

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการผสมแบบหัวฉีดแรงดันโดยการทดลองและการจำลองโดยโปรแกรม

Star CD

Experimental Study and Simulation of Jet Mixing by Star CD Program



โดย
นายฤทธิศาสตร์ ศิริสุข
นายเอกสิทธิ์ จันทร์อ่อน
นางสาวเอี่ยมพร อินทร์นอก

วพ.
ก ๒๖๕ ก
๒๕๔๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62576
วัน,เดือน,ปี..... 19 ต.ค. 2549

b. 11626313
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน โดยการทดลองและการจำลองโดยโปรแกรม Star CD

Experimental Study and Simulation of Jet Mixing by Program Star CD

ผู้จัดทำ

นายกฤตภาส

ศิวจชัย

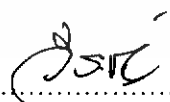
นายเอกสิทธิ์

จันทร์อ่อน

นางสาวเอี่ยมพร

อินทร์นอก



.......... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์วิระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการผสมแบบหัวฉีดแรงดันโดยการทดลองและการจำลองโดยใช้โปรแกรม Star CD

กฤตภาส ศิลุจชัย

เอกสิทธิ์ จันทร์อ่อน

เอี่ยมพร อินทร์นอก

อาจารย์วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการผสมโดยใช้หัวฉีดแรงดัน การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยการศึกษาจากเอกสารวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ออกแบบการทดลองจริง สร้างชุดทดลองการผสมแบบหัวฉีดแรงดันทำแบบจำลองการผสมของสารโดยใช้โปรแกรม Star CD ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ ทำการทดลองจริง วิเคราะห์ผลการทดลองจริงและผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการศึกษาพบว่าผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับผลจากการทดลองในถึงผสมจริง โดยพิจารณาจากเส้นทางการไหลของสารและค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ และยังพบว่าเมื่อหัวฉีดทำมุม 35 องศากับแนวตั้งและทำมุม 30 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง การผสมเกิดขึ้นเร็วที่สุด

Experimental Study and Simulation of Jet Mixing by Program Star CD

Krittapat Silootjai

Ekkasit Janon

Auemporn Innork

Weerachai Limpornchaichalearn Advisor

Abstract

The aim of this thesis is to study behavior of Jet Mixing by 1) Study from many journal, books, internet. 2) Design mixing tank and all accessories. 3) Modeling mixing tank by program computer. 4) Testing by real tank and simulate by program Star CD. 5) Compare and analyze the result from program Star CD and Testing by real tank. It was found that the result from program Star CD was intend to be similar to the result from testing by real tank. Concentration of product was used to indicate mixing process. And we found that the optimum horizontal angle was 30 degree and the optimum vertical angle was 35 degree.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำและช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กฤตภาส ศิวจชัย

เอกสิทธิ์ จันทร์อ่อน

เอี่ยมพร อินทร์นอก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตขั้นตอนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การผสม	5
2.1.1 ลักษณะของของผสมและวัตถุประสงค์ของการผสม	5
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสม (Factors on the Mixing)	6
2.1.3 การวัดการผสม (Measurement of Mixing)	7
2.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม (Mixing Equipment)	8
2.1.5 การผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (Jet Mixing)	10
2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.2.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของไหล	13
2.2.3 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของไหลสำหรับการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว	17
2.2.4 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของไหลสำหรับการไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัว	23
2.2.5 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์	25
2.2.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ความหนืด (Viscosity)	31
2.3.3 ความหนืดแบบคิเนแมติก (Kinematic Viscosity)	35
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลองและการสร้างแบบจำลอง	42
3.1 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	42
3.2 การออกแบบการทดลองจริงในถังผสม	48
3.2.1 สารที่ใช้ในการทดลอง	48
3.2.2 วิธีการทดลอง	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและผลของการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	49
4.1 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	49
4.2 ผลของการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	52
4.2.1 แสดงผลเป็นความเร็ว	52
4.2.2 แสดงผลเป็นความดัน	55
4.3 ภาพแสดงผลของการถ่ายวีดิโอจากการผสมในถังผสมจริง	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผล	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ภาพส่วนประกอบของชุดทดลอง	65
ภาคผนวก ข แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	67

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของเครื่องผสมของเหลวที่ใช้ใบพัดชนิดต่าง ๆ สำหรับ ความหนืดปานกลาง	9
ตารางที่ 2.2 อัตราเลื่อนในกระบวนการผลิตอาหาร	31
ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มข้น, ความหนาแน่น, ของน้ำเชื่อมที่อัตราส่วนน้ำหนักน้ำตาลต่อ น้ำเชื่อมต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ	34
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างอาหารที่เป็น Newtonian Fluid	36
ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Flow Behavior Index (n)และ Consistency Coefficient (K) ของของไหลชนิดต่างๆ	40
ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความหนืด ความถ่วงจำเพาะ และอุณหภูมิของของเหลวบางชนิด	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น	10
รูปที่ 2.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ	11
รูปที่ 2.3 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ	11
รูปที่ 2.4 เงื่อนไขขอบเขตการไหลที่ติดกับผนัง	18
รูปที่ 2.5 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว	19
รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสำหรับปัญหาการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว	20
รูปที่ 2.7 การคำนวณไหลควอเตอร์ที่ผนัง	22
รูปที่ 2.8 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของการไหลแบบคืบคลาน	25
รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่มีการกระจายของความเร็วและความดัน ในอันดับที่ต่างกัน	25
รูปที่ 2.10 ปัญหาการไหลระหว่างแผ่นเรียบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	28
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การกระจายของการไหลที่ได้จากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลเฉลยแม่นยำตรง	28
รูปที่ 2.12 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน	29
รูปที่ 2.13 การกระจายความเร็วของของไหลระหว่างแผ่นขนานเนื่องจากความหนืด	32
รูปที่ 2.14 ตำแหน่งของน้ำมันหล่อลื่นกับชั้นงาน 2 ชั้น (เมื่ออยู่กับที่และเคลื่อนที่)	33
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Newtonian Fluid	36
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Bingham Plastic Fluid	37
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Pseudo Plastic Fluid	37
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Dilatant Fluid	38
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการไหลของของไหล PseudoPlastic Fluid แบบ Power law	39
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time – Dependent Non – Newtonian	39
รูปที่ 3.1 แสดงถึงผลสมแบบกันเรียบ	42
รูปที่ 3.2 แสดงถึงผลสมแบบกันโค้ง	42
รูปที่ 3.3 แสดงถึงผลสมแบบกันกรวย	42
รูปที่ 3.4 แสดง Surface ของถึงกันเรียบ	43
รูปที่ 3.5 แสดง Surface ของถึงกันโค้ง	43
รูปที่ 3.6 แสดง Surface ของถึงกันกรวย	43
รูปที่ 3.7 แสดงท่อทางเข้า	44
รูปที่ 3.8 แสดงจำนวน Element ถึงผลสมแบบกันเรียบ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 แสดงจำนวน Element ถึงผสมแบบก้นโค้ง	44
รูปที่ 3.10 แสดงจำนวน Element ถึงผสมแบบก้นกรวย	45
รูปที่ 3.11 แสดงถึงผสมแบบก้นเรียบ	45
รูปที่ 3.12 แสดงถึงผสมแบบก้นโค้ง	45
รูปที่ 3.13 แสดงถึงผสมแบบก้นกรวย	45
รูปที่ 3.14 แสดง Top Plane	46
รูปที่ 3.15 แสดง Front plane	46
รูปที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง	47
รูปที่ 4.1 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 1)	49
รูปที่ 4.2 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 2)	50
รูปที่ 4.3 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 3)	50
รูปที่ 4.4 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาของการทดลองจริงเปรียบเทียบกับทั้งสามกรณี	51
รูปที่ 4.5 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที (กรณีที่ 1)	52
รูปที่ 4.6 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	52
รูปที่ 4.7 ตัดกึ่งกลางส่วน โค้งของก้นถึง	52
รูปที่ 4.8 ตัดก้นถึงทรงกระบอก	52
รูปที่ 4.9 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้นถึง	52
รูปที่ 4.10 ตัดที่ระดับ 30 cm จากก้นถึง	52
รูปที่ 4.11 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที (กรณีที่ 2)	53
รูปที่ 4.12 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	53
รูปที่ 4.13 ตัดกึ่งกลางส่วน โค้งของก้นถึง	53
รูปที่ 4.14 ตัดก้นถึงทรงกระบอก	53
รูปที่ 4.15 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้นถึง	53
รูปที่ 4.16 ตัดที่ระดับ 30 cm จากก้นถึง	53
รูปที่ 4.17 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที (กรณีที่ 3)	54
รูปที่ 4.18 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	54
รูปที่ 4.19 ตัดกึ่งกลางส่วน โค้งของก้นถึง	54
รูปที่ 4.20 ตัดก้นถึงทรงกระบอก	54
รูปที่ 4.21 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้นถึง	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	54
รูปที่ 4.23	แสดงสเกลความดัน (กรณีที่ 1)	55
รูปที่ 4.24	แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	55
รูปที่ 4.25	ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของกันถึง	55
รูปที่ 4.26	ตัดกันถึงทรงกระบอก	55
รูปที่ 4.27	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	55
รูปที่ 4.28	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	55
รูปที่ 4.29	แสดงสเกลความดัน (กรณีที่ 2)	56
รูปที่ 4.30	แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	56
รูปที่ 4.31	ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของกันถึง	56
รูปที่ 4.32	ตัดกันถึงทรงกระบอก	56
รูปที่ 4.33	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	56
รูปที่ 4.34	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	56
รูปที่ 4.35	แสดงสเกลความดัน (กรณีที่ 3)	57
รูปที่ 4.36	แสดงการตัดกึ่งกลางถึง	57
รูปที่ 4.37	ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของกันถึง	57
รูปที่ 4.38	ตัดกันถึงทรงกระบอก	57
รูปที่ 4.39	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	57
รูปที่ 4.40	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	57
รูปที่ 4.41	ตัดกันถึงทรงกระบอก (ภาพถ่ายจากการทดลองจริง กรณีที่ 1)	58
รูปที่ 4.42	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	58
รูปที่ 4.43	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	58
รูปที่ 4.44	ตัดกึ่งกลางถึง	58
รูปที่ 4.45	ตัดกันถึงทรงกระบอก (ภาพถ่ายจากการทดลองจริง กรณีที่ 2)	59
รูปที่ 4.46	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	59
รูปที่ 4.47	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	59
รูปที่ 4.48	ตัดกึ่งกลางถึง	59
รูปที่ 4.49	ตัดกันถึงทรงกระบอก (ภาพถ่ายจากการทดลองจริง กรณีที่ 3)	60
รูปที่ 4.50	ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง	60
รูปที่ 4.51	ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง	60
รูปที่ 4.52	ตัดกึ่งกลางถึง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันนี้ประชากรโลกเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการที่จะใช้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นอาหารสารเคมีที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น อุตสาหกรรมนม น้ำผลไม้ น้ำซอสเข้มข้นปรุงแต่ง ไอศกรีม โยเกิร์ต การปรุงแต่งกลิ่นและสีในเครื่องดื่ม ยาสีฟัน แชมพูสระผม น้ำยาล้างจานหรือจะเป็นผลิตภัณฑ์ซักผ้าและผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ซึ่งในอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องมีกระบวนการหนึ่งที่สำคัญมากคือ การผสม จึงมีการคิดค้นและศึกษาวิธีการผสมแบบต่างๆ อยู่เสมอ เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพและรวดเร็วประหยัดเวลาและงบประมาณ ไม่ว่าจะเป็น เครื่องกวนชนิดใบพาย (Paddle agitator) หรือเครื่องผสมชนิดใช้ใบพัดเรือ (Propeller agitator) และการผสมแบบใช้หัวฉีดแรงดัน

การผสมแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับการผสมแบบใช้หัวฉีดแรงดันนั้นจะมีข้อดีคือ ไม่มีส่วนใดของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ อุปกรณ์ราคาไม่แพง ใช้ได้ในสถานะผสมที่มีขนาดไม่ใหญ่ได้ ซึ่งการผสมแบบอื่นทำไม่ได้ ใช้ในการผสมสารที่มีสภาพเป็นกรดได้ และการดูแลรักษาก็สะดวกไม่ยุ่งยาก การผสมแบบใช้หัวฉีดแรงดันจึงเป็นวิธีการผสมที่น่าสนใจมากวิธีหนึ่ง แต่การผสมอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าไม่ทราบว่าตัวแปรใดที่มีผลต่อการผสมอย่างไร ที่สภาวะใดการผสมจึงจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อสารที่นำมาผสมมีคุณสมบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความหนืด ความหนาแน่น และคุณสมบัติอื่นๆ

อิทธิพลของตัวแปรแต่ละชนิดสามารถหาได้โดยการทดลองจริง แต่ในความเป็นจริงแล้วการทดลองจริงบางอย่างมีความยุ่งยากต้องใช้เวลาและงบประมาณมาก ดังนั้นจึงมีการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Simulation) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการแสดงผลของการผสมที่เกิดขึ้น ภายในถังผสมของของเหลว Non-Newtonian หรือของเหลว Newtonian ที่สามารถแสดงผลของการผสมในรูปแบบของตัวแปรต่างๆ ทำให้สามารถรู้เส้นทางการเคลื่อนที่และลักษณะการผสมได้ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบการผสมในอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hui HU, Tetsuo SAGA, Toshio KOBAYASHI และ Nobuyuki TANIGUCHI แห่ง Institute of Industrial Science, University of Tokyo Roppongi ได้เสนอผลงานเรื่อง PASSIVE เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL ON JET MIXING FLOWS BY USING VORTEX GENERATORS ซึ่งเป็นการทดลองเกี่ยวกับการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (Jet Mixing) โดยการฉีดน้ำด้วยหัวฉีดความดันเข้าไปในถังน้ำทรงลูกบาศก์ (600 มิลลิเมตร * 600 มิลลิเมตร * 1000 มิลลิเมตร) โดยมีตัวแปรต้น คือ ชนิดของหัวฉีดซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบหัววงกลมธรรมดา กับแบบหัวกลมที่มี tab ขึ้นออกมาด้วย จากการทดลองพบว่า หัวฉีดแบบที่มี tab ขึ้นออกมาด้วย ทำให้ช่วงการไหลแบบราบเรียบสั้นลงเมื่อเทียบกับแบบหัววงกลมธรรมดา ในการทดลองนี้ได้ใช้เทคนิค PLIF และ PIV ในการดูลักษณะการไหลของสาร

Gang Pan และ Hui Meng ได้ศึกษาการผสมในท่อที่มีการต่อหัวฉีดแรงดันสูงเข้าที่ตำแหน่งรัศมีของท่อผสมหรือที่เรียกว่า Tee Mixer ซึ่งในท่อนี้จะมีของเหลวที่ไหลแบบปั่นป่วน มีค่า Reynolds number เท่ากับ 20,850 และให้อัตราส่วนของความเร็วในท่อต่อความเร็วของเหลวจากหัวฉีดแรงดันสูงมีค่าตั้งแต่ 5.04 - 3.06 แล้วใช้เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) และ Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) ในการดูผลการทดลองและวิเคราะห์ลักษณะการผสม โดยดูจากการกระจายของลำของเหลวแรงดันสูงที่ถูกฉีดเข้าทางหัวฉีด และดูจากการกระจายความเข้มข้นจากศูนย์กลางของลำของเหลวเมื่อถูกฉีดเข้าไปในท่อ ในการทดลองนี้ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 1.27 เซนติเมตร

Forney และ Kwon (1979) ได้วัดความเข้มข้นของสารขณะมีการผสมแบบ Jet Mixing โดยใช้มีเทนเป็น Tracer ร่วมกับการใช้ flame ionization detector (FID) เพื่อหาอัตราส่วนความเร็วของไหลในท่อและของไหลจากหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุดในการผสมแบบ Jet-to-Pipe

Cozewith และ Busko (1989) ได้ศึกษาการผสมในท่อผสมแบบตัวทีหรือการผสมในท่อที่มีการต่อหัวฉีดแรงดันสูงเข้าที่ตำแหน่งรัศมีของท่อผสม (tee mixer) โดยใช้การวัดสีของ HCL/NaOH เพื่อเป็นตัวชี้วัดอัตราส่วนความเร็วและอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสมและท่อหัวฉีด พบว่าเมื่อให้มุมของหัวฉีดมีทิศทางเข้าหาศูนย์กลางของท่อผสมจะทำให้การผสมเกิดได้ดีที่สุด และทดลองที่ Reynolds numbers ค่าต่างๆ พบว่า เมื่อค่า Reynolds numbers สูงกว่า 10,000 แล้วค่า Reynolds numbers จะไม่มีผลต่อปริมาณการผสม

Maruyama และคณะ (1981) ทำการทดลองผสมไอน้ำร้อนและไอน้ำที่เย็นกว่าในท่อผสมแบบตัวที หรือการผสมในท่อที่มีการต่อหัวฉีดแรงดันสูงเข้าที่ตำแหน่งรัศมีของท่อผสม (tee mixer) แล้ววัดการกระจายของอุณหภูมิเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณการผสม

Hatch และคณะ (1995) ได้ทำการทดลองโดยใช้หัวฉีดชนิดของไหลที่เย็นกว่าเข้าไปในท่อที่มีของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยที่มุมของการฉีดตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของของไหลในท่อ เมื่อนำผลการวัดอุณหภูมิ เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปร่างของหัวฉีดที่มีผลต่อการผสม ได้ผลสรุปว่า ที่ momentum-flux ratio ค่าหนึ่ง ๆ การผสมจะลดลงตามค่า aspect ratio (อัตราส่วนความยาวของหัวฉีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด) ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Richard M. Lueptow ได้กล่าวถึงการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (JET MIXING) ว่าในอดีตมีการใช้การถ่ายภาพ และการวัดค่าการนำไฟฟ้า เพื่อพิจารณาปริมาณการผสมและจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อให้สารที่มีความหนาแน่นสูงไหลสู่สารที่มีความหนาแน่นต่ำการผสมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อให้สารที่มีความหนาแน่นต่ำไหลสู่สารที่มีความหนาแน่นสูง จากทฤษฎีนี้จึงสามารถประยุกต์ต่อไปได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อประสิทธิภาพการผสมอย่างไรบ้าง เช่น อัตราส่วนของความหนาแน่นของสารที่นำมาผสมกัน ความเร็วของลำของไหลที่ไหลเข้าสู่ภาชนะผสมและขนาดของภาชนะผสม งานวิจัยที่เกี่ยวกับ การผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (JET MIXING) ที่ได้ทำในช่วงทศวรรษ 1940 มีประโยชน์มากในการศึกษาการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน Richard M. Lueptow กำลังทำการวิจัยร่วมกับ Dr. David Eckmann เพื่อศึกษา Laminar Jet ตามแกนของท่อปิดโดยใช้เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) และการถ่ายภาพในการวิเคราะห์การไหล ซึ่งจะวิเคราะห์อิทธิพลของ Reynolds number ความแตกต่างของความหนาแน่นของสารที่นำมาผสมกันและความลึกของการผสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสม

