
  Time Units = [s]
  Temperature Units = [K]
  Angle Units = [rad]
  Solid Angle Units = [sr]
END
SIMULATION TYPE :
  Option = Steady State
END
DOMAIN : MStube
  Location = MStube
  Coord Frame = Coord 0
  Fluids List = myair
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END
  FLUID MODELS :
    TURBULENCE MODEL :
      Option = Laminar
    END
    HEAT TRANSFER MODEL :
      Option = None
    END
    THERMAL RADIATION MODEL :
      Option = None
    END
  END
SUBDOMAIN : pump
  Location = pump
  Coord Frame = Coord 0
SOURCES :
  MOMENTUM SOURCE :
    Momentum Source X Component = 1.E4 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Y Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Z Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
  END
  END
BOUNDARY : inflow
  Boundary Type = INLET
  Location = inflow
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Total Pressure
    Relative Pressure = 0.00 [Pa]
  END
  FLOW DIRECTION :
```

```

    Option = Normal to Boundary Condition
  END
END
END
BOUNDARY : outlet
  Boundary Type = OUTLET
  Location = outlet
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
      Option = Average Static Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
  END
END
BOUNDARY : tubewall
  Boundary Type = WALL
  Location = tubewall
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : periodic1
  Boundary Type = PERIODIC
  Location = periodic1
  Coord Frame = Coord 0
  END
BOUNDARY : periodic2
  Boundary Type = PERIODIC
  Location = periodic2
  Coord Frame = Coord 0
  END
INITIALISATION :
  Option = Automatic
  END
SOLVER CONTROL :
  CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 1000
    Timescale Control = Auto Timescale
  END

  CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Type = RMS
    Residual Target = 1.E-10
  END
  ADVECTION SCHEME :
    Option = Upwind
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = Yes
  END
END
END
COMMAND FILE :
  Version = 5.5
END
+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

```

Domain Name : MStube

Global Length = 9.8559E-03
 Density = 1.3427E+03
 Dynamic Viscosity = 2.3677E-01
 Velocity = 0.0000E+00

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom

V-Mom

W-Mom

P-Mass

CFD Solver started: Thu Aug 7 08:26:29 2003

CFD Solver finished: Thu Aug 7 08:51:14 2003

```

=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====

```

```

+-----+
|           U-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         -5.0098E-07
Boundary   : outlet         -5.8037E-07
Boundary   : Periodic       1.5313E-11
Boundary   : tubewall       -9.4646E-05
Sub-Domain : pump           9.5727E-05
-----
Global U-Mom Balance:      2.1828E-11
Global Imbalance, in %:   0.0000 %

```

```

+-----+
|           V-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         2.8847E-06
Boundary   : outlet        -2.9393E-06
Boundary   : Periodic      -2.5668E-06
Boundary   : tubewall       2.6349E-06
-----
Global V-Mom Balance:      1.3552E-08
Global Imbalance, in %:   0.0142 %

```

```

+-----+
|           W-Mom           |
+-----+
Boundary   : inflow         2.8854E-06
Boundary   : outlet        -2.9359E-06
Boundary   : Periodic      -2.5445E-06
Boundary   : tubewall       2.6103E-06
-----
Global W-Mom Balance:      1.5373E-08
Global Imbalance, in %:   0.0161 %

```

```

+-----+
|                P-Mass                |
+-----+
Boundary      : inflow                    5.0559E-05
Boundary      : outlet                   -5.0559E-05
-----
Global P-Mass Balance:                    -2.1828E-11
Global Imbalance, in %:                    0.0000 %

```

```

=====
Wall Force and Moment Summary
=====

```

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|                Pressure Force On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
tubewall        -2.1713E-08 -2.4376E-06 -2.4631E-06

```

```

+-----+
|                Viscous Force On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
tubewall        9.4668E-05 -1.9731E-07 -1.4721E-07