J. A. Denev, J. Fröhlich and H. Bockhorn แห่ง Institute for Technical Chemistry and Polymer Chemistry, University of Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse 12, 76128 Karlsruhe, Germany ได้ทำการศึกษาค่าการผสมและการทำปฏิกิริยาเคมีโดยใช้วิธีการ Large Eddy Simulation (LES) พบว่าบริเวณที่มีการผสมสูงและอัตราการทำปฏิกิริยาสูงคือบริเวณที่มีค่าพลังงานจลน์สูง

นายยุทธพงศ์ แสงรัตน์และคณะ (2546) ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาค่าการผสมเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลำน้ำจากหัวฉีดแรงดันสูงที่ใช้ในการตัดโฟม โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงปะทะแผ่นโฟมที่เกิดจากการฉีดน้ำธรรมดากับการฉีดน้ำผสมทราย โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่ 0.3, 0.5, 0.8 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวฉีดและแผ่นโฟมที่ระยะต่างๆ พบว่าเมื่อผสมทรายกับน้ำจะเกิดแรงที่ปะทะกับแผ่นโฟมมีค่ามากกว่าการฉีดน้ำธรรมดา 30-50 %

นางสาวชลิตา เนียมนุ้ย (2546) ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาค่าการผสมอาหารเหลวโดยใช้เครื่องผสมแบบกระแสนในเส้นการไหล ได้พิจารณาดัชนีการผสมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของอาหารเหลว ณ บริเวณหน้าตัดขวางใด ของท่อผสมหลักกับค่าความเข้มข้นของอาหารเหลวที่เกิดจากการผสมที่สมบูรณ์

นายนิรภัฏ ห้วยเรไร (2544) ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาค่าการผสมอาหาร ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของมุมของใบพายและความเร็วรอบที่ใช้ในการผสมอาหาร เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมอาหารที่มีความหนืดต่ำถึงความหนืดปานกลางไม่เกิน 80 Pa.s ในการทดลองครั้งนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมโดยใช้การวัดค่า % สีที่จุดต่างๆ ของถังผสม ได้แก่ ก้นถัง กลางถัง และส่วนบนสุดของถัง โดยใช้ Colorimeter วัด ถ้าบริเวณใดมี % ของสีแต่ละสี (แดง น้ำเงิน เหลือง) ใกล้เคียงกันแสดงว่าผสมกันได้ดี

Gosman และ Simitovic (1986) ได้ใช้เอทิลีนร่วมกับการใช้ Flame Ionization Detector (FID) ในการศึกษาการผสมแบบ Jet-to-CrossFlow ในถังทรงสี่เหลี่ยม และพบว่ายิ่งมุมของหัวฉีดเพิ่มมากขึ้นยิ่งทวนกระแสของไหลในท่อหลัก การผสมก็จะมากขึ้นและได้ข้อสรุปด้วยว่ายิ่งอัตราส่วนของความเร็วของไหลจากหัวฉีดต่อความเร็วของไหลในท่อมักการผสมก็จะมากขึ้นด้วย

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อให้มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Star CD ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ ในการจำลองการไหลของของไหล

1.3.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสม

1.4 ขอบเขตขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาการใช้โปรแกรม Star CD

1.4.2 ทำแบบจำลองการผสมของสาร โดยใช้โปรแกรม Star CD ร่วมกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ

1.4.3 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อออกแบบการทดลองจริง

1.4.4 สร้างชุดทดลองการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน

1.4.5 ออกแบบการทดลองและทำการทดลองจริง

1.4.6 วิเคราะห์ผลการทดลองจริงและผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผสม

2.1.1 ลักษณะของของผสมและวัตถุประสงค์ของการผสม ในทางทฤษฎีแล้วกระบวนการผสมจะเริ่มจากองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์อยู่และองค์ประกอบเหล่านี้จะแยกกันอยู่ในสถานะต่างๆ เมื่อการผสมเกิดขึ้นและดำเนินต่อไป ตัวอย่างของผสมจะมีองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งหมดในสถานะ การผสมที่สมบูรณ์จะนิยามว่าเป็นสถานะที่ทุกอย่างที่สู่มมาจากสถานะที่ทำการผสมจะมีองค์ประกอบต่างๆ ในสัดส่วนที่เหมือนกันกับของผสมทั้งหมด การผสมของสารสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภทดังนี้

- (1) การผสมของของแข็งกับของแข็ง เช่น อาหารเด็กอ่อน อาหารสัตว์
- (2) การผสมของของแข็งกับของเหลว เช่น นมคั้นรูป น้ำเชื่อม
- (3) การผสมของของเหลวกับของเหลว เช่น มายองเนส
- (4) การผสมของแก๊สกับของเหลว เช่น น้ำโซดา
- (5) การผสมของแก๊สกับของแข็ง

วัตถุประสงค์ของการผสมในอุตสาหกรรมอาหารคือ

- (1) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารที่นำมาผสม เช่น การผสมน้ำตาลกับเกลือ เพื่อให้เกิดรสชาติรวมทั้งมีความหวานนำและความเค็มเป็นรอง ทำให้รสชาติที่ได้มีความกลมกล่อม
- (2) เพื่อช่วยคลุกเคล้าให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันและคุณลักษณะองค์ประกอบตามที่ต้องการ
- (3) เพื่อผสมอนุภาคของของแข็งชนิดต่างๆ ให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หรือสะดวกในการใช้ เช่น การทำส่วนผสมของแป้งสำเร็จรูปในการทำแพนเค้ก เป็นต้น
- (4) เพื่อผสมของเหลวชนิดต่างๆ ที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ ให้เกิดอิมัลชันขึ้น เช่น การโฮโมจีไนเซชันนํานม
- (5) เพื่อกระจายแก๊สเข้าไปในของเหลว
- (6) เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ ทำปฏิกิริยาเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าของผสมนั้นสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีต่อกัน เช่น การข่อยแป้งด้วยเอนไซม์
- (7) เพื่อเร่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับคอลล์หรือแจ็กเก็ตที่หุ้มอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสม (Factors on the Mixing) เนื่องจากประเภทของการผสมแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมจึงแตกต่างกัน ดังนั้นจึง แยกปัจจัยตามประเภทของการผสมออกได้ดังนี้

(1) การผสมของแข็งกับของแข็ง (Solid-Solid Mixing) การผสมของของแข็งกับของแข็ง จะเป็นการผสมของแข็งที่อยู่ในรูปอนุภาคคือ มีขนาดเล็ก กว่า 30 เมส ถึง 100 เมส และอนุภาคที่อยู่ในรูปผงคือ มีอนุภาคเล็กกว่า 100 เมส การผสมของแข็ง กับของแข็งต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้

ก. ขนาดอนุภาคของของแข็ง ของแข็งที่จะนำมาผสมกันควรบดให้มีขนาดเล็กและร่อนผ่านตระแกรงให้มีช่วงของอนุภาคใกล้เคียงกัน การผสมจะกระทำได้ง่ายและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เพราะของแข็งที่มีอนุภาคใหญ่มักจะแยก ตัว เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจะทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไหลลงสู่ด้านล่าง

ข. ความหนาแน่นของสาร องค์ประกอบที่จะผสมกันหากมีความหนาแน่นเท่ากันหรือใกล้เคียงกันจะผสมกันได้ง่ายกว่าองค์ ประกอบที่มีความหนาแน่นต่างกัน เพราะองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูงจะมีน้ำหนักมากกว่า องค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำ

ค. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ เป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของของผสมระหว่างองค์ประกอบ ที่มีความหนาแน่นต่ำกับองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูง ของผสมใดที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ เกินกว่า 90% จะผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย

ง. ลักษณะของขนาดและรูปร่าง องค์ประกอบต่างๆ ที่นำมาผสมกันควรมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปสารที่นำมาผสมจะเป็นอนุภาคทรงกลมและมีขนาดเล็ก ถ้าองค์ประกอบใดมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันจะผสมให้กลมกลืนกันได้ลำบาก โดยเฉพาะรูปร่างกลมจะเคลื่อนที่ได้ง่าย และจะพยายามแยกตัวออกมาด้านล่าง ดังนั้นลักษณะรูปร่างจึงเกี่ยวข้องกับการไหลของสาร

จ. แรงยึดเหนี่ยวของสาร สารแต่ละชนิดจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแตกต่างกัน สารใดมีแรงยึดเหนี่ยวสูงจะผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก จึงจำเป็นต้องทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะกัน ให้แยกออกจากกันก่อนโดยใช้แรงปั่นหรือกวน ถ้าไม่แยกอนุภาคที่มาเกาะติดกันเสียก่อน การผสมจะดำเนินไปได้ยากมากและไม่อาจผสมให้สม่ำเสมอได้ โดยเฉพาะสารที่ดูดความชื้นได้ง่าย จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง แรงยึดเหนี่ยวของสารอาจเกิดจากความแตกต่างของประจุก่อให้เกิดแรงเหนี่ยวนำ เป็นผลทำให้อนุภาครวมตัวกันได้

ฉ. อัตราส่วนที่ผสม ถ้าสารแต่ละชนิดมีสัดส่วนของปริมาณที่จะนำมาผสมใกล้เคียงกัน จะผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย โดยการควบคุมปริมาณของสารแต่ละชนิดให้นำมาผสมพร้อมๆ กันและจำนวนเท่าๆ กัน อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของสารชนิดหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าของสารอีกชนิดหนึ่งในอัตราส่วนที่แตกต่างกันมาก เช่น การผสมวิตามินในอาหาร ปริมาณวิตามินที่ผสมจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆ การที่จะผสมให้ได้องค์ประกอบที่สม่ำเสมอได้ จะต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสมด้วย

(2) การผสมของแข็งกับของเหลว (Solid-Liquid Mixing) ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของแข็งกับของเหลวคือ

ก. ความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อของแข็งละลายตัวได้ดีในของเหลว การผสมสามารถกระทำได้ง่ายเมื่ออนุภาคของของแข็งมีขนาดเล็ก โดยการผสมจะทำให้รวดเร็วมีประสิทธิภาพขึ้น เมื่อมีการกวนหรือคน ของแข็งบางชนิดจะละลายตัวได้เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น การผสมแป้งกับน้ำ การผสมเจลาตินกับน้ำ

ข. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของสารที่ผสม เมื่อของแข็งไม่ละลายในของเหลวหรือของแข็งละลายได้เพียงบางส่วน ของแข็งจะตกตะกอนนอนก้นที่ด้านล่าง เนื่องจากของแข็งมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าของเหลว ถ้าของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดการแยกชั้นได้เร็วขึ้น ดังนั้นของแข็งควรมีขนาดของอนุภาคเล็ก เพื่อให้การกระจายตัวของแข็งในของเหลวสม่ำเสมอ การกวนหรือคนจะช่วยให้ของแข็งกระจายตัวในของเหลวดีขึ้น และช่วยแก้ปัญหาการตกตะกอนของของแข็งและการแยกชั้น

ค. ความหนืดของของเหลว การเพิ่มความหนืดของของเหลวให้สูงขึ้น เป็นวิธีทำให้ของแข็งที่ไม่ละลายในของเหลวผสมกันได้ดี โดยเติมสารบางชนิดที่เพิ่มความหนืดของของเหลว เช่น การเพิ่มความหนืดของน้ำซึ่งเป็นของเหลว โดยการเติมเพกทิน เจลาติน วุ้น หรือสารคงตัวอื่นๆ นอกจากนี้การเติมสารที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับอนุภาคของของแข็ง ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวช่วยไม่ให้ของแข็งแยกตัวจากของเหลว

(3) การผสมของเหลวกับของเหลว (Liquid-Liquid Mixing) ของเหลวแต่ละชนิดที่นำมาผสมกันมักมีคุณสมบัติการไหลแตกต่างกัน ของเหลวอาจเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) หรืออาจเป็นของไหลที่มีคุณสมบัติเป็นนอนนิวโตเนียน (Non - Newtonian Fluid) ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของเหลวกับของเหลวคือ

ก. ความสามารถในการละลายของของเหลวที่ผสมกัน สามารถละลายเข้ากันได้ หรือรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ เช่น การผสมอัลกอฮอล์กับน้ำ การผสมน้ำมันรำกับน้ำมันถั่วลิสง การผสมของเหลวประเภทนี้จะทำได้ง่ายเพียงใช้เครื่องประเภทกวนหรือคนช่วยในการผสม

ข. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของของเหลวที่ผสม ซึ่งอาจไม่รวมตัวกัน เนื่องจากมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่ด้านบน เช่น การผสมน้ำมันกับน้ำนม ส่วนที่เป็นครีมซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจะลอยขึ้นด้านบน การผสมของเหลวประเภทนี้กระทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ช่วยโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์

2.1.3 การวัดการผสม (Measurement of Mixing) ในงานทางด้านอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวข้องกับการผสม ระดับความสม่ำเสมอของผสมเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด เพื่อที่จะหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผสมและผลของการผสมที่ได้ จึงจำเป็นต้องคำนวณหาคุณภาพของการผสม ซึ่งเป็นวิธีการประมาณระดับและเช็ดตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาหลังการผสมผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามการประมาณดังกล่าวจำเป็นต้องวิเคราะห์จากมวลซึ่งทำการสุ่ม โดยมวลมีค่าคงที่ที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งและระดับของความไม่สม่ำเสมอแสดงได้โดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter) หรืออาจใช้ค่าความเข้มข้นหรือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ถ้าของผสมที่มี 2 องค์ประกอบถูกสุ่มขึ้นมาในตอนเริ่มต้นของการผสม (ในสภาวะที่ยังไม่มีการผสมเกิดขึ้น) ตัวอย่างส่วนใหญ่ที่สุ่มขึ้นมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบตัวหนึ่งเท่านั้น เมื่อการผสมดำเนินต่อไป องค์ประกอบของแต่ละตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาจะเริ่มมีความสม่ำเสมอและเข้าใกล้องค์ประกอบเฉลี่ยของของผสมมากขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งในการหาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบคือการตรวจสอบวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของสีอาหาร หรืออาจใช้วิธีการคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละสัดส่วนในตัวอย่างหลายๆ ครั้ง

การศึกษาคิดค้นและพัฒนาการวัดคุณภาพการผสมและการไหลของของเหลวมีมานานมาแล้ว ในปัจจุบันมีวิธีการแบบต่างๆ เช่น Hot Wire Anemometry (HWA) และจากการพัฒนาการนำแสงเลเซอร์มาใช้ประโยชน์ก็ได้มีการพัฒนา Laser Doppler Anemometry (LDA) ด้วย หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนา Laser Doppler Anemometry (LDA) ให้ดีมากขึ้นกลายเป็น Phase Doppler Anemometry (PDA)

เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) เป็นวิธีการที่ใช้วัดความเร็วได้ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติและ ส่วน Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) นั้นก็มีประสิทธิภาพสูงมากในการวัดความเข้มข้นของสารในกระบวนการผสม

2.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม (Mixing Equipment) ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการออกแบบและผลิตเครื่องผสมออกมาเป็นจำนวนมาก การเลือกชนิดและขนาดของเครื่องผสมที่ถูกต้องขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอาหารที่จะมาผสม และความเร็วของการปฏิบัติงานเพื่อให้ได้ระดับของการผสมที่ต้องการ โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด เครื่องผสมจะแบ่งออกตามลักษณะการทำงานสำหรับอาหารต่อไปนี้

- (1) ของเหลวที่มีความหนืดต่ำ
- (2) ของเหลวที่มีความหนืดสูง
- (3) อาหารผงที่แห้งหรือของแข็งที่เป็นชิ้น

เครื่องผสมหลายชนิดที่มีการออกแบบเพื่อผสมของเหลวในภาชนะที่มีแผ่นกั้น (Baffle) หรือไม่มีแผ่นกั้นก็ได้ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละประเภทตามลักษณะการใช้งานสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องผสมของเหลวที่ใช้ใบพัดชนิดต่างๆ สำหรับความหนืดปานกลาง

ชนิดของใบพัดที่ใช้ในการผสม	ข้อดี	ข้อเสีย
ใบพาย	1.ป้องกันการไหม้ของอาหารได้ 2.ราคาถูกกว่าชนิดอื่น	1.ใช้ได้ด้วยความเร็วต่ำ 2.ใช้เวลานานกว่า
ใบพัดเรือ	1.การไหลทั่วทั้งถังผสม 2.ใช้เวลาการผสมน้อย	1.ราคาแพงกว่าชนิดใบพาย 2.ป้องกันการไหม้ของอาหารไม่ได้เมื่ออาหารนั้นต้องใช้ความร้อน 3.ใช้ที่ความหนืดปานกลาง
ใบพัดกังหัน	1.การผสมดีมาก ไหลทั่วทั้งถังผสม 2.ใช้เวลาในการผสมน้อยที่สุด	1.ราคาแพงกว่าชนิดอื่น 2.ป้องกันการไหม้ของอาหารไม่ได้เมื่ออาหารนั้นต้องใช้ความร้อน 3.ใช้ที่ความหนืดช่วงกว้าง

(1) เครื่องผสมชนิดใช้ใบพัดเรือ (Propeller Gitator) เป็นใบพัดความเร็วสูง ไหลตามแนวแกนเหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับใบพัดเรือขนาดเล็กจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของมอเตอร์ (1,150 rpm ถึง 1,750 rpm) ถ้าเป็นใบพัดเรือขนาดใหญ่จะหมุนที่ 400-800 rpm ระยะทางที่ใบพัดหมุน 1 รอบ แล้วนำของเหลวเคลื่อนที่ไปตามความยาวจะขึ้นอยู่กับมุมของความชันของใบพัดเรือ อัตราส่วนของระยะทางนี้ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรือเรียกว่า Pitch ของใบพัด