```

```

+-----+
|                Pressure Moment On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
tubewall        -4.2711E-11 -3.5314E-06 3.5322E-06

```

```

+-----+
|                Viscous Moment On Walls                |
+-----+
                X-Comp.  Y-Comp.  Z-Comp.
tubewall        1.0641E-10 2.7863E-07 -2.8150E-07

```

```

+-----+
|                Locations of Maximum Residuals                |
+-----+
| Equation | Node # | X | Y | Z |
+-----+
| U-Mom    | 2769 | 2.583E-02 | 6.159E-04 | 7.408E-04 |
| V-Mom    | 2449 | 2.139E-02 | 4.260E-03 | 9.906E-04 |
| W-Mom    | 365  | 1.952E-02 | 3.334E-03 | -1.250E-10 |
| P-Mass   | 1208 | -3.402E-10 | 5.373E-04 | 3.192E-04 |
+-----+

```

```

+-----+
|                Peak Values of Residuals                |
+-----+
| Equation | Loop # | Peak Residual | Final Residual |
+-----+
| U-Mom    | 1 | 9.20130E-04 | 4.91599E-10 |
| V-Mom    | 2 | 1.01315E-04 | 2.91045E-10 |
| W-Mom    | 2 | 1.04294E-04 | 2.84336E-10 |
| P-Mass   | 2 | 3.93595E-03 | 5.35510E-09 |

```

```

+-----+
+-----+
|          False Transient Information          |
+-----+
| Equation | Type | Elapsed Pseudo-Time |
+-----+
| U-Mom    | Auto | 2.92508E+01 |
| V-Mom    | Auto | 2.92508E+01 |
| W-Mom    | Auto | 2.92508E+01 |
| P-Mass   | Auto | 2.92508E+01 |
+-----+

```

```

+-----+
+-----+
|          Average Scale Information          |
+-----+
Domain Name : MStube
Global Length      = 9.8559E-03
Density            = 1.3427E+03
Dynamic Viscosity  = 2.3677E-01
Velocity           = 2.6093E-03
Advection Time     = 3.7772E+00
Reynolds Number    = 1.4584E-01

```

```

+-----+
+-----+
|          Variable Range Information          |
+-----+

```

```

Domain Name : MStube
+-----+
+-----+
| Variable Name | min | max |
+-----+
| Velocity u    | -2.56E-03 | 1.06E-02 |
| Velocity v    | -2.04E-03 | 2.03E-03 |
| Velocity w    | -2.04E-03 | 2.03E-03 |
| Pressure      | -4.37E+00 | 4.35E+00 |
| Density       | 1.34E+03 | 1.34E+03 |
| Dynamic Viscosity | 2.37E-01 | 2.37E-01 |
+-----+

```

```

+-----+
+-----+
|          CPU Requirements of Numerical Solution          |
+-----+

```

Subsystem Name	Discretization		Linear Solution	
	(secs.	%total)	(secs.	%total)
Momentum and Mass	1.12E+03	83.5 %	2.21E+02	16.5 %
Summary	1.12E+03	83.5 %	2.21E+02	16.5 %

```

+-----+
+-----+
|          Job Information          |
+-----+

```

Host computer: CFX_LAB
Job finished: Thu Aug 7 08:51:19 2003
Total CPU time: 1.433E+03 seconds
or: (0: 0: 23: 52.600)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.