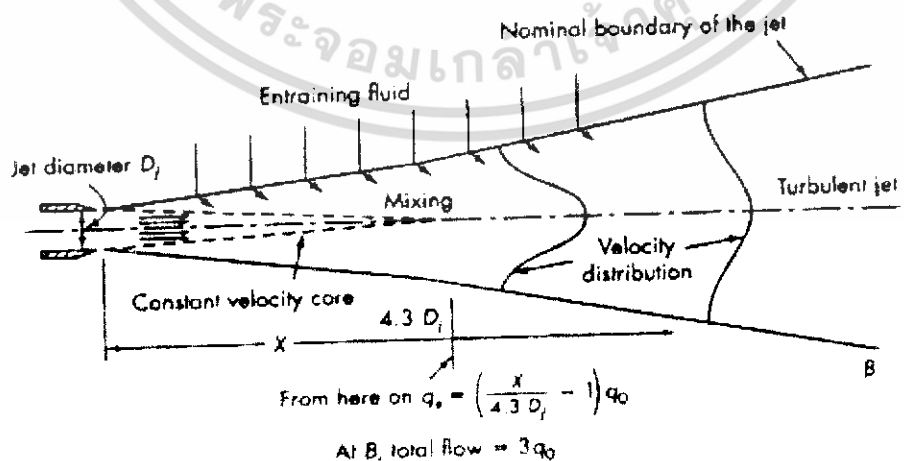
(2) เครื่องกวนชนิดใบพาย (Paddle Agitator) ใบพัดมีลักษณะคล้ายใบพายที่แบน หมุนรอบเพลาในแกนตั้งมักนิยมใช้ใบพายแบบ 2 หรือ 4 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลาง ประมาณ 20-200 รอบต่อนาที ณ ศูนย์กลางของถังผสม ซึ่งจะดันของเหลวในแนวรัศมี โดยไม่มีการเคลื่อนในแนวตั้งยกเว้นใบพัดแบบ Pitch ความยาวทั้งหมดของใบพัดชนิดนี้เป็น 50-80% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม และความกว้างของใบพายเป็น 1/6 ถึง 1/10 ของความยาวการกวนที่ความเร็วต่ำมักใช้ในถังผสมที่ไม่มีแผ่นกั้น แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นจะต้องใช้แผ่นกั้นเนื่องจากของเหลวจะหมุนรอบซึ่งมีด้านการผสมเกิดขึ้นเล็กน้อย ถ้าไม่มีแผ่นกั้นใบพัดชนิดนี้จะมีสมบัติที่สามารถป้องกันการไหม้ของอาหารที่จะติดกันถังได้ และสามารถใช้กับอาหารที่มีความหนืดทุกช่วงที่ต้องการใช้ในการผสมอาหารที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

(3) เครื่องกวนชนิดใช้ใบพัดเทอร์ไบน์ (Turbine Agitator) ประกอบด้วยใบพัดคล้ายกับใบพายหลายใบแต่ใบพัดจะสั้นกว่าและหมุนด้วยความเร็วสูง มีขนาดประมาณ 30-50% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม ใบพัดกั้นสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดในช่วงกว้าง

2.1.5 การผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (Jet Mixing) เป็นวิธีการผสมสารโดยใช้หัวฉีดแรงดันฉีดสารให้มีความเร็วสูงเพื่อให้สารผสมกันได้ดีขึ้น โดยใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของของไหลผ่าน Nozzle ทั้งสารที่มีความหนืดต่ำและสารที่มีความหนืดสูง ข้อดีของการผสมแบบหัวฉีดแรงดัน (Jet Mixing) ได้แก่

- (1) ไม่มีส่วนใดของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่
- (2) อุปกรณ์ราคาไม่แพง
- (3) ใช้ได้ในสถานะผสมที่ไม่ใหญ่ได้ ซึ่งการผสมแบบอื่นทำไม่ได้
- (4) ใช้ในการผสมสารที่มีสภาพเป็นกรดได้
- (5) การดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก

กระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่นจะมีความเร็วสูง รูปร่างแน่นอนและคงที่จนถึงระยะ 4.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องแคบหัวฉีดพ่น ซึ่งระยะดังกล่าวนี้จะเกิดการผสมกันขึ้นระหว่างของเหลวที่พ่นออกมา กับของเหลวที่อยู่ในถังผสม รูปร่างของกระแสการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือแกนการไหลจะเริ่มหดลงจนหายไปซึ่งแปรผันตามระยะทางที่ห่างออกจากช่องแคบหัวฉีดพ่น อีกทั้งความเร็วจะลดลงด้วยจนในที่สุดกลายเป็นกระแสการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งขบวนการนี้เรียกว่า Entrainment ฉะนั้นระยะที่ห่างมากกว่า 4.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องแคบหัวฉีด จะเกิดแรงเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่ขอบเขตระหว่างสายพ่นกับของเหลวที่หยุดนิ่ง ทำให้กระแสวน (Eddy) ถูกเหนี่ยวนำเกิดความปั่นป่วน (Turbulence) มากขึ้นและการผสม (Mixing) จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น



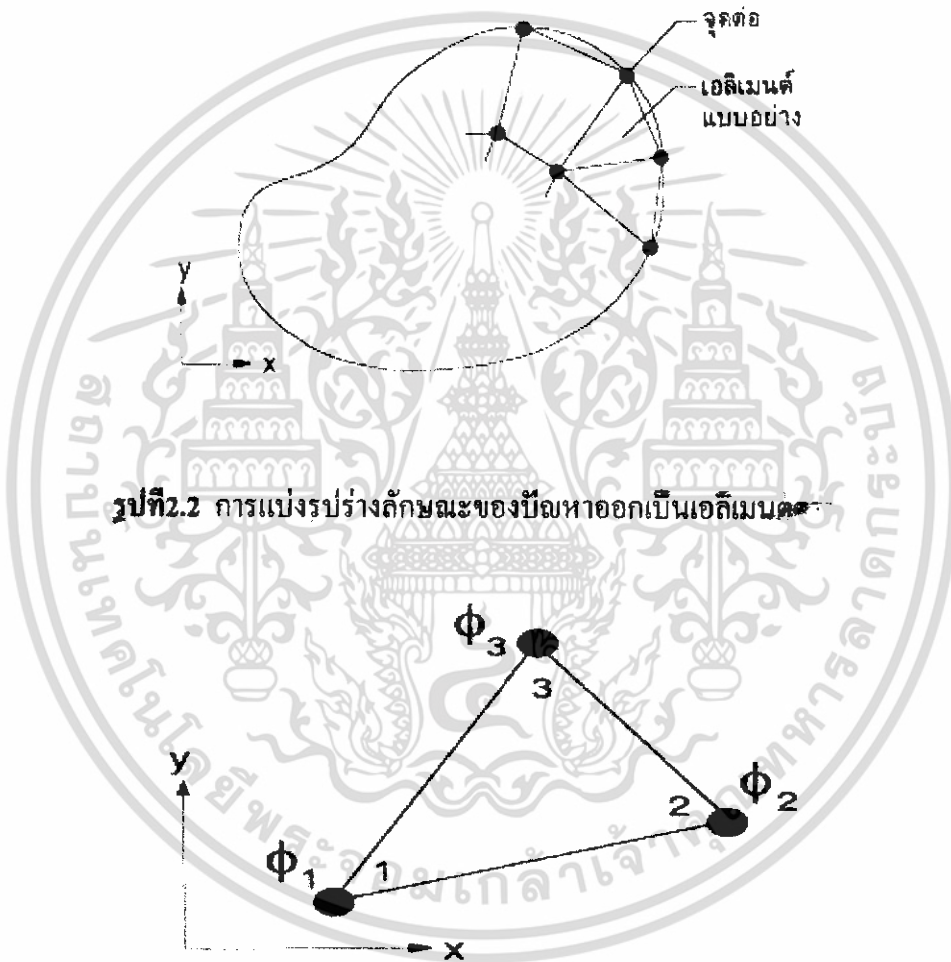
รูปที่ 2.1 กระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้น ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิจและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



รูปที่ 2.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์

รูปที่ 2.3 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.2) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่จุดต่อไปนี้นี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นการยืดหรือหดตัว (Displacement) หากเราทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (1)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ สมการ (1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{\{\phi\}} \end{aligned} \quad (2)$$

โดย $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในที่นี้สัญลักษณ์ $[]$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวอน (Row Matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมตริกซ์แฉ่ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (3)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[k]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (4)$$

ในขั้นที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการ (3) สมการทำได้โดย

- (1) วิธีการโดยตรง (Direct Approach)
- (2) วิธีการแปรผัน (Variational Approach)
- (3) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{Element Equations}) \Rightarrow [k]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (5) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง เราสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

2.2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของไหล ในปัจจุบันการประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณลักษณะการไหลผ่านวัตถุ ที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ได้ถูกพัฒนาไปได้ไกลมาก เช่น การคำนวณหาภาวะอากาศที่ผ่านรถยนต์หรือเครื่องบินสามารถทำได้โดยไม่ต้องนัก การคำนวณดังกล่าวสามารถบ่งบอกลักษณะการไหลเวียนของอากาศผ่านวัตถุเหล่านั้น รวมทั้งความดันและแรงดันที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ผลลัพธ์ที่ได้มีส่วนช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบรูปร่างลักษณะวัตถุที่ดีที่สุดขึ้นมาได้ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นของจริง ซึ่งจะช่วยทุ่นเวลาและประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

สมการพื้นฐานทั่วไป ก่อนที่จะศึกษาลงไปในรายละเอียดการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาของการไหลในแบบต่างๆ กัน ควรจะมาทำความเข้าใจและศึกษาสมการพื้นฐานที่จำเป็นเกี่ยวกับการไหลก่อน โดยเริ่มจากคำนิยามของของเหลว (Fluid) ที่มีความหมายโดยทั่วไปที่ว่า เป็นสารต่อเนื่องที่อาจอยู่ในสภาวะของเหลวหรือแก๊สซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปได้ภายใต้ความเค้นที่มากระทำ การไหลของของเหลวจะขึ้นอยู่กับหรือเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทางและเวลา ในการคำนวณสภาวะลักษณะการไหลของของเหลว มักจะตั้งสมมติฐานต่างๆ กันขึ้นมาโดยไม่ให้เกิดความแตกต่างไปจากความเป็นจริงมากนักและจะเป็นผลให้การทำการคำนวณนั้นง่ายขึ้น เริ่มตั้งแต่เราอาจสมมติว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบไม่หนืด (Inviscid Flow) หรือเป็นการไหลแบบหนืด (Viscous Flow) การไหลแบบไม่หนืดเป็นการไหลที่ไม่มีมีความเสียดทานซึ่งในความเป็นจริงนั้นไม่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีหลายๆ ปัญหาที่สามารถละทิ้งความเสียดทานไปได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลผิดพลาดจากความเป็นจริงมากนักแต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้การคำนวณนั้นง่ายขึ้นมาก การไหลแบบไม่หนืดยังจำแนกออกได้เป็นแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) และแบบอัดตัว (Compressible Flow) การไหลแบบไม่อัดตัวปกติจะเกิดขึ้นกับของเหลว (Liquid) ในขณะที่การไหลแบบอัดตัวโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นกับแก๊ส (Gas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการไหลแบบหนืดเป็นการไหลที่เกิดขึ้นในความเป็นจริงจึงมีความสำคัญมากต่อการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เรียกการไหลแบบหนืดว่าเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian) ต่อเมื่อกฎเกณฑ์การเสียดทานของสโตกส์ (Stokes's Law) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในของเหลวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ แต่หากความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้นอยู่ในรูปแบบอื่นซึ่งเกิดขึ้นในความเป็นจริงในของเหลวบางชนิด จะเรียกการไหลของของเหลวเหล่านั้นว่าไม่เป็นแบบนิวโทเนียน (Non – Newtonian)

ในการคำนวณหาลักษณะของการไหลโดยทั่วไป จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับ

- (1) การอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)
- (2) การอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum)
- (3) การอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

ซึ่งประกอบด้วยสมการทั้งหมด 5 สมการ ในปัญหาโดยทั่วไปแบบสามมิติเพื่อให้ง่ายแก่การทำ ความเข้าใจและสามารถเขียนสมการต่างๆ เหล่านี้ได้สั้นลงในที่นี้แต่ในขณะเดียวกันจะไม่ทำให้ความ เข้าใจนั้นลดลง จะศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้ในสองมิติดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

โดย ρ แทนความหนาแน่นมวล (Mass Density), t แทนเวลา, u และ v แทนความเร็วของของเหลวในแกน x และ y ตามลำดับ สมการ (6) สามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (7)$$

$$\bar{v} = u\hat{i} + v\hat{j} \quad (8)$$

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} \quad (9)$$

ซึ่ง \hat{i} และ \hat{j} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศแกน x และ y ตามลำดับ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = \rho B_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (10a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho B_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \quad (10b)$$

โดย B_x และ B_y แทนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวต่อมวลหนึ่งหน่วยในทิศแกน x และ y ตามลำดับ P แทนความดัน (Pressure) ส่วนค่าความเค้นต่างๆ ที่ปรากฏในสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าความหนืดและความเร็วตามกฎการเสียดทานของสโตกส์ได้ดังนี้

$$\sigma_x = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{v} \quad (11a)$$

$$\sigma_y = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{v} \quad (11b)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (11c)$$

โดย μ แทนค่าความหนืด (Viscosity)

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) + P \bar{\nabla} \cdot \bar{v} - Q = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \Phi \quad (12)$$

โดย e แทนพลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน T แทนอุณหภูมิ และ Φ แทนฟังก์ชันการกระจายความหนืด (Viscous Dissipation Function) ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบความเร็วได้ดังนี้

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (13)$$

สำหรับการไหลในสองมิติ สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดนั้นประกอบด้วย 4 สมการดังแสดงในสมการ(6), (10a – b) และ (12) แต่เรามีตัวไม่รู้ค่าถึง 7 ตัวซึ่งก็คือ ρ , u , v , P , T , e และ μ ดังนั้นจึงต้องการอีก 3 สมการซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบต่างๆ ไปได้คือ

$$\text{สมการของสถานะ} \quad \rho = \rho(P, T) \quad (14)$$

$$\text{สมการของพลังงานภายใน} \quad e = e(P, T) \quad (15)$$

$$\text{สมการของความหนืด} \quad \mu = \mu(P, T) \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัญหาทั่วไป ทั้งสามสมการหลังนี้เราจะทราบลักษณะความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนั้นเราจะมีสมการที่จำเป็นต้องแก้ทั้งหมด 4 สมการเพื่อช่วยในการคำนวณหาตัวไม่รู้ค่าซึ่งก็คือ ความเร็ว u และ v ในทิศแกน x และ y , ความดัน P , และอุณหภูมิ T สำหรับการไหลของของเหลวในสองมิติ

สำหรับการทำการคำนวณที่ปรกติกระทำกันในปัจจุบัน สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานสำหรับการไหลแบบสองมิติทั้ง 4 สมการนี้มักจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \{U\} + \frac{\partial}{\partial x} \{E_x - E_x\} + \frac{\partial}{\partial y} \{F_y - F_y\} = 0 \quad (17)$$

โดย $\{U\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรอนุรักษ์ (Conservation Variables) ที่ไม่รู้

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$\{E_x\}$ และ $\{F_y\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยปริมาณฟลักซ์แบบไม่หนืด (Inviscid Flux) ในทิศแกน x และ y ตามลำดับ

$$\{E_x\} = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ \rho u \varepsilon + Pu \end{Bmatrix} \quad \{F_y\} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ \rho v \varepsilon + Pv \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$\{E_v\}$ และ $\{F_v\}$ เป็นปริมาณฟลักซ์หนืด (Viscous Flux) ในทิศแกน x และ y ตามลำดับ

$$\{E_v\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ u\sigma_x + v\tau_{xy} - q_x \end{Bmatrix} \quad \{F_v\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \\ u\tau_{xy} + v\sigma_y - q_y \end{Bmatrix} \quad (20)$$

โดย ε แทนพลังงานรวม (Total Energy) ซึ่งก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (21)$$

และสำหรับแก๊สสมบูรณ์แบบ (Perfect Gas) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ρ และ P ความดัน คือ

$$P = (\gamma - 1)\rho \left(\varepsilon - \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \right) \quad (22)$$

โดย γ แทนอัตราส่วนความร้อนจำเพาะและในสมการ (20) ปริมาณความร้อนในทิศแกน x และ y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิโดยใช้กฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) กล่าวคือ

$$q_x = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{และ} \quad q_y = -K \frac{\partial T}{\partial y} \quad (23)$$

2.2.3 วิธีการไฟนิตเออิมเมนต์กับปัญหาของไหลสำหรับการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว

สมการเชิงอนุพันธ์ การไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัวเป็นการไหลแบบที่ง่ายที่สุดที่มีค่าของความหนืด (Viscosity) ที่ก่อให้เกิดความเสียหายนั้นน้อยมากและจะทำการละทิ้ง สมมติฐานดังกล่าวโดยทั่วไปแล้วสามารถใช้ได้เฉพาะกับการไหลที่ค่อนข้างห่างจากผนังซึ่งมีขอบชั้น (Boundary Layer) ที่มีความเสียดทานเกิดขึ้น และในขณะเดียวกันจะสมมติการไหลนี้ว่าเป็นการไหลแบบไม่เกิดการอัดตัว กล่าวคือค่าความหนาแน่น ρ คงที่ ซึ่งยังส่งผลให้สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล (6) ลดรูปลงเป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

หากเราเขียนความเร็ว u และ v ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการไหล (Stream Function), $\Psi(x,y)$, ในรูปแบบดังนี้

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad \text{และ} \quad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (25)$$

แล้วหากแทนสมการ (25) ลงในสมการ (24) เราจะพบว่าสมการของการอนุรักษ์มวลดังกล่าว นั้นสอดคล้องถูกต้องโดยสมบูรณ์นั่นคือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = 0 \quad (26)$$

เมื่อสมมติว่าการไหลนั้นเป็นแบบไม่อัดตัวคือมีค่า P คงที่และเป็นการไหลแบบไม่หนืดโดยมีค่า $\mu = 0$ และหากการไหลนั้นเป็นการไหลแบบไร้การหมุน (Irrotational Flow) แล้วเรียกการไหลแบบนี้ว่าการไหลศักย์ (Potential Flow) การไหลแบบไร้การหมุนนี้เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\nabla \times \vec{v} = 0 \quad (27)$$

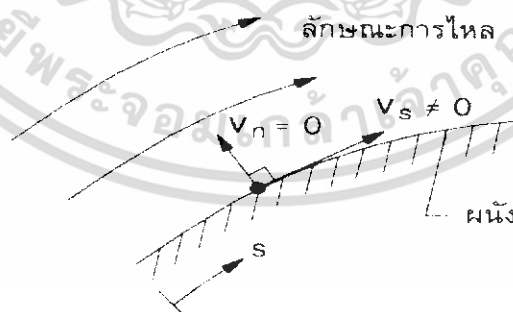
ซึ่งก็คือ

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (28)$$

แทนสมการ (25) ลงในสมการ (28) จะได้

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0 \quad (29)$$

สมการ (29) ที่ได้อยู่ในรูปแบบของสมการลาปลาซ (Laplace Equation) ผลลัพธ์ของฟังก์ชันการไหลจากสมการนี้จะมีลักษณะเช่นใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ของการไหลนั้น เงื่อนไขขอบเขตของการไหลที่อยู่ติดกับผนัง (Wall) สามารถอธิบายได้โดยพิจารณารูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เงื่อนไขขอบเขตการไหลที่ติดกับผนัง

หากผนังอยู่ในแนวของพิกัด S และจากสมมติฐานของการไหลไม่หนืด ความเร็วของของเหลว

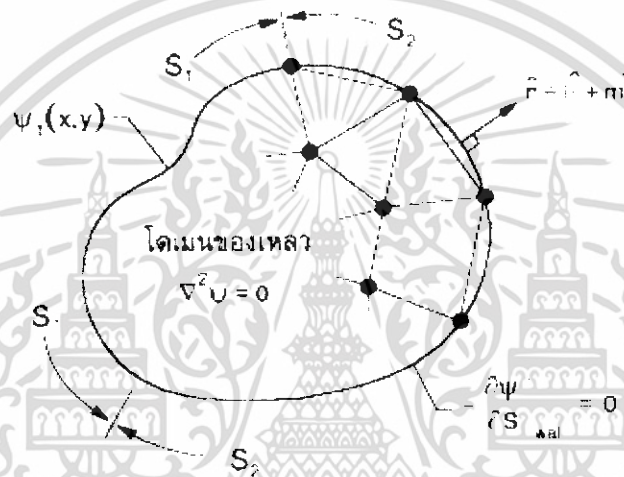
v_s ในแนวพิกัด S จะไม่เท่ากับศูนย์แต่ความเร็ว V_n ในแนวตั้งฉากกับผนังนั้นจะเท่ากับศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_n \Big|_{wall} = 0 \quad (30a)$$

เปรียบเทียบสมการนี้กับสมการ (25) จะได้

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial s} \Big|_{wall} = 0 \quad (30b)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.5 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว

รูปที่ 2.5 แสดงโดเมนขอบเขตของการไหลทั่วไปโดยลักษณะของการไหลภายในขอบเขตนั้น ถูกครอบคลุมด้วยสมการในรูปแบบของลาปลาซ เงื่อนไขขอบเขตประกอบด้วยข้อกำหนดฟังก์ชันการไหลหรือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตผนังดังแสดงในสมการ (30) การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหานี้สามารถทำได้โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) วิธีการดังกล่าวเริ่มจากการทำการคูณเศษตกค้างซึ่งก็คือสมการเชิงอนุพันธ์นั้นด้วยฟังก์ชันน้ำหนักแล้วทำการอินทิเกรตรอบพื้นที่ของเอลิเมนต์และบังคับผลลัพธ์ที่ได้นั้นให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_A W_i \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right) dA = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (31a)$$

โดย m แทนจำนวนจุดต่อทั้งหมดของชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้ นั้น โดยทั่วไปเราจะสมมติการกระจายของฟังก์ชันการไหลในรูปแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

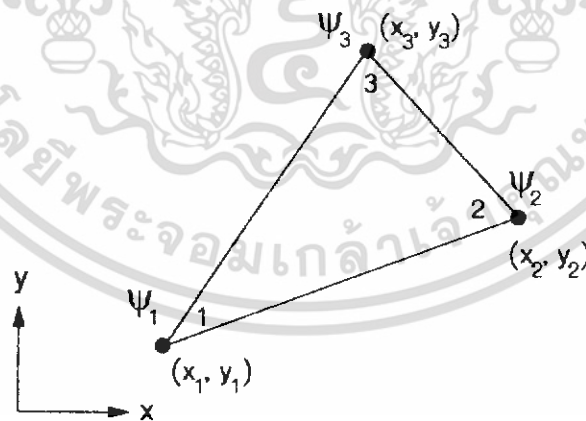
$$\Psi(x, y) = \underset{(1 \times m)}{[N(x, y)]} \underset{(m \times 1)}{\{\Psi\}} \quad (31b)$$

โดย $[N]$ คือเมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ หากเราใช้หลักการบับโนฟ – กาลอร์คิน (Bubnov – Galerkin) กล่าวคือใช้ฟังก์ชันน้ำหนัก W เช่นเดียวกันกับฟังก์ชันการประมาณภายใน N และทำการอินทิเกรตทีละส่วนโดยใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's Theorem) จะได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบดังนี้

$$[k] = \int_A \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \right) dA \quad (32a)$$

$$\{F\} = \int_{S_2} (-vl + um) \{N\} dS \quad (32b)$$

ซึ่ง 1 และ m เป็นทิศทางโคไซน์ (Direction Cosines) ของเวกเตอร์ที่ฉากกับผนังนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวอย่างเช่น สมมติว่าเราเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสำหรับปัญหาการไหลแบบไม่หนืดและไม่อัดตัว

ซึ่งมีลักษณะการกระจายฟังก์ชันการไหล Ψ ในลักษณะแผ่นเรียบบนเอลิเมนต์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi(x, y) = [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \end{Bmatrix} \quad (33)$$

โดย $N_i, i = 1, 2, 3$ เป็นฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \quad (34)$$

ซึ่ง A แทนพื้นที่ของสามเหลี่ยมและ $a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3$ เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพิกัดของจุดต่อ ดังนั้นจากสมการ (25) ความเร็ว u และ v ของการไหลบนเอลิเมนต์นี้คือ

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{ \Psi \} \quad (35a)$$

$$v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \left[-\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{ \Psi \} \quad (35b)$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

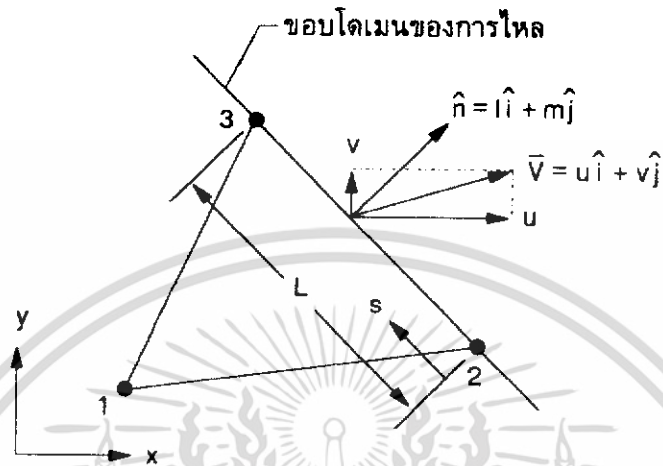
$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ -b_1 & -b_2 & -b_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \end{Bmatrix} \quad (36)$$

จะเห็นว่าความเร็ว u และ v นี้ต่างมีค่าคงที่บนเอลิเมนต์สามเหลี่ยมซึ่งประกอบด้วย 3 จุดดังนี้ เอลิเมนต์เมทริกซ์ของการไหล $[K]$ ดังแสดงในสมการ (37a) ที่สอดคล้องกับสามเหลี่ยมนี้สามารถคำนวณได้โดยตรงซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือ

$$[K] = \frac{1}{4A} \begin{bmatrix} h_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ & h_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ \text{Sym} & & h_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} \quad (37a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโหนดเวกเตอร์ดังแสดงในสมการ (32b) ก็สามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้เช่นกัน หากพิจารณา เอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังแสดงในรูป ซึ่งมีขอบที่ประกอบด้วยจุดต่อ 3 – 2 เป็นขอบโดเมนของการไหล



รูปที่ 2.7 การคำนวณโหนดเวกเตอร์ที่ผนัง

เนื่องจากเรารู้ว่าลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการไหล Ψ สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมในรูปแบบของสมการ (32) จะอยู่ในเชิงเส้นตรงตามขอบที่ประกอบด้วยจุดต่อ 2 – 3 ซึ่งมีความยาว L ที่ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นโหนดเวกเตอร์ในรูปแบบของสูตรอินทิเกรตสมการ (32b) ที่สอดคล้องกับขอบนี้คือ

$$\int_0^L (-vl + um) \begin{Bmatrix} 1 - \frac{s}{L} \\ \frac{s}{L} \end{Bmatrix} ds = (-vl + um) \int_0^L \begin{Bmatrix} 1 - \frac{s}{L} \\ \frac{s}{L} \end{Bmatrix} ds$$

$$= (-vl + um) \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (37b)$$

นั่นคือโหนดเวกเตอร์สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่มีขอบที่ประกอบด้วยจุดต่อ 3 – 2 ซึ่งมีความยาว L อยู่ติดขอบโดเมนของการไหลนี้คือ

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ (-vl + um)L/2 \\ (-vl + um)L/2 \end{Bmatrix} \quad (38)$$

2.2.4 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของไหลสำหรับการไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัว

จากการศึกษากระบวนการขั้นตอนวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาใช้คำนวณหา ลักษณะของการไหลแบบไม่หนืดแต่เกิดการอัดตัวได้ พบว่าลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้อาจมีความ ซับซ้อนทั้ง ๆ ที่ขอบเขตโดเมนของการไหลและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ นั้นค่อนข้างง่าย ใน หัวข้อนี้จะศึกษาการแก้ปัญหาการไหลอีกแบบหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นในงานหลากหลาย ชนิดทางวิศวกรรมศาสตร์ เช่น ในกระบวนการหล่อโลหะหรือเซรามิก ซึ่งการไหลนั้นเป็นไปอย่างช้าเนื่องจากความหนืด การ ไหลชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าการไหลแบบคืบคลาน (Creeping Flow) หรือการไหลแบบสโตกส์ (Stokes Flow) ซึ่งแรงของความเฉื่อย (Inertia Force) นั้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงของความหนืด (Viscous Force) นั่นคือค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างแรงสองชนิดนี้นั้นมีค่าต่ำ สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่จะศึกษาต่อไปนี้เป็นสำหรับกรณีที่มีการไหลแบบคืบคลานภายใต้สภาพอยู่ ตัวโดยคุณสมบัติของเหลวต่าง ๆ นั้นไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กรณีดังกล่าวทำให้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะทำการประดิษฐ์ขึ้นมาอยู่ในรูปแบบที่ง่ายแก่ความเข้าใจ และเมื่อเกิดความเข้าใจแล้ว สมการเหล่านี้สามารถดัดแปลงให้สอดคล้องกับปัญหาการไหลแบบคืบคลานภายใต้สภาวะอื่น ๆ ได้ โดยง่าย ในกรณีที่คุณสมบัติของของเหลวไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สมการการอนุรักษ์มวล (6) และ สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (10) จะไม่เกี่ยวข้องกับสัมพันธ์กับสมการอนุรักษ์พลังงาน (12) และสำหรับ การไหลแบบคืบคลานภายใต้สถานะอยู่ตัวดังกล่าว สมการการอนุรักษ์มวลและพลังงานจะลด รูปแบบลงมาอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (39)$$

สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_x - P) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y - P) = 0 \quad (41)$$

และกฎเกณฑ์การเสียดทานของสโตคส์ดังแสดงในสมการ (11) ถักรูปแบบลงมาเป็น

$$\sigma_x = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (41a)$$

$$\sigma_y = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (41b)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (41c)$$

หากแทนค่าความเค้นจากสมการ (41) เหล่านี้ลงในสมการ (40) เราจะพบว่าเรามีสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมด 3 สมการที่จำเป็นต้องแก้เพื่อหาตัวแปรที่ไม่รู้ค่า 3 ตัวคือ u , v และ P

สำหรับปัญหาการไหลแบบคิปลาน เจ็อนไซขอบเขตโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ

1. การกำหนดความเร็วของการไหลตลอดขอบ S_1

$$u = u_1(x, y)$$

$$v = v_1(x, y)$$

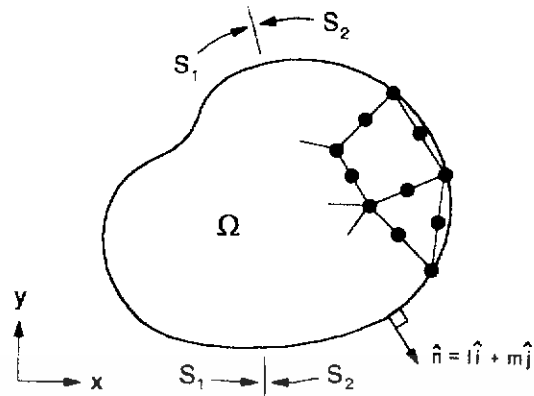
(42)

2. การกำหนดแรงที่ผิว (surface traction) ตลอดขอบ S_2

$$\begin{Bmatrix} \overline{\sigma_x} \\ \overline{\sigma_y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - P & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l \\ m \end{Bmatrix} \quad (43)$$

โดย l และ m แทนทิศทางโคไซน์ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบนั้น

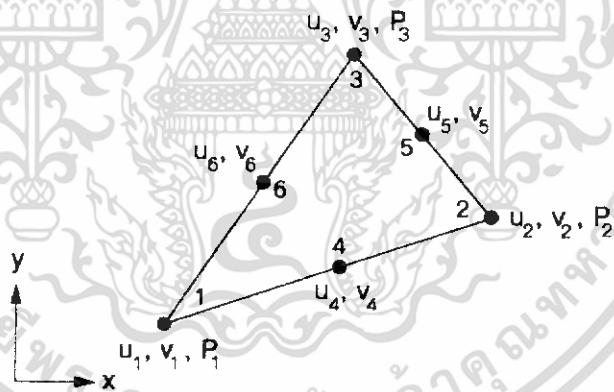
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของการไหลแบบคิปลาน

2.2.5 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) การสมมติลักษณะการประมาณภายในที่ใช้กับการกระจายของความดัน ดังแสดงตัวอย่างของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่มีการกระจายของความเร็วและความดันในอันดับที่ต่างกัน

เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย 6 จุดต่อ ซึ่งมีการสมมติลักษณะการกระจายของความเร็วในรูปแบบดังนี้

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} \{u\} \quad (44a)$$

(1×6) (6×1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v(x, y) = \underset{(1 \times 6)}{[N]} \underset{(6 \times 1)}{\{v\}} \quad (44b)$$

โดย $[N]$ แทนเมตริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาด (1×6) ลักษณะการกระจายของความคั่นนั้นสมมติในรูปแบบดังนี้

$$P(x, y) = \underset{(1 \times 3)}{[N_p]} \underset{(3 \times 1)}{\{v\}} \quad (45)$$

โดย $[N_p]$ แทนเมตริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาด (1×3) ในการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างลงบนสมการเชิงอนุพันธ์ (39) – (40) เราจะเลือกใช้วิธีบับโนฟ – กาลเออร์คิน (Bubnov – Galerkin) กล่าวคือเลือกฟังก์ชันน้ำหนักที่เหมือนกับฟังก์ชันประมาณภายในกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดผลจากสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัมและการอนุรักษ์มวลตามลำดับดังต่อไปนี้คือ

$$\int_A \left(\frac{\partial}{\partial x} (\sigma_x - P) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \{N\} dA = 0 \quad (46a)$$

$$\int_A \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_y - P) \right) \{N\} dA = 0 \quad (46b)$$

$$\int_A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \{N_p\} dA = 0 \quad (46c)$$

การเลือกใช้เมตริกซ์ $\{N_p\}$ ในสมการ (46c) จะก่อให้เกิดเมตริกซ์จัตุรัสทางด้านซ้ายของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นมาได้นั้นเป็นเมตริกซ์ที่มีความสมมาตรอันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์และเพื่อลดเวลาในการคำนวณ

ขั้นตอนในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการ (46) สามารถทำ การใช้สูตรการอินทิเกรตทีละส่วนโดยใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ ซึ่งจะก่อให้เกิดอินทิกรัลพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขต S_1 และ S_2 จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตดังแสดงในสมการ (42) – (43) ผลสุดท้ายของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการ(47) ตัวเลขในวงเล็บได้เมตริกซ์ย่อยต่างๆในสมการ (47) นี้ระบุขนาดของเมตริกซ์เหล่านั้นหากใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.9

$$\begin{bmatrix} 2[K_{11}] + [K_{22}] & [K_{12}] & [L_1] \\ [K_{12}]^T & [K_{11}] + 2[K_{22}] & [L_2] \\ [L_1]^T & [L_2]^T & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{V\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{R_u\} \\ \{R_v\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (47)$$

โดย

$$[K_{11}] = \int_A \mu \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] d\Omega \quad (48a)$$

$$[K_{22}] = \int_A \mu \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] d\Omega \quad (48b)$$

$$[K_{12}] = \int_A \mu \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] d\Omega \quad (48c)$$

$$[L_1] = - \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} [N_p] d\Omega \quad (48d)$$

$$[L_2] = - \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} [N_p] d\Omega \quad (48e)$$

$$\{R_u\} = \int_{S_x} \overline{\sigma_x} \{N\} dS \quad (48f)$$

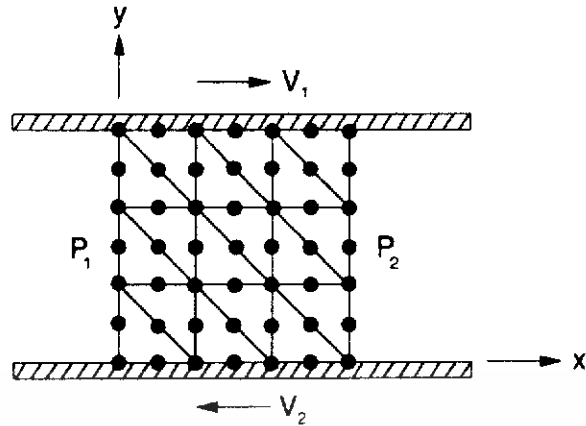
$$\{R_v\} = \int_{S_y} \overline{\sigma_y} \{N\} dS \quad (48g)$$

เมตริกซ์ย่อยต่างๆ เหล่านี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยเฉพาะสำหรับเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.9 ผลที่ได้สามารถนำไปประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงเพื่อใช้คำนวณหาลักษณะของการไหลสำหรับปัญหาในทำนองนี้