ง.7 การไหลในถังตกผลึก

เนื่องจากการไหลนี้มีทั้งหมด 7 กรณี แต่ละกรณีมีความแตกต่างกันที่ค่าแหล่งกำเนิด โมเมนตัมที่กำหนดในโปรแกรมเท่านั้น การแสดง code จึงแสดงเพียงกรณีเดียว

This run of the CFX-5.5.1 Solver started at 17:36:38 on 7 Jul 2003 by user Jackie1 on JACKIE (intel_athlon_winnt5.1) using the command:

```
C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch -ccl
-Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\winnt\solver-pvm.exe.
```

Setting up CFX-5 Solver run ...

```
+-----+
|               CFX Command Language for Run               |
+-----+
```

LIBRARY :

```
MATERIAL : sugar
Option = Pure Substance
PROPERTIES :
Option = General Fluid
Density = 1.3427E3 [kg m-3]
Dynamic Viscosity = 2.3677E-1 [kg m-1 s-1]
END
```

END

END

EXECUTION CONTROL :

```
PARTITIONER STEP CONTROL :
Runtime Priority = Standard
PARTITIONING TYPE :
MeTiS Type = k-way
Option = MeTiS
END
```

END

RUN DEFINITION :

```
Definition File = d:\cfxwork\crystallizer\halfmodel\halfmodel.def
Initial Values File = d:\cfxwork\crystallizer\halfmodel\halfmodel_025.r\
```

es

```
Run Mode = Full
```

END

SOLVER STEP CONTROL :

```
Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION :
Double Precision = Off
Use 64 Bit = Off
```

END

PARALLEL ENVIRONMENT :

```
Option = Serial
Parallel Mode = PVM
```

END

END

END

FLOW :

SOLUTION UNITS :

```
Mass Units = [kg]
Length Units = [m]
Time Units = [s]
Temperature Units = [K]
Angle Units = [rad]
Solid Angle Units = [sr]
```

END

SIMULATION TYPE :

```
Option = Steady State
```

END

```
DOMAIN : halfmodel
Location = halfmodel
Coord Frame = Coord 0
Fluids List = sugar
DOMAIN MODELS :
  DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
  END
  BUOYANCY MODEL :
    Option = Non Buoyant
  END
  REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
  END
END
FLUID MODELS :
  TURBULENCE MODEL :
    Option = Laminar
  END
  HEAT TRANSFER MODEL :
    Option = None
  END
  THERMAL RADIATION MODEL :
    Option = None
  END
END
SUBDOMAIN : draft
Location = draft
Coord Frame = Coord 0
END
SUBDOMAIN : baffle
Location = baffle
Coord Frame = Coord 0
END
SUBDOMAIN : outtube
Location = outtube
Coord Frame = Coord 0
END
SUBDOMAIN : impeller
Location = impeller
Coord Frame = Coord 0
SOURCES :
  MOMENTUM SOURCE :
    Momentum Source X Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Y Component = -50000 [kg m^-2 s^-2]
    Momentum Source Z Component = 0.00 [kg m^-2 s^-2]
  END
END
SUBDOMAIN : intube
Location = intube
Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : inflow
Boundary Type = INLET
Location = inflow
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
  FLOW REGIME :
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM :
    Option = Mass Flow Rate
    Mass Flow Rate = 4.6712E-4 [kg s^-1]
  END
  FLOW DIRECTION :
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
```

```
END
END
BOUNDARY : outflow
  Boundary Type = OUTLET
  Location = outflow
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
      Option = Static Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
  END
END
BOUNDARY : draftwall011
  Boundary Type = WALL
  Location = draftwall011
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
  END
END
END
BOUNDARY : draftwall012
  Boundary Type = WALL
  Location = draftwall012
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
  END
END
END
BOUNDARY : draftwall021
  Boundary Type = WALL
  Location = draftwall021
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
  END
END
END
BOUNDARY : draftwall022
  Boundary Type = WALL
  Location = draftwall022
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
  END
END
END
BOUNDARY : inwall011
  Boundary Type = WALL
  Location = inwall011
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
  END
END
END
```

```
BOUNDARY : inwall012
  Boundary Type = WALL
  Location = inwall012
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : inwall021
  Boundary Type = WALL
  Location = inwall021
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : inwall022
  Boundary Type = WALL
  Location = inwall022
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : outwall1
  Boundary Type = WALL
  Location = outwall1
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : outwall2
  Boundary Type = WALL
  Location = outwall2
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : baffle1
  Boundary Type = WALL
  Location = baffle1
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
BOUNDARY : baffle2
  Boundary Type = WALL
  Location = baffle2
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    WALL INFLUENCE ON FLOW :
      Option = No Slip
    END
  END
END
```



```

+-----+
|           Job Information           |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: JACKIE

Job started: Mon Jul 7 17:37:21 2003