2.2.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์

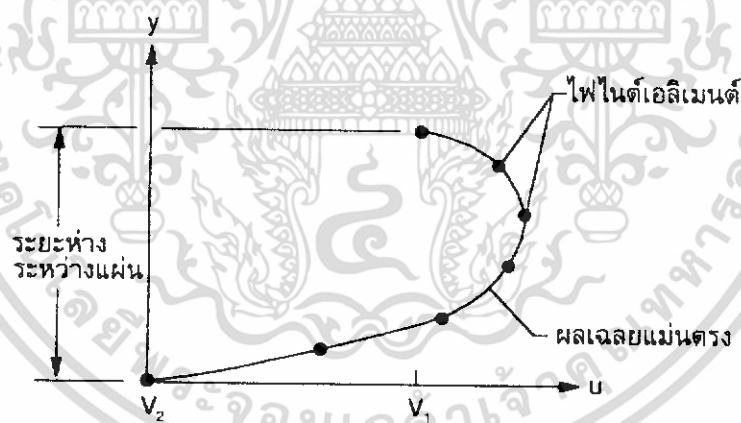
สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (47) ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาคาร์บอนระหว่างแผ่นเรียบ โดยลักษณะของปัญหาและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ปัญหาการไหลระหว่างแผ่นเรียบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณคือเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเช่นเดียวกับแสดงในรูปที่ 2.9 เงื่อนไขขอบเขตประกอบด้วยความเร็วในทางแกน x ที่ขอบ โดเมนของการไหลติดกับแผ่นเรียบบนและล่าง นั้นมีค่า V_1 และ V_2 ในทิศทางที่กำหนด ในขณะที่ความเร็วในทิศทางแกน y ตลอดขอบดังกล่าวมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนตลอดขอบของโดเมนของการไหลทางด้านซ้ายและขวานั้นมีการกำหนดค่าความดันคงที่ P_1 และ P_2 ที่มีขนาดต่างกันผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เช่น การกระจายของความเร็วในการไหลนั้นแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การกระจายของการไหลที่ได้จากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์และผลเฉลยแม่นยำตรง

เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหานี้แล้วพบว่ามีความแม่นยำสูง ตัวอย่างเช่นนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหการไหลแบบหนึ่งแต่ไม่อัศจรรย์ผลลัพธ์ที่ได้ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.11 ก่อให้เกิดความมั่นใจในการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

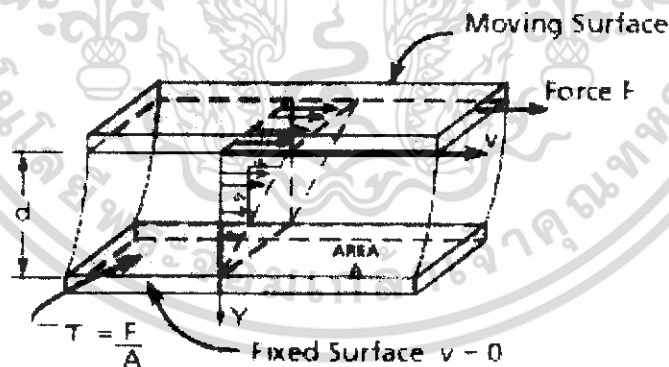
นี้ และการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาไปใช้แก้ปัญหาอื่นๆ ที่อาจประกอบด้วย โดเมนของการไหลและเงื่อนไขขอบเขตที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

2.3 คุณสมบัติทั่วไปของของไหล

ของไหลมีลักษณะที่สำคัญ คือ สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ตามภาชนะที่บรรจุและเมื่อได้รับแรงกระทำ ผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภทมีลักษณะเป็นของไหล ลักษณะการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและองค์ประกอบของอาหารนั้นๆ สมบัติของของไหลที่มีผลต่อการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนย้ายของไหลที่สำคัญ คือ ความหนืด (Viscosity) ของของไหล ความหนืด คือ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของของไหลและจะส่งผลต่อกำลังที่ต้องการใช้ในการผลักดันให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่

2.3.1 ความเค้นและความหนืดของของไหล

ของไหลจะไหลได้เมื่อได้รับความเค้น (Stress) ความเค้น คือ แรงที่กระทำกับของไหลต่อพื้นที่ที่มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวตั้งฉากกับผิวของของไหลจะเรียกว่า ความเค้นปกติ (Normal Stress) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดัน ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวขนานกับผิวของของไหลจะเรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear Stress) เมื่อให้ความเค้นเฉือน ของไหลจะไหลดังนี้



รูปที่ 2.12 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน

ตามนิยาม ความเค้นเฉือน (τ_{yz}) มีค่าเท่ากับ

$$\tau_{yz} = \frac{F}{A} \quad (49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย
$$F \propto A \frac{\Delta v_z}{\Delta y}$$

ดังนั้น
$$\tau_{yz} \propto \frac{\Delta v_z}{\Delta y} \rightarrow \tau_{yz} = \mu \frac{\Delta v_z}{\Delta y} \quad (50)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดหรือ Coefficient of Viscosity โดยทั่วไปจะเรียกว่า “ ความหนืด ” หรือ Viscosity มีหน่วยเป็น แรงคูณเวลาต่อพื้นที่ (เช่น N s/m²) บางตำราอาจใช้สัญลักษณ์ σ แทนความเค้นเฉือนและ η แทนความหนืด เมื่อให้ค่า $\Delta y \rightarrow 0$ จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\tau_{yz} = \mu \frac{D v_z}{D y} \quad (\text{SI unit}) \quad (51)$$

โดย $\frac{D v_z}{D y}$ คือ Velocity Gradient ในแนวแกน y เรียกว่า “ Shear Rate ” หรืออัตราเฉือนมีลักษณะเป็น γ มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเวลา โดยปกติคือ 1/s

$$\tau_{yz} = \mu \gamma \quad (\text{SI unit}) \quad (52)$$

อัตราเฉือนที่พบในกระบวนการผลิตอาหารมีค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ ช่วงของอัตราเฉือนที่พบแสดงในตารางที่ 2.2

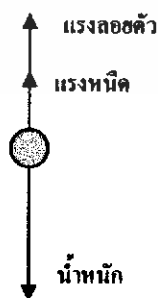
ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Shear Rate) และความเค้นเฉือน (Shear Stress) ตามสมการ จัดเป็น Newtonian Fluid

ตารางที่ 2.2 อัตราเฉือนในกระบวนการผลิตอาหาร

Application	Shear Rate (1/s)	Example
Sedimentation of particles	$10^{-6} - 10^{-3}$	Spices in salad dressing
Leveling due to surface tension	$10^{-2} - 10^{-1}$	Frosting, paints
Draining under gravity	$10^{-1} - 10$	Painting and costing
<ul style="list-style-type: none"> ● Extrusion ● Pipe Flow 	$1 - 10^3$	<ul style="list-style-type: none"> ● Snack foods, Cereal, Pasta ● Food processing
<ul style="list-style-type: none"> ● Calendaring ● Pouring from a bottle ● Chewing and swallowing 	$10^1 - 10^2$	<ul style="list-style-type: none"> ● Dough sheeting ● Foods & cosmetics ● Foods
Mixing and stirring	$10^1 - 10^3$	Food processing
Rubbing	$10^2 - 10^4$	Application of lotion
Brushing	$10^3 - 10^4$	Lipstick, nail polish
Spraying	$10^3 - 10^5$	Spray drying

2.3.2 ความหนืด (Viscosity)

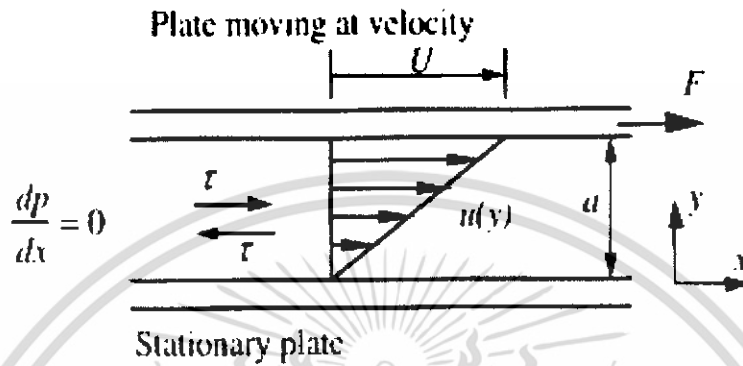
เมื่อใช้ช้อนคนของเหลวชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำ น้ำเชื่อม หรือนมข้นหวาน เป็นต้น จะพบว่าการคนของเหลวแต่ละชนิดนั้นจะออกแรงคนไม่เท่ากัน การที่ต้องออกแรงคนของเหลวแต่ละชนิดไม่เท่ากันเป็นเพราะของเหลวมีความหนืดต่างกัน ของเหลวที่มีความหนืดมากจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวนั้นมาก แรงต้านการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากความหนืดของของเหลวเรียกว่า แรงหนืด



จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของลูกกลมโลหะในน้ำมันหล่อลื่น จะพบว่าในช่วงแรก ๆ ของการเคลื่อนที่ ลูกกลมโลหะจะเคลื่อนที่โดยมีความเร่งอันเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ในขณะนั้นก็มีแรงลอยตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าคงตัว และแรงหนืดต้านการเคลื่อนที่ที่อยู่ หลังจากเคลื่อนที่ได้ระยะหนึ่งลูกกลมโลหะจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว แสดงว่าแรงหนืดที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวมีค่ามากขึ้น เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้น จนทำให้แรงลัพธ์ที่มากกระทำกับลูกกลมโลหะมีค่าเป็นศูนย์ ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลมโลหะจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว ซึ่งเรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วปลาย วัตถุที่เคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนืดต่างกัน ความเร็วปลายของการเคลื่อนที่ของวัตถุใน ของเหลวที่มีความหนืดสูงจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วปลายของวัตถุนั้นในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ



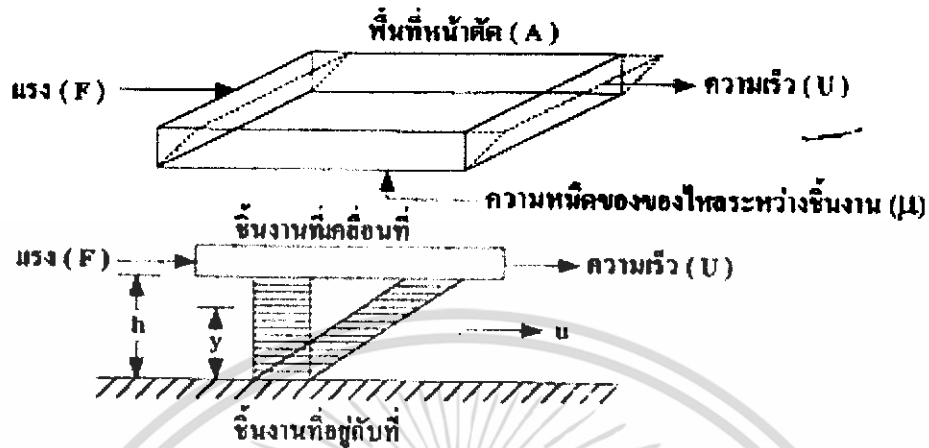
รูปที่ 2.13 การกระจายความเร็วของของไหลระหว่างแผ่นขนานเนื่องจากความหนืด

แรงหนืดของของเหลวที่กระทำต่อวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ในของเหลวมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ นอกจากนี้ในของเหลวชนิดหนึ่งๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ความหนืดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยทั่วไปแล้วความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ความหนืด คือ การแสดงถึงความยากหรือง่ายในการที่ของเหลวอย่างหนึ่งจะสามารถไหลไป ได้โดยตัวของมันเอง เช่น มีของเหลวอยู่สองชนิดที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่าง ง่ายดายหรือเร็ว ในขณะที่อีกชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่างเชื่องช้า เราจะพูดว่าของเหลวชนิดแรกมีความ หนืดต่ำหรืออย่างน้อยส่วนชนิดที่สองมีความหนืดสูง ดังนั้นจึงอาจให้คำจำกัดความอย่างง่ายๆได้ว่า ความ หนืด คือความสามารถในการต้านทานการไหล ของเหลวใดที่มีความหนืดมากจะมีความสามารถในการ ต้านทานการไหลสูง ของเหลวใดที่มีความหนืดน้อย จะมีความสามารถในการต้านทานการไหล ต่ำ วิธีหาความหนืดของน้ำมันใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ Viscometer ” ซึ่งเป็นการจับเวลาที่ของเหลว จำนวนหนึ่ง (น้ำมัน) ไหลผ่านรูมาตรฐานที่กำหนดไว้ ณ อุณหภูมิที่กำหนด

ความหนืดของสารหล่อลื่นจะเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่าง ชิ้นงาน 2 ชิ้น ที่มีการเคลื่อนเสียดสีกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในการหล่อลื่นแบบไฮโดรนามิก ความ เสียดทานที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเป็นส่วนใหญ่ ให้พิจารณาชิ้นงาน พื้นผิวแบนเคลื่อนที่ไปบนชั้นน้ำมันหนา h ด้วยความเร็ว U แรง F จะทำให้น้ำมันเกิดการไหลเป็น ชั้นๆ โดยชั้นที่ติดกับชิ้นงานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U และชั้นล่างสุดที่ติดกับชิ้นงานที่อยู่กับชิ้นงานที่

อยู่กับที่มีความเร็วเป็นศูนย์ นั่นคือการสมมติให้ไม่มีการสลิป (Slip) เกิดขึ้น ในชั้นระหว่างกลาง น้ำมันจะมีความเร็วแปรผันตามระยะ y



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งของน้ำมันหล่อลื่นกับชั้นงาน 2 ชั้น (เมื่ออยู่กับที่และเคลื่อนที่)

จากกฎของนิวตันเรื่องความหนืดของของไหลเมื่อมีการไหล (Newton's Law of Viscous Flow) กล่าวไว้ว่า ค่าความเค้นเฉือนของของไหลที่เป็นสารหล่อลื่นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่อระยะความหนาของสารหล่อลื่นตามแนวแกน y เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{h} \quad (53)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน (Shearing Stress)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) หรือความหนืด (Viscosity) ของของไหลที่หล่อลื่น

F คือ แรงที่ใช้ในการเลื่อนแผ่นที่เคลื่อนที่

U คือ ความเร็วของแผ่นที่เคลื่อนที่

u คือ ความเร็วของชั้นฟิล์มของของไหล โดยวัดจากแผ่นที่อยู่กับที่ไปจนถึงชั้นของของไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่เคลื่อนที่

$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$ คือ เกรเดียนต์ความเร็ว (Velocity Gradient) หรืออัตราเฉือน (Shear Rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มข้น, ความหนาแน่น, ของน้ำเชื่อมที่อัตราส่วนน้ำหนักน้ำตาลต่อน้ำเชื่อม
ต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ

% Weight Sucrose	Sucrose g/l	Density of Solution	Viscosity (cP)		
			15 C	20 C	25 C
75	1034	1.379	4639	2328	1405
70	943	1.3472	746.9	481.6	321.6
65	855.6	1.3163	211.3	147.2	105.4
60	771.9	1.2865	79.49	58.49	40.03
50	614.8	1.2596	19.53	15.43	12.4
40	470.6	1.1764	7.463	6.167	5.164
30	338.1	1.127	3.757	3.187	2.735

หน่วยของความหนืด

(1) ระบบหน่วยอังกฤษเป็น ปอนด์-วินาที / ตารางนิ้ว ($\text{lb.s} / \text{in}^2$) ซึ่งเรียกว่า เรน (Reyn) เพื่อเป็นเกียรติแก่ Sir Osborne Reynolds ที่ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของของไหลทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้องเป็นคนแรก

(2) ระบบหน่วยเมตริก ความหนืดมีหน่วยเป็น ดายน์-วินาที / ตารางเซนติเมตร ($\text{Dyne.s} / \text{cm}^2$) เรียกว่า พอยส์ (Poise) โดยที่ดายน์ หมายถึง แรงที่กระทำให้มวล 1 กรัมมีความเร่ง 1 เมตร / วินาที²

(3) หน่วยเอสไอ ความหนืดจะมีหน่วยเป็น ปาสคาล-วินาที (Pa.s) หรือ $\text{N.s} / \text{m}^2$
การเปลี่ยนหน่วยของความหนืดระหว่างระบบทั้งสามมีดังนี้

$$1 \text{ พอยส์ (poise : P)} = 100 \text{ เซนติพอยส์ (Centipoises : cP)}$$

$$1 \text{ เซนติพอยส์ (Centipoises : cP)} = 0.01 \text{ พอยส์ (Poise : P)}$$

$$\text{หรือ} = 0.145 \text{ ไมโครเรน (Microreyn)}$$

$$1 \text{ เรน (Reyn)} = 68,944 \text{ พอยส์ (Poise : P)}$$

$$\text{หรือ} = 6.89 \times 10^6 \text{ เซนติพอยส์ (Centipoises : cP)}$$

$$1 \text{ เรน (Reyn)} = \text{ปอนด์-วินาที / ตารางนิ้ว (lb.s} / \text{in}^2)$$

$$1 \text{ พอยส์ (Poise : P)} = \text{ดายน์-วินาที / ตารางเซนติเมตร (Dyne.s/cm}^2)$$

$$1 \text{ ปาสคาล-วินาที (Pa.s) หรือ N.s} / \text{m}^2 = 1000 \text{ เซนติพอยส์ (Centipoises : cP)}$$

$$\text{หรือ} = \text{พอยส์ (Poise : P)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมีความหนืดประมาณ 1 cP ที่อุณหภูมิ 20 °C

2.3.3 ความหนืดแบบคิเนแมติก (Kinematic Viscosity)

ถ้าหารค่าความหนืด μ ด้วยความหนาแน่นของของไหลนั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์ ค่าที่ได้จะเรียกว่า ความหนืดคิเนแมติก (Kinematic Viscosity, ν)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (54)$$

เมื่อ ν คือ ค่าความหนืดแบบคิเนแมติก ถ้ากำหนดมาตรฐานของค่าความหนืดแบบคิเนแมติก โดยใช้เครื่องมือกำหนดเป็นมาตรฐานโดย ASTM ในระบบหน่วยเมตริกมีหน่วยเป็น สโตก (Stoke) ส่วนในระบบหน่วยเอสไอ เป็น m^2/s การหาค่าความหนืดหรือความข้นใสของน้ำมันชนิดต่างๆ โดยใช้ Viscometer ในการหาความหนืดมีอยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น

- Saybolt Universal Viscometer มีหน่วยเป็น “SUS” ซึ่งย่อมาจาก Saybolt Universal Second หรือ Saybolt Furol Viscometer มีหน่วยเป็น “SFS” ย่อมาจาก Saybolt Furol Second นิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา

- Redwood Viscometer มีหน่วยเป็น “Rw” นิยมใช้ในสหราชอาณาจักร

- Engler Viscometer มีหน่วยเป็น “E” นิยมใช้ในญี่ปุ่นและยุโรป

- Kinematic Viscometer มีหน่วยเป็น “cSt” เป็นระบบสากล

(1) มาตรฐานวัดความหนืดหรือความข้นใสแบบยูนิเวอร์แซล ใช้วัดความหนืดหรือความข้นใสของน้ำมันโดยจับเวลาจากการไหลเป็นวินาทีของน้ำมัน 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 70,100,130,210 องศาฟาเรนไฮต์ ค่าวัดความหนืดหรือความข้นใสที่ได้มีหน่วยเป็นวินาทีเซย์โบลต์ (Saybolt Universal Seconds, SUS) เครื่องมือนี้ไม่เหมาะสำหรับน้ำมันซึ่งมีการไหลต่ำกว่า 32 วินาที รูที่น้ำมันไหลผ่านมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0695 นิ้ว (1.77 มิลลิเมตร) ความยาว 0.4823 นิ้ว (12.25 มิลลิเมตร)

(2) มาตรฐานวัดความข้นใสแบบเซย์โบลต์ฟูรอล แตกต่างกับมาตรฐานวัดความหนืดหรือความข้นใสแบบเซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซลที่ขนาดของรูเท่านั้น คือมาตรฐานนี้จะมีการไหลผ่านรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1240 นิ้ว (3.15 มิลลิเมตร) ความยาว 0.4823 นิ้ว (12.25 มิลลิเมตร) ใช้กับน้ำมันที่มีความหนืดหรือความข้นใสสูงกว่า 1,000 วินาทีเซย์โบลต์ ตัวอย่างเช่น น้ำมันเตา

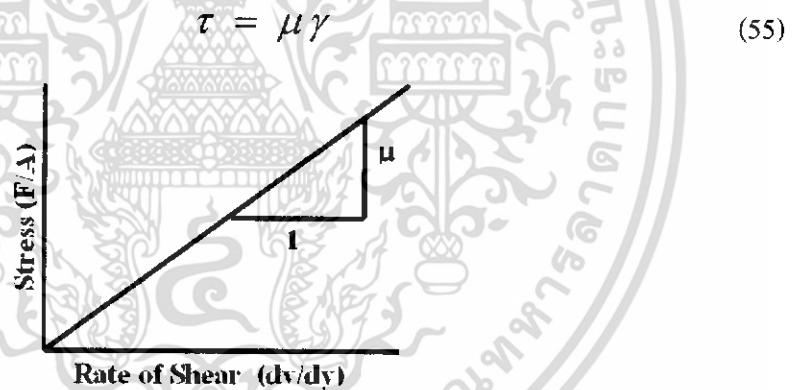
(3) มาตรฐานวัดความข้นใสแบบเรดวูด No.1 ใช้รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.62 มิลลิเมตร และความยาวของรูประมาณ 10 มิลลิเมตร จับเวลาการไหลของน้ำมันปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความหนืดหรือความข้นใสมีหน่วยเป็นวินาทีเรดวูด

(4) มาตรฐานวัดความข้นใสแบบเรอคูด No.2 ใช้รูกขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.80 มิลลิเมตร และความยาวของรูเป็น 50 มิลลิเมตร ใช้กับน้ำมันที่มีความข้นมาก ๆ

(5) มาตรฐานแบบอิงเลอร์ จับเวลาการไหลของน้ำมันที่มีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร และบอกค่าความหนืดหรือความข้นใสเป็นวินาทีของอิงเลอร์หรือองศาของอิงเลอร์ (E°) ซึ่งเป็นส่วนของเวลาการไหลของน้ำมัน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร รุกของเครื่องทดสอบที่ให้ น้ำมันไหลผ่านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 มิลลิเมตร และความยาวของรูมีค่า 20 มิลลิเมตร ที่ปากทางเข้าและออกจะเป็นมุมเอียงมีความยาว 2.8 มิลลิเมตร Engler Degree (E°) = เวลาที่น้ำมัน 200 ml ไหลผ่าน Orifice/เวลาที่น้ำ 200 ml ไหลผ่าน Orifice

การแบ่งประเภทของเหลวตามลักษณะการไหลมักจะทำโดยพิจารณาจากความหนืดเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งของเหลวได้เป็นสองประเภทหลักคือ Newtonian Fluid และ Non - Newtonian Fluid

(1) Newtonian Fluid คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนและประวัติการได้รับแรงเฉือน (Shear History) ความหนืดของของเหลวประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลวเท่านั้น Shear Stress และ Shear Rate มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (55)$$


รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Newtonian Fluid

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างอาหารที่เป็น Newtonian Fluid

Product	Flow Behavior Index (n)	Consistency Coefficient (K)
Whole milk	1	0.0212
Apple Juice	1	0.021
Grape Juice	1	0.0025
Honey	1	6.18
Corn syrups	1	0.053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

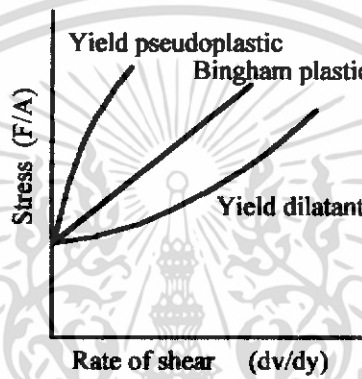
(2) Non - Newtonian Fluid คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่แปรตามอัตราเฉือนสามารถแบ่งได้เป็น

ก. Time – Independent Non – Newtonian Fluids ได้แก่

- Bingham Plastic มีความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress และ Shear Rate ดังนี้

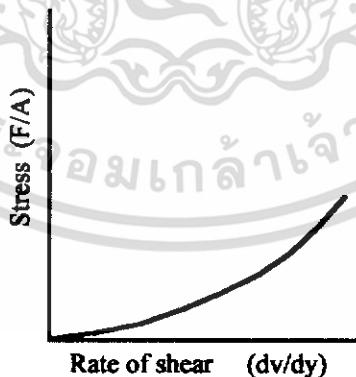
$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (56)$$

เมื่อ τ_0 คือ yield stress ของเหลวชนิดนี้ต้องได้รับความเค้นเฉือนมากกว่า τ_0 จึงจะเกิดการไหลได้และเมื่อเกิดการไหลแล้ว ความหนืดของของเหลวจะไม่ขึ้นกับ Shear Rate



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Bingham Plastic Fluid

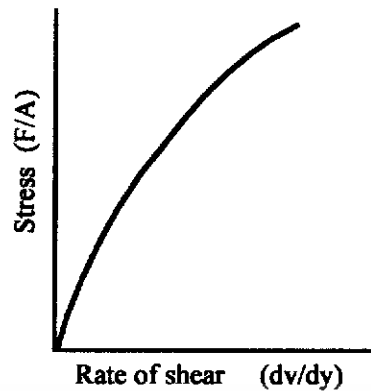
- Shear – Thinning Fluid หรือ Pseudo Plastic Fluid มีความหนืดลดลงตาม Shear Rate



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Pseudo Plastic Fluid

- Shear – Thinning Fluid หรือ Dilatant Fluid มีความหนืดเพิ่มขึ้นตาม Shear Rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Dilatant Fluid

ทั้ง Pseudo Plastic Fluid และ Dilatant Fluid จะมี Shear Stress และ Shear Rate มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\tau = K \gamma^n \quad (57)$$

ในกรณีที่ของเหลวมี yield stress จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n \quad (58)$$

เมื่อ K คือ CONSISTENCY INDEX มีความสัมพันธ์กับความหนืดของของเหลวและ n คือ Flow Behavior Index เป็นค่าที่บอกลักษณะการไหลของของเหลว

เมื่อ $n > 1 \rightarrow$ Dilatant Fluid

$n < 1 \rightarrow$ Pseudo Plastic Fluid

สามารถคำนวณความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity , μ_a) ของของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ PseudoPlastic และ Dilatant ได้ดังนี้

$$\mu_0 = K \gamma^{n-1} \quad (59)$$

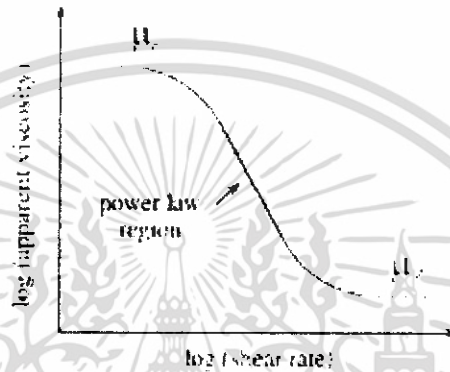
อาหารเหลวส่วนใหญ่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudo Plastic คือ ยิ่งเกิดการกวนของเหลวมาก ๆ ความหนืดของของเหลวจะลดลง โดยเฉพาะอาหารที่มีแป้งหรือ hydrocolloids เป็นส่วนผสมหากความเข้มข้นขององค์ประกอบสูง อาหารที่อยู่ในกลุ่มนี้จะแสดงลักษณะดังรูปที่ 2.19 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ที่อัตราเฉือนต่ำ จะแสดงลักษณะการไหลแบบ Newtonian โดยมีค่าความหนืดคงที่ที่ Zero – Shear Viscosity, μ_0

(2) ที่อัตราเฉือนสูง จะแสดงลักษณะการไหลแบบ PseudoPlastic การเปลี่ยนจาก Newtonian เป็น PseudoPlastic นี้จะเกิดที่ Characteristic Time หรือ Time Constant (t_c) โดย

$t_c = \frac{1}{\dot{\gamma}}$ เมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงมาก ของเหลวจะมีความหนืดที่คงที่ที่ μ_∞ เรียกว่า Infinite – Shear Viscosity

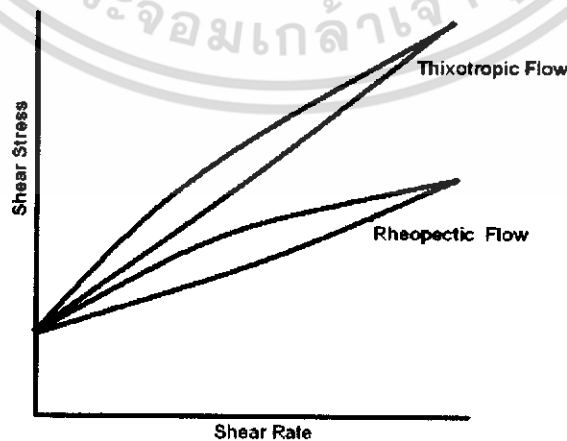


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการไหลของของไหล PseudoPlastic Fluid แบบ Power law

ข. Time – Dependent Non – Newtonian Fluids

อาหารที่มีโครงสร้างซับซ้อนมักจะมีลักษณะการไหลที่ขึ้นกับเวลาในการให้อัตราเฉือนด้วยสามารถแบ่งของเหลวในกลุ่มนี้ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- Thixotropic Fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น
- Rheopectic Fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time – Dependent Non – Newtonian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Flow Behavior Index (n)และ Consistency Coefficient (K)ของของไหลชนิดต่างๆ

Product	Flow Behavior Index (n)	Consistency Coefficient (K)
Ketchup	0.27	18.70
Applesauce	0.30	16.70
Banana puree	0.43	6.08
Mayonnaise	0.55	6.40
Tomato juice concentrate	0.41	12.90
Blueberry pie filling	0.43	6.10
Chocolate, melted	0.57	0.570
Mustard	0.16	19.10
Orange juice concentrate	0.98	4.1210
Olive oil	1.00	0.0840
Honey	1.00	5.60
Whole milk	1.00	0.0212
Skim milk	1.00	0.0014
Apple juice	1.00	0.0021
Peanut butter	1.20	15.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความหนืด ความถ่วงจำเพาะ และอุณหภูมิของของเหลวบางชนิด

ของเหลว	ความถ่วงจำเพาะ	ความหนืด (cP)	อุณหภูมิ
Water H ₂ O	1.00	1.0	68F
Fuel Oil	0.87	2.6	68F
Diesel Oil	0.89	76.2	68F
Gasoline	0.71	0.5	60F
Crude Oil น้ำมันดิบ	0.86	75.0	60F
Acetic Acid	1.05	1.23	68F
Crankcase Oil SAE 20	.88 - .94	105.6 - 173.9	130F
Crankcase Oil SAE 30	.88 - .94	173.9 - 211.5	130F
Crankcase Oil SAE 40	.88 - .94	211.5 - 376	130F
Ethylene Glycol	1.12	19.5	68F
Hydrochloric acid 31.5%	1.05	2.8	68F
Kerosene	.78 - .82	2.1 - 2.2	60F
Nitric Acid	1.37	2.6	68F
Soybean Oil	0.92	79.1	60F
Sulfuric Acid (Conc.)	1.83	26.7	68F
Glucose (Sugar Solution)	1.35 - 1.44	10395 - 31680	100F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างแบบจำลอง

3.1 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองที่นำไปใช้ในโปรแกรม STAR-CD

3.1.1 เขียนแบบจำลองของถังทั้ง 3 แบบโดยโปรแกรม Unigraphics NX

3.1.2 ส่งรูปไปเป็นไฟล์ Parasolid เพื่อไปสร้าง Element ที่โปรแกรม MSC.visual

Nastran for Windows 2002

3.1.3 ส่งไฟล์จากโปรแกรม MSC.visual Nastran for Windows 2002 ไปสู่โปรแกรม STAR-CD ในรูปของไฟล์ Patran โดยถึงที่ใช้ในการจำลองมี 3 แบบ ดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงถังผสมแบบก้นเรียบ



รูปที่ 3.2 แสดงถังผสมแบบก้นโค้ง



รูปที่ 3.3 แสดงถังผสมแบบก้นกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั้ง 3 ถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเท่ากันคือ 300 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าและทางออกเท่ากันคือขนาด 2 เซนติเมตร

หลังจากสร้างแบบจำลอง 3 มิติเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนๆ เพื่อที่จะส่งเป็นไฟล์ Parasolid เพื่อไปสร้าง Element ในโปรแกรม MSC.visual Nastran for Windows 2002 ต่อไป

โดยจะแบ่งรูปเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของถังรวมถึงท่อทางออก และส่วนของท่อทางเข้า โดยในส่วนของถังและท่อทางออกจะส่งไปเป็น Surface และได้แบ่ง Surface นี้ออกเป็นส่วนๆ โดยในแต่ละส่วนจะต้องมี 4 ด้าน เพื่อที่จะสามารถกำหนด Element เป็นแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.4 แสดง Surface ของถังกันเรียบ



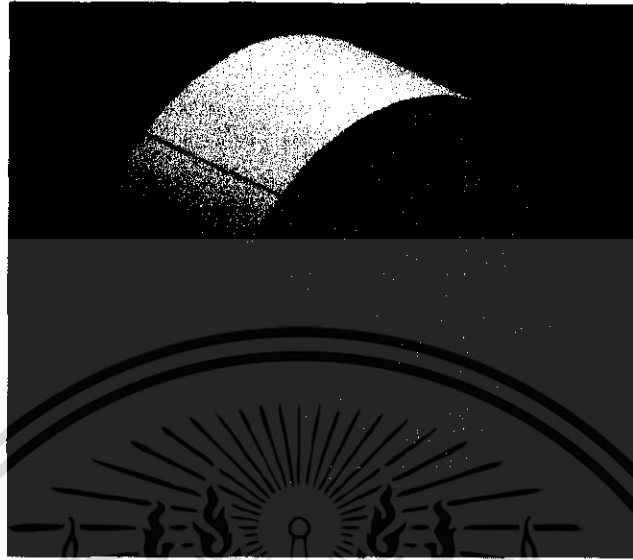
รูปที่ 3.5 แสดง Surface ของถังกันโค้ง



รูปที่ 3.6 แสดง Surface ของถังกันกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของท่อทางเข้าจะแบ่งเป็น Solid โดยจะตัดออกเป็น 5 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงท่อทางเข้า

ในโปรแกรม MSC.visual Nastran for Windows 2002 เราสามารถกำหนดจำนวน Element เองได้ จะได้แบบจำลองที่มีการแบ่ง Element แล้วดังรูป โดยที่

- ถึงกันเรียบจะมีจำนวน Element ทั้งหมด 126000 cell
- ถึงกันโค้งจะมีจำนวน Element ทั้งหมด 161150 cell
- ถึงกันกรวยจะมีจำนวน Element ทั้งหมด 161150 cell

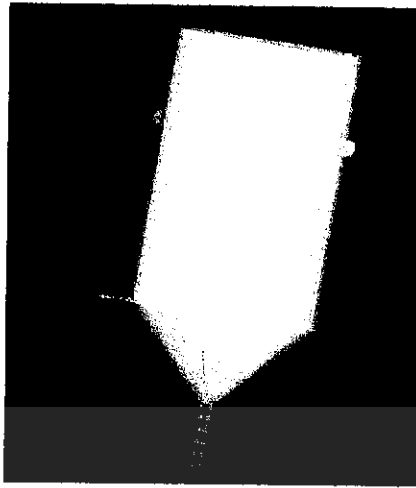


รูปที่ 3.8 แสดงจำนวน Element ถึงผสม
แบบกันเรียบ



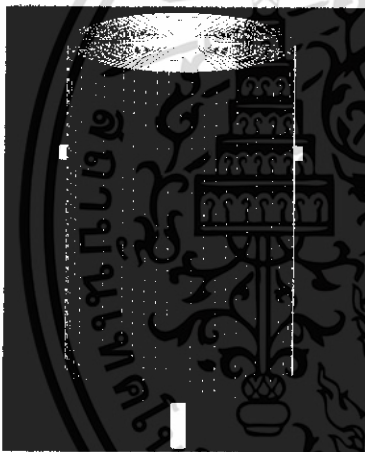
รูปที่ 3.9 แสดงจำนวน Element ถึงผสม
แบบกันโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