```

+-----+
|           Memory Usage Information   |
+-----+

```

Data Type	Kwords	Words/Node	Kbytes	Bytes/Node
Real	25760.8	349.37	100628.1	1397.48
Integer	11914.4	161.58	46540.6	646.34
Character	890.3	12.07	869.4	12.07
Logical	10.0	0.14	39.1	0.54
Double	16.0	0.22	125.0	1.74

```

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

```

Domain Name : halfmodel

Total Number of Nodes	=	73735
Total Number of Elements	=	376481
Total Number of Tetrahedrons	=	376481
Total Number of Faces	=	40716

```

+-----+
| Initial Conditions Supplied by Fields in the Input Files |
+-----+

```

Domain Name : halfmodel

Pressure
 Pressure.Gradient
 Shear Strain Rate
 Total Pressure
 Velocity

```

+-----+
|           Average Scale Information   |
+-----+

```

Domain Name : halfmodel

Global Length	=	9.7038E-02
Density	=	1.3427E+03
Dynamic Viscosity	=	2.3677E-01
Velocity	=	2.8414E-02
Advection Time	=	3.4152E+00
Reynolds Number	=	1.5636E+01

```

+-----+
| The Equations Solved in This Calculation |
+-----+

```

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom

V-Mom

W-Mom

P-Mass

CFD Solver started: Mon Jul 7 17:37:29 2003

CFD Solver finished: Mon Jul 7 19:13:25 2003

Execution terminating: maximum number of time-step iterations,
or maximum time has been reached.

```
=====
Boundary Flow and Total Source Term Summary
=====
```

```
+-----+
|                U-Mom                |
+-----+
Boundary   : baffle1                    1.2295E-03
Boundary   : draftwall011                2.2233E-03
Boundary   : draftwall021                5.4820E-05
Boundary   : inflow                      3.0889E-06
Boundary   : inwall011                   5.4429E-05
Boundary   : inwall021                   4.1167E-04
Boundary   : outflow                     -2.0465E-07
Boundary   : outwall1                    1.0160E-03
Boundary   : sym                         -2.9413E-07
Boundary   : Default                     -3.9056E-03
Boundary   : draftwall012                -9.9255E-04
Boundary   : draftwall022               -1.4029E-05
Boundary   : inwall012                   3.4362E-06
Boundary   : inwall022                  -3.0552E-06
Boundary   : outwall2                    6.8126E-06
Boundary   : baffle2                     -8.7440E-05
-----
Global Balance :                        -8.7100E-08

Global Imbalance, in %:                   0.0000 %
```

```
+-----+
|                V-Mom                |
+-----+
Boundary   : baffle1                    -4.6596E-03
Boundary   : draftwall011               -6.9397E-03
Boundary   : draftwall021                6.5068E-05
Boundary   : inflow                     -1.0329E-02
Boundary   : inwall011                   4.8499E-03
Boundary   : inwall021                   1.0193E-03
Boundary   : outflow                     -2.5701E-05
Boundary   : outwall1                    -1.4851E-03
Boundary   : sym                         1.7902E-08
Boundary   : Default                     9.2094E-02
Boundary   : draftwall012                2.2858E-02
Boundary   : draftwall022                4.9161E-04
Boundary   : inwall012                   3.4096E-03
Boundary   : inwall022                   2.1762E-03
Boundary   : outwall2                    -5.4912E-03
Boundary   : baffle2                     -4.6841E-03
Sub-Domain : impeller                    -9.3349E-02
-----
Global Balance :                        5.2154E-07
```

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