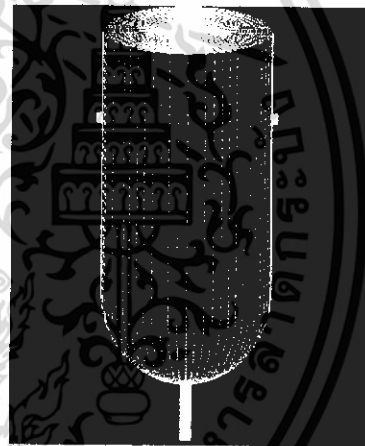


รูปที่ 3.10 แสดงจำนวนElement ถึงผสมแบบก้นกรวย

จากนั้นเราจึงนำการส่งไฟล์จากโปรแกรม MSC.Visual Nastran For Windows 2002 ไปสู่โปรแกรม STAR-CD ในรูปของไฟล์ Patran



รูปที่ 3.11 แสดงถึงผสมแบบก้นเรียบ



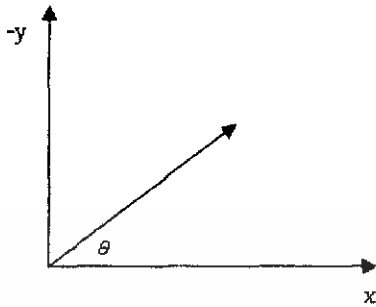
รูปที่ 3.12 แสดงถึงผสมแบบก้นโค้ง



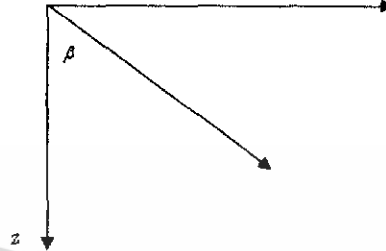
รูปที่ 3.13 แสดงถึงผสมแบบก้นกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโปรแกรม STAR-CD การที่จะกำหนดองศาในการฉีดสาร สามารถทำได้โดยการกำหนดทิศของความเร็วในแนวแกน X, Y, Z นั่นคือ u, v, w โดยหากมองจากด้านบนของถัง (Top Pane) จะได้แกน x และ $-y$ และหากมองจากด้านหน้า (Front Plane) จะได้แกน x และ z



รูปที่ 3.14 แสดง Top Plane



รูปที่ 3.15 แสดง Front plane

จะได้ความเร็วในแนวต่างๆดังนี้

$$u = R \sin \theta \cos \beta$$

$$v = R \sin \theta \sin \beta$$

$$w = R \cos \theta$$

เห็นได้ว่าจะติดตัวแปร R (ความเร็วลัพธ์) อยู่โดยเราสามารถหาความเร็วลัพธ์ได้จากความดัน (Total Pressure) ซึ่งกำหนดให้มีค่า 2 bar โดยใช้สมการจากทฤษฎีของเบอร์นูลี

$$H_T = \frac{V_T^2}{2g} + \frac{P_T}{\rho g} + Z_T = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1$$

โดยในกรณีนี้ $Z_T = Z_1$ และ $V_T = 0$

จะได้

$$\frac{P_T}{\rho g} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g}$$

โดยที่ $P_T = 2 \text{ bar} = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

ρ คือ ความหนาแน่น ของน้ำมัน = 1035 Kg/m^3

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

นำไปแทนค่าในสมการจะได้ $V_1 = R = 13.81 \text{ m/s}^2$ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 นีดสารออกไปโดยทำมุมในแนว Vertical 45 องศา และในแนว Horizontal เป็น 0 องศา นำค่าความเร็วลัพธ์และมุมไปแทนในสมการเวกเตอร์ ก็จะได้ความเร็ว u , v , w มา

$$u = 13.81 \times \sin 45 \times \cos 0 = 9.77 \text{ m/s}^2$$

$$v = 13.81 \times \sin 0 \times \sin 0 = 0 \text{ m/s}^2$$

$$w = 13.81 \times \cos 45 = 9.77 \text{ m/s}^2$$

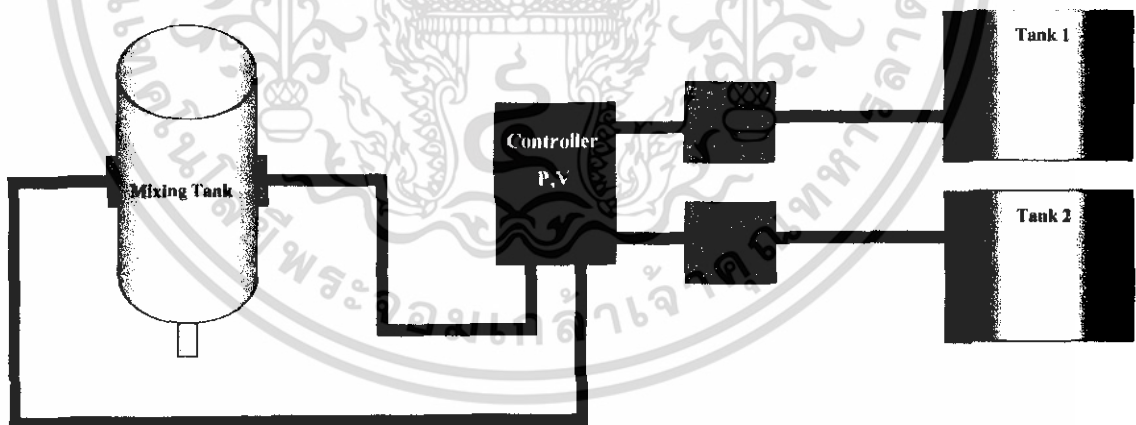
กรณีที่ 2 นีดสารออกไปโดยทำมุมในแนว Vertical 45 องศา และในแนว Horizontal เป็น 30 องศา จะได้

$$u = 13.81 \times \sin 45 \times \cos 30 = 8.46 \text{ m/s}^2$$

$$v = 13.81 \times \sin 45 \times \sin 30 = 4.88 \text{ m/s}^2$$

$$w = 13.81 \times \cos 45 = 9.77 \text{ m/s}^2$$

การออกแบบชุดอุปกรณ์ทดลอง



รูปที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบการทดลองจริงในถังผสม

โครงการนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การทดลองผสมสารจริงในถังผสม และการ Simulation โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำผลจากการทดลองจริงกับผลจากการ Simulation โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกัน โดยจะสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองและ ศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์พร้อมทำการ Simulation เพื่อศึกษาตัวแปรต้นที่มีผลต่อกระบวนการผสม

3.2.1 สารที่ใช้ในการทดลอง

- (1) น้ำที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์
- (2) น้ำเกลือที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

3.2.2 วิธีการทดลอง

เติมน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปในถังซึ่งมีระดับน้ำสูง 45 เซนติเมตร โดยปรับอัตราการไหลขาออกเท่ากับอัตราการไหลขาเข้า และทำการปรับวาล์วเพื่อตั้งค่าความเร็วให้คงที่ คือ 10 เมตรต่อวินาที จากนั้นวัดค่าความเข้มข้นทุกๆ 30 วินาที โดยใช้เครื่อง Refractometer และนำไปพล็อตกราฟเพื่อดูแนวโน้มเปรียบเทียบกัน 3 กรณี นั่นคือ

- (1) หัวฉีดทำมุม 35 องศา กับแนวตั้ง และทำมุม 30 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง
- (2) หัวฉีดทำมุม 0 องศา กับแนวตั้ง และทำมุม 45 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง
- (3) หัวฉีดทำมุม 30 องศา กับแนวตั้ง และทำมุม 0 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง

แล้วนำค่าความเข้มข้นจากการทดลองมาวาดกราฟแล้วเปรียบเทียบกับผลการทำแบบจำลองโดยโปรแกรม STAR-CD ถ่ายภาพหน้าตัดต่างๆ ของถังดังนี้

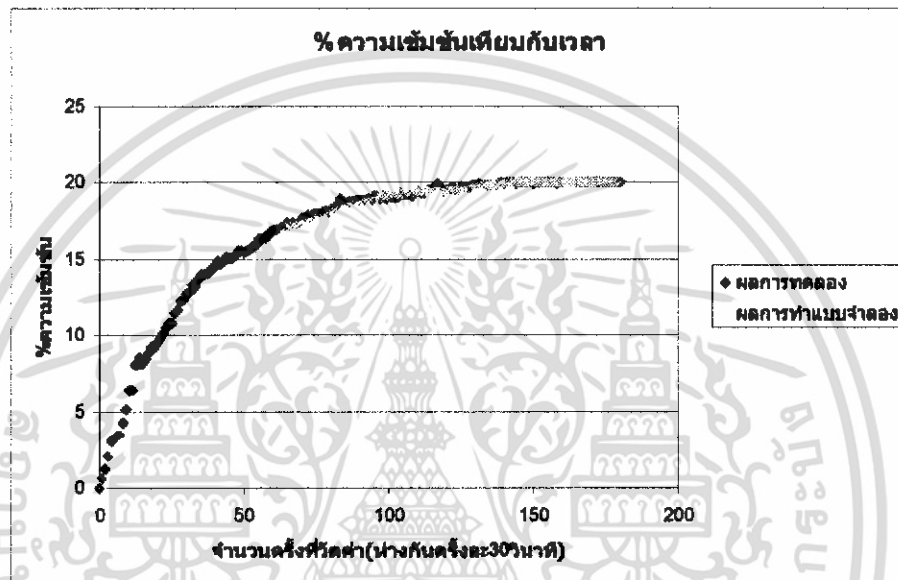
- (1) ที่ระดับความสูง 15 เซนติเมตร จากก้นถัง
- (2) ที่ระดับความสูง 15 เซนติเมตร จากก้นถัง
- (3) ที่ระดับความสูง 30 เซนติเมตร จากก้นถัง
- (4) หน้าตัดแนวตั้ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและผลของการกำจัดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการกำจัดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

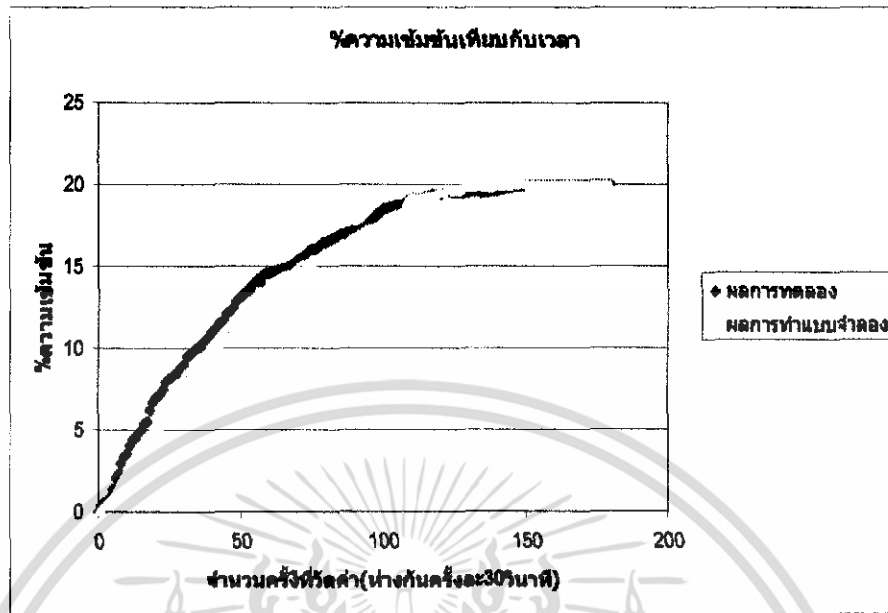
กรณีที่ 1. หัวฉีดทำมุม 35 องศา กับแนวตั้ง และทำมุม 30 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการกำจัดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 1)

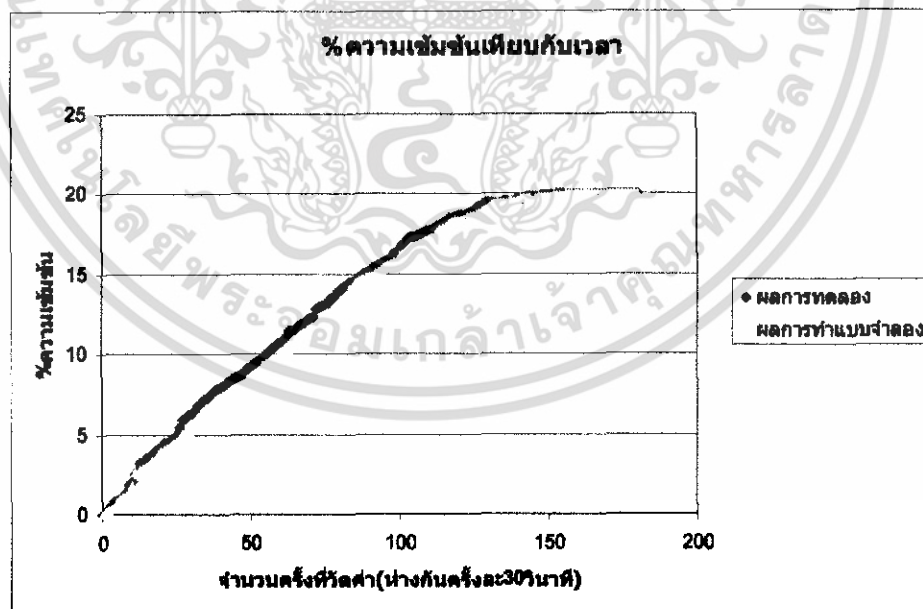
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2. หัวฉีดทำมุม 0 องศากับแนวตั้งและทำมุม 45 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 2)

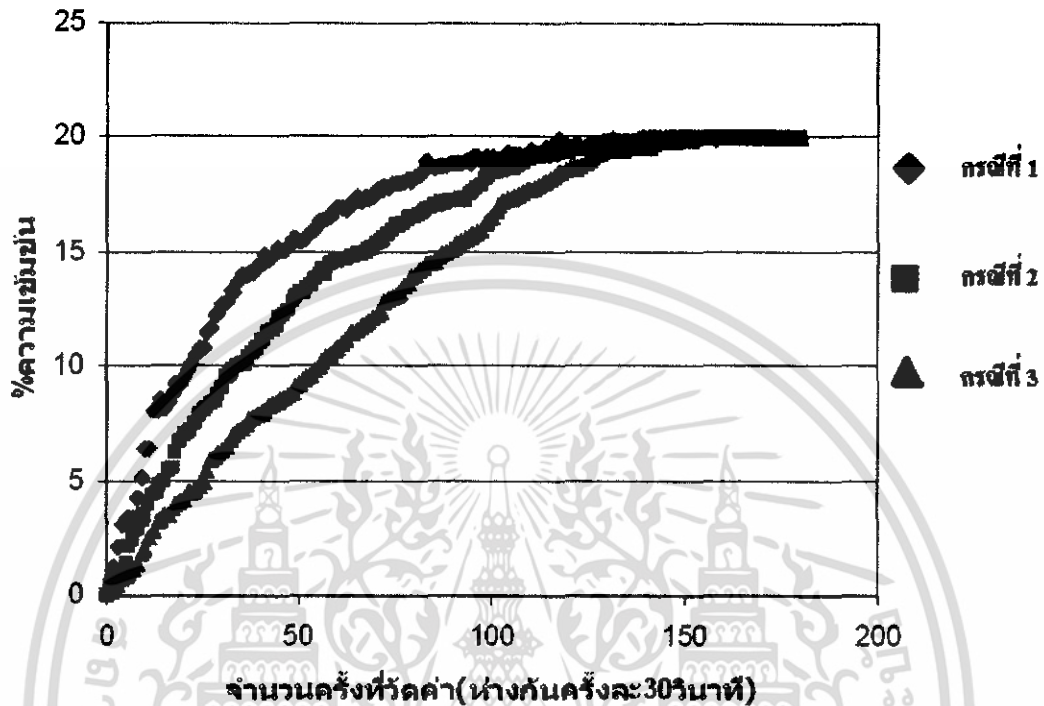
กรณีที่ 3. หัวฉีดทำมุม 45 องศากับแนวตั้งและทำมุม 0 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (กรณีที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%ความเข้มข้นเทียบกับเวลา



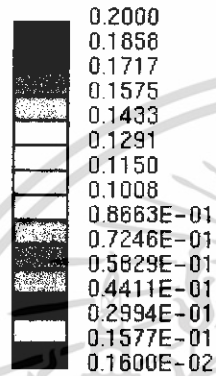
รูปที่ 4.4 กราฟแสดง % ความเข้มข้นกับเวลาของการทดลองจริงเปรียบเทียบกันทั้งสามกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

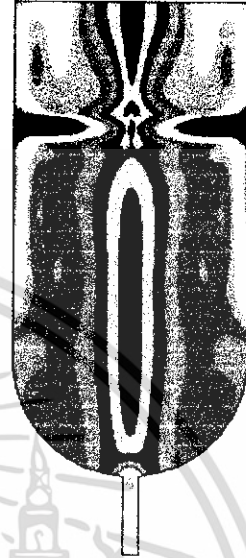
4.2 ผลของการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.1 แสดงผลเป็นความเร็ว

กรณีที่ 1. หัวฉีดทำมุม 35 องศา กับแนวตั้ง และทำมุม 30 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



รูปที่ 4.5 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที



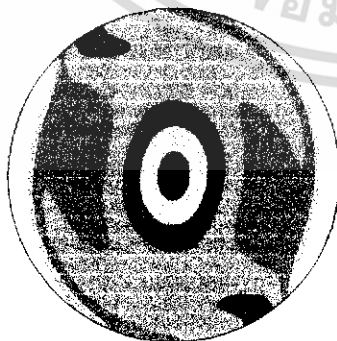
รูปที่ 4.6 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง



รูปที่ 4.7 ตัดกึ่งกลางส่วน โคนของกันถึง



รูปที่ 4.8 ตัดกันถึงทรงกระบอก



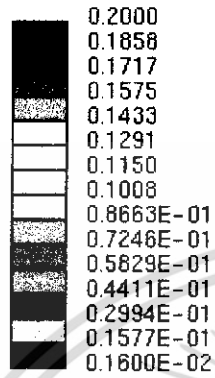
รูปที่ 4.9 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง



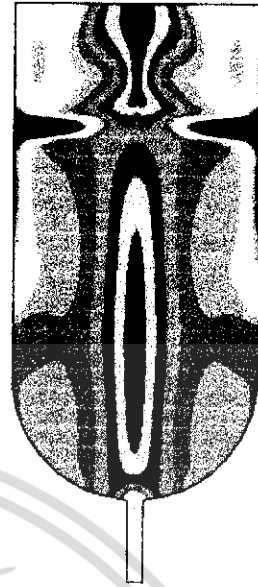
รูปที่ 4.10 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