```

+-----+
|                W-Mom                |
+-----+
Boundary   : baffle1                1.2863E+00
Boundary   : draftwall011           -1.8441E+00
Boundary   : draftwall021           -2.6562E-02
Boundary   : inflow                  -4.9548E-05
Boundary   : inwall011              -9.9345E-02
Boundary   : inwall021              -6.6061E-02
Boundary   : outflow                 4.2976E-05
Boundary   : outwall1               -1.7364E-01
Boundary   : sym                     -6.6244E+00
Boundary   : Default                 6.7921E+00
Boundary   : draftwall012            1.6887E+00
Boundary   : draftwall022            2.5776E-02
Boundary   : inwall012               1.2680E-01
Boundary   : inwall022               1.1387E-01
Boundary   : outwall2                8.7846E-02
Boundary   : baffle2                -1.2873E+00
-----
Global Balance :                    2.0266E-06

```

Global Imbalance, in %: 0.0000 %

```

+-----+
|                P-Mass                |
+-----+
Boundary   : inflow                 4.6712E-04
Boundary   : outflow                -4.6707E-04
-----
Global Balance :                    5.4832E-08

```

Global Imbalance, in %: 0.0117 %

```

=====
Wall Force and Moment Summary
=====

```

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|                Pressure Force On Walls                |
+-----+
X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
baffle1   -1.1272E-03  1.5370E-08 -1.2867E+00
draftwall011 -1.9686E-03 -2.6586E-03  1.8414E+00
draftwall021 -4.8741E-05  2.7003E-05  2.6530E-02
inwall011  -3.0126E-06 -4.6799E-07  9.9302E-02
inwall021  -1.9404E-04 -1.7073E-06  6.6031E-02
outwall1   -5.0330E-04  1.8375E-07  1.7356E-01
Default    3.8898E-03 -1.2390E-01 -6.7867E+00
draftwall012 1.8296E-03  2.5251E-03 -1.6912E+00
draftwall022 4.0935E-05 -2.6518E-05 -2.5747E-02
inwall012   3.4431E-06  6.8453E-07 -1.2678E-01
inwall022   4.0594E-06  9.3028E-06 -1.1392E-01
outwall2    -2.9104E-07 -6.1646E-06 -8.7868E-02
baffle2     1.7869E-04 -1.5348E-08  1.2863E+00

```


Viscous Force On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
baffle1	-1.0220E-04	4.6596E-03	4.9541E-04
draftwall011	-2.5473E-04	9.5983E-03	2.6204E-03
draftwall021	-6.0796E-06	-9.2071E-05	3.1933E-05
inwall011	-5.1420E-05	-4.8494E-03	4.3677E-05
inwall021	-2.1763E-04	-1.0176E-03	3.0634E-05
outwall1	-5.1265E-04	1.4849E-03	7.3270E-05
Default	1.5756E-05	3.1803E-02	-5.3383E-03
draftwall012	-8.3720E-04	-2.5383E-02	2.4885E-03
draftwall022	-2.6906E-05	-4.6509E-04	-2.9712E-05
inwall012	-6.8925E-06	-3.4103E-03	-2.6764E-05
inwall022	-9.9353E-07	-2.1856E-03	5.1280E-05
outwall2	-6.5248E-06	5.4974E-03	2.1524E-05
baffle2	-9.1713E-05	4.6841E-03	1.0290E-03

Pressure Moment On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
baffle1	-6.4085E-02	9.0986E-05	4.6562E-05
draftwall011	6.6945E-02	-1.8159E-07	9.8299E-05
draftwall021	4.0040E-05	-9.4588E-09	9.7630E-07
inwall011	4.7900E-03	-8.9372E-04	-4.7366E-09
inwall021	5.6482E-03	-5.9428E-04	1.6388E-05
outwall1	1.0828E-02	-8.4179E-03	3.8833E-05
Default	-2.4536E-01	-5.9571E-05	-4.2906E-04
draftwall012	-6.2037E-02	2.2176E-07	-1.1982E-04
draftwall022	-3.8686E-05	-5.1381E-08	-9.4452E-07
inwall012	-6.3393E-03	1.1410E-03	-7.4244E-08
inwall022	-9.8050E-03	1.0253E-03	-3.1776E-07
outwall2	-4.3957E-03	4.2616E-03	-3.1934E-07
baffle2	6.4074E-02	-1.2983E-05	-8.3409E-06

Viscous Moment On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
baffle1	2.0293E-04	8.5835E-06	2.1671E-06
draftwall011	3.3557E-04	1.8561E-05	4.0177E-06
draftwall021	-1.3605E-06	5.0121E-07	3.9422E-07
inwall011	-8.3225E-06	-2.0227E-07	-4.0134E-05
inwall021	6.0071E-07	4.4871E-07	9.0005E-06
outwall1	1.1409E-05	-1.8492E-06	1.1128E-04
Default	1.9925E-03	1.6190E-05	-6.4487E-05
draftwall012	-4.0270E-04	2.1654E-05	3.8903E-05
draftwall022	-8.7107E-06	1.6337E-07	1.5511E-06
inwall012	-7.1644E-06	2.5158E-07	-3.0511E-05
inwall022	9.3747E-07	-4.5888E-07	-1.9577E-05
outwall2	1.0940E-05	-1.0350E-06	2.6683E-04
baffle2	2.6448E-04	8.2787E-06	2.3294E-06

Locations of Maximum Residuals					
Equation	Node #	X	Y	Z	
U-Mom	70262	5.112E-02	2.466E-02	-3.141E-02	
V-Mom	7991	5.017E-02	1.000E-01	-2.494E-03	
W-Mom	17147	2.872E-02	-2.518E-02	2.963E-10	
P-Mass	42583	4.923E-02	9.634E-02	-1.926E-03	

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	2	2.55650E-04	7.73714E-08
V-Mom	1	2.31765E-03	2.09388E-07
W-Mom	2	2.45396E-04	8.80229E-08
P-Mass	2	1.20873E-04	2.37551E-08

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	1.05761E+02
V-Mom	Auto	1.05761E+02
W-Mom	Auto	1.05761E+02
P-Mass	Auto	1.05761E+02

Average Scale Information	
---------------------------	--

Domain Name : halfmodel
 Global Length = 9.7038E-02
 Density = 1.3427E+03
 Dynamic Viscosity = 2.3677E-01
 Velocity = 4.1368E-02
 Advection Time = 2.3457E+00
 Reynolds Number = 2.2764E+01

Variable Range Information	
----------------------------	--

Domain Name : halfmodel

Variable Name	min	max
Velocity u	-7.21E-02	7.00E-02
Velocity v	-1.60E-01	5.52E-02
Velocity w	-6.85E-02	7.10E-02
Pressure	3.55E-01	7.54E+02
Density	1.34E+03	1.34E+03
Dynamic Viscosity	2.37E-01	2.37E-01

CPU Requirements of Numerical Solution			
--	--	--	--

Subsystem Name	Discretization		Linear Solution	
	(secs. %total)	(secs. %total)	(secs. %total)	(secs. %total)
Momentum and Mass	4.45E+03	80.9 %	1.05E+03	19.1 %
Summary	4.45E+03	80.9 %	1.05E+03	19.1 %

| Job Information |
+-----+

Host computer: JACKIE
Job finished: Mon Jul 7 19:13:39 2003
Total CPU time: 5.679E+03 seconds
or: (0: 1: 34: 38.515)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.

This run of the CFX-5 Solver has finished.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจรรุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2519 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2542 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและช่วยวิจัย สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในหลาย ๆ ด้าน ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปีพุทธศักราช 2544