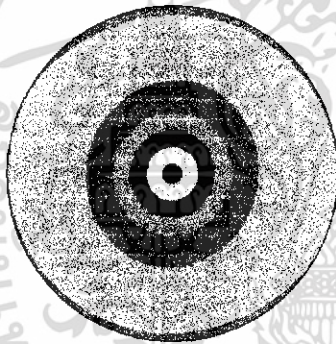
กรณีที่ 2. หัวฉีดทำมุม 0 องศากับแนวตั้งและทำมุม 45 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



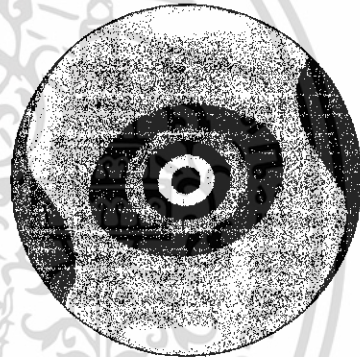
รูปที่ 4.11 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง



รูปที่ 4.13 ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของกันถึง



รูปที่ 4.14 ตัดกันถึงทรงกระบอก



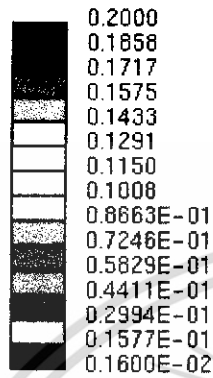
รูปที่ 4.15 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง



รูปที่ 4.16 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3. หัวฉีดทำมุม 45 องศากับแนวตั้งและทำมุม 0 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางกลางถัง



รูปที่ 4.17 แสดงสเกลความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.18 แสดงการตัดกึ่งกลางถัง



รูปที่ 4.19 ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของก้นถัง



รูปที่ 4.20 ตัดก้นถังทรงกระบอก



รูปที่ 4.21 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้นถัง

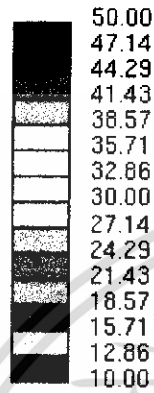


รูปที่ 4.22 ตัดที่ระดับ 30 cm จากก้นถัง

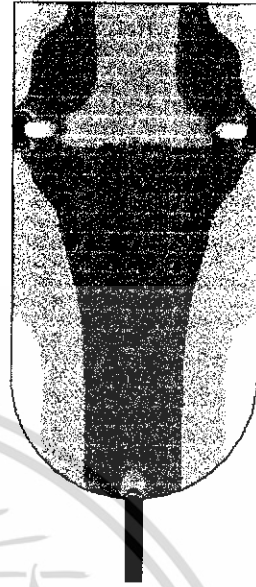
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แสดงผลเป็นความดัน

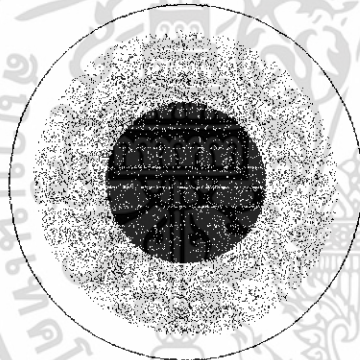
กรณีที่ 1. หัวฉีดทำมุม 35 องศากับแนวตั้งและทำมุม 30 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางก้านถึง



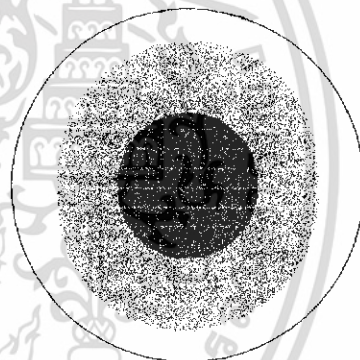
รูปที่ 4.23 แสดงสเกลความดัน



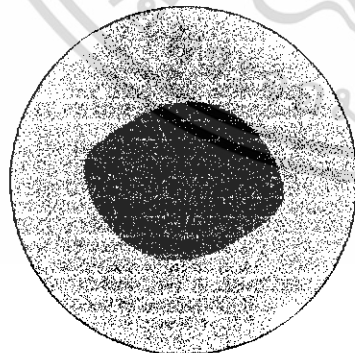
รูปที่ 4.24 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง



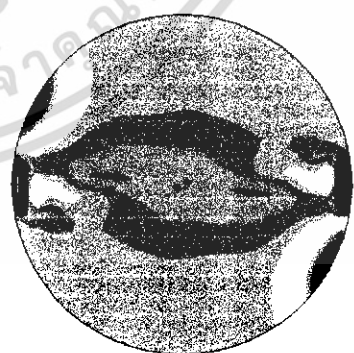
รูปที่ 4.25 ตัดกึ่งกลางส่วน โคนของก้านถึง



รูปที่ 4.26 ตัดก้านถึงทรงกระบอก



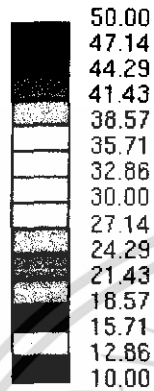
รูปที่ 4.27 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้านถึง



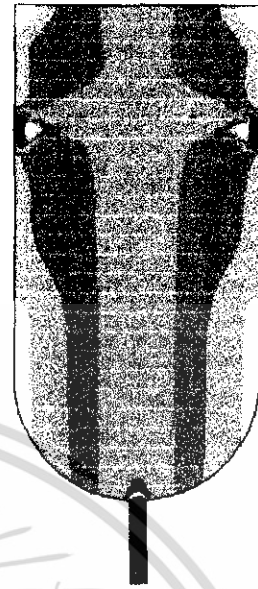
รูปที่ 4.28 ตัดที่ระดับ 30 cm จากก้านถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

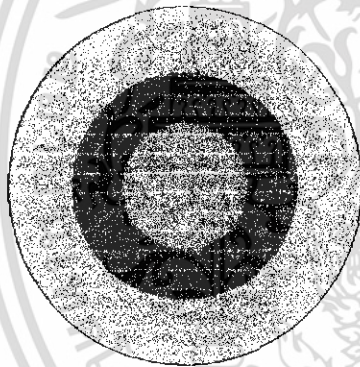
กรณีที่ 2. หัวฉีดทำมุม 0 องศากับแนวตั้งและทำมุม 45 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



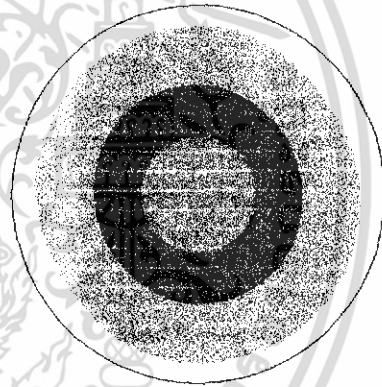
รูปที่ 4.29 แสดงสเกลความดัน



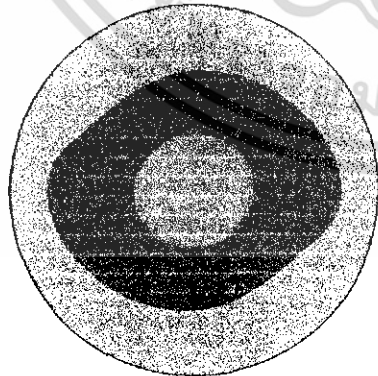
รูปที่ 4.30 แสดงการตัดกึ่งกลางถึง



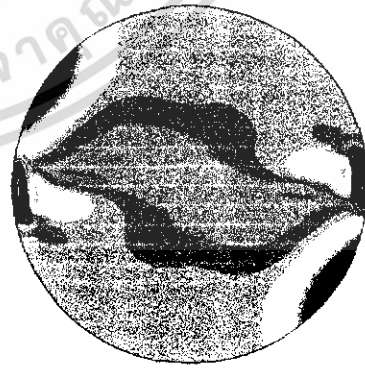
รูปที่ 4.31 ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของกันดั้ม



รูปที่ 4.32 ตัดกันถึงทรงกระบอก



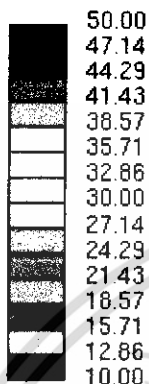
รูปที่ 4.33 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันดั้ม



รูปที่ 4.34 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันดั้ม

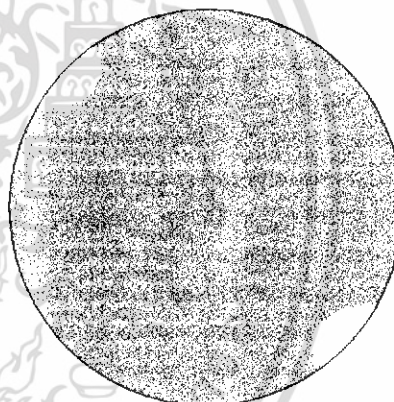
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3. หัวฉีดทำมุม 45 องศากับแนวตั้งและทำมุม 0 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางก้านตั้ง



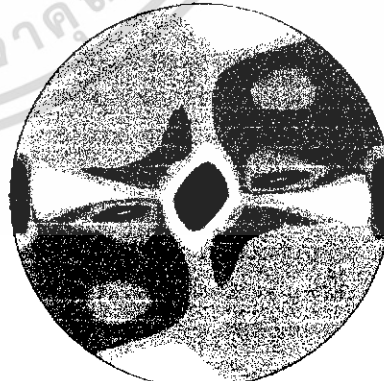
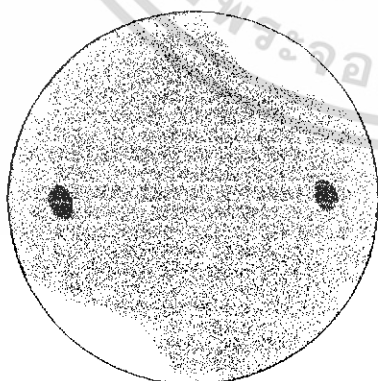
รูปที่ 4.35 แสดงสเกลความดัน

รูปที่ 4.36 แสดงการตัดกึ่งกลางตั้ง



รูปที่ 4.37 ตัดกึ่งกลางส่วนโค้งของก้านตั้ง

รูปที่ 4.38 ตัดก้านตั้งทรงกระบอก



รูปที่ 4.39 ตัดที่ระดับ 15 cm จากก้านตั้ง

รูปที่ 4.40 ตัดที่ระดับ 30 cm จากก้านตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ภาพแสดงผลของการถ่ายวิดีโอจากการผสมในถังผสมจริง

กรณีที่ 1. หัวฉีดทำมุม 35 องศากับแนวตั้งและทำมุม 30 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง



รูปที่ 4.41 ตัดกันถึงทรงกระบอก

รูปที่ 4.42 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง



รูปที่ 4.43 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง

รูปที่ 4.44 ตัดกึ่งกลางถึง

ภาพเคลื่อนไหวสามารถดูได้จากแผ่น CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2. หัวฉีดทำมุม 0 องศา กับแนวตั้งและทำมุม 45 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



รูปที่ 4.45 ตัดกันถึงทรงกระบอก



รูปที่ 4.46 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง



รูปที่ 4.47 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง



รูปที่ 4.48 ตัดกึ่งกลางถึง

ภาพเคลื่อนไหวสามารถดูได้จากแผ่น CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3. หัวฉีดทำมุม 45 องศากับแนวตั้งและทำมุม 0 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง



รูปที่ 4.49 ตัดกันถึงทรงกระบอก

รูปที่ 4.50 ตัดที่ระดับ 15 cm จากกันถึง



รูปที่ 4.51 ตัดที่ระดับ 30 cm จากกันถึง

รูปที่ 4.52 ตัดกึ่งกลางถึง

ภาพเคลื่อนไหวสามารถดูได้จากแผ่น CD

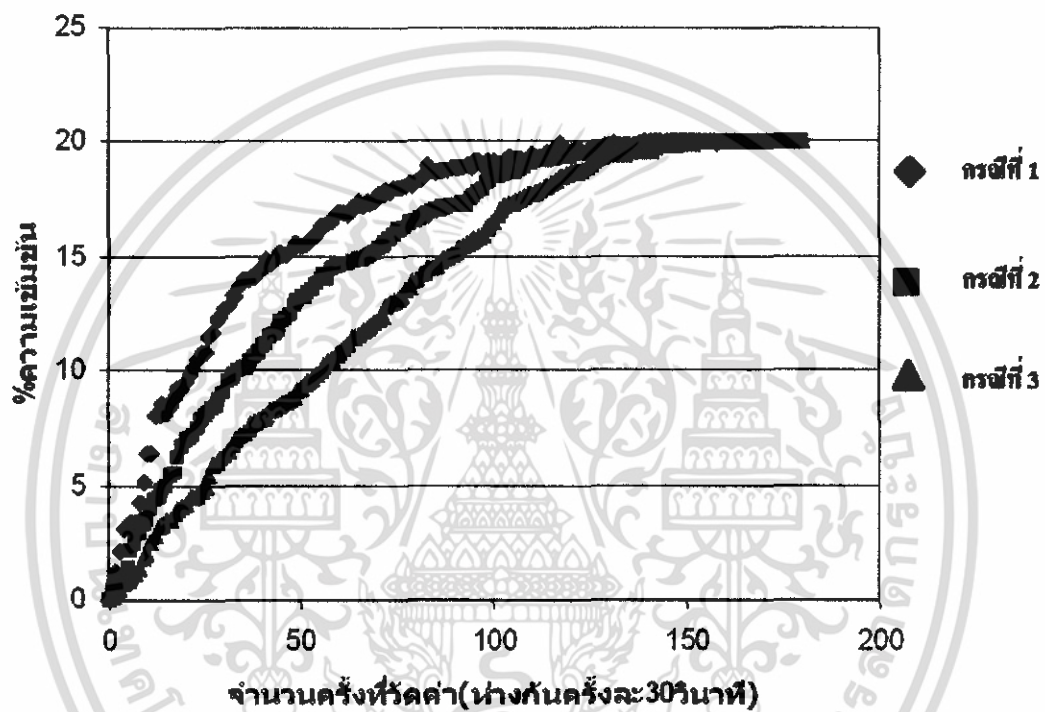
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

%ความเข้มข้นเทียบกับเวลา



จากกราฟจะเห็นได้ว่าในกรณีที่หัวฉีดทำมุม 35 องศา กับแนวตั้งและทำมุม 30 องศา กับเส้นผ่านศูนย์กลางถึง กราฟมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ เร็วกว่าในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 และกราฟจากผลการทดลองมีแนวโน้มคล้ายกับผลจากการใช้แบบจำลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการจำลองคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล มีประโยชน์มากแต่ผู้ที่จะใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริงควรมีความรู้ความเข้าใจหลักการพื้นฐานและทฤษฎีต่างๆ ทางกลศาสตร์พอสมควร เพื่อจะสามารถเข้าใจการทำงานของโปรแกรมได้ในระดับลึกถึงสมการที่คอมพิวเตอร์คำนวณในแต่ละส่วนย่อยของชิ้นงาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นแค่เครื่องมือที่ช่วยในการศึกษา อย่าให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์กำหนดขอบเขตการศึกษาของคน

5.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติการไหลของการผสมแบบหัวฉีดแรงดันมีมากมาย ถ้าศึกษาให้ดีจะสามารถพัฒนากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและประหยัดขึ้นได้มาก

5.2.3 ในการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นถ้ามีเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูง

5.2.4 ควรเริ่มศึกษาจากอัตราการไหลของไหลต่างๆ ก่อนเพื่อที่จะสามารถสังเกตลักษณะการไหลได้ง่ายขึ้น

5.2.5 ควรมีระบบควบคุมการไหลช่องทางออกและช่องทางเข้าที่มีความน่าเชื่อถือเพื่อให้ผลการทดลองน่าเชื่อถือมากขึ้น และควรมีเบรกเกอร์ไฟเพื่อความปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

ปราโมทย์ เคชะอำไพ. 2542. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ. 2545. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภัทรารักษ์ เมฆพฤษาวงศ์. 2543. เครื่องสูบลูกในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชลิดา เนียมนุ้ย. 2546. “การผสมอาหารเหลวโดยใช้เครื่องผสมแบบกระแสนในเส้นการไหล”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ยุทธพงศ์ แสงรัตน์และคณะ. 2546. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นิรภัฏ ห้วยเรไรและคณะ. 2546. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชยันต์ เต๋อสงเคราะห์และคณะ. 2545. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Edward, L.P. et al. 2004. Hand Book of Industrial Mixing. New York : John Wiley and Sons.

Gang Pan. Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering. Thesis. The United State Of America : State University of New York at Buffalo.

Mark J. Carletti et al. Tufts University. Mechanical Engineering Department. USA : McDonnell Douglas Corporation.

Denev, J. A. et al Institute for Technical Chemistry and Polymer Chemistry. University of Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse 12. 76128 Karlsruhe. Germany.

John, A. Dean. Lange's Hand Book of Chemistry. New York : McGraw Hill.

Warren L. McCabe. Unit Operations of Chemical Engineering. New York : McGraw Hill.

Hui HU. 2001. Institute of Industrial Science. Japan : University of Tokyo.

Gates Corporation Company. 2006. Viscosity.

Richard M. Lueptow. 2005. jet mixing.

http://www.gates.com/brochure.cfm?brochure=2625&location_id=3046

http://gem1.cive.uh.edu/content/conf_exhib/99_present/13.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาพส่วนประกอบของชุดทดลอง

1. ถังผสม ทำจากอะคริลิกประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือตัวถังจะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร และส่วนกันถังสามารถปรับเปลี่ยนแบบของกันถังเป็นกันตัดตรงหรือกันโค้ง



ตัวถัง



กันถัง

2. บั้ม Stainless 2 เครื่อง ขนาด 1 แกร่ม้า ใช้ไฟ 3 เฟส 50 Hz



บั้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หัวฉีด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับท่อทองแดงขนาด 4 หุน ซึ่งงอเป็นมุม 30 องศาและ 45 องศา มุมละ 2 หัวฉีด



หัวฉีด

4. ระบบท่อ มี 2 ทางคือ ท่อดูดและท่อส่ง ท่อดูดใช้ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว ยาว 110 เซนติเมตร ติดหัวกะโหลกกันน้ำกลับ ส่วนท่อส่งใช้ท่อ PVC ขนาดเดียวกันแล้วลดขนาดต่อกับวาล์ว, ท่อน้ำความดันสูง และท่อทองแดงที่เชื่อมติดกับหัวฉีด



ท่อดูด



ท่อส่ง

5. การควบคุม มีทั้ง 2 ทางคือ ขาเข้าและขาออก โดยมีวาล์วเปิด-ปิดเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำ



วาล์วขาเข้าถึงผสม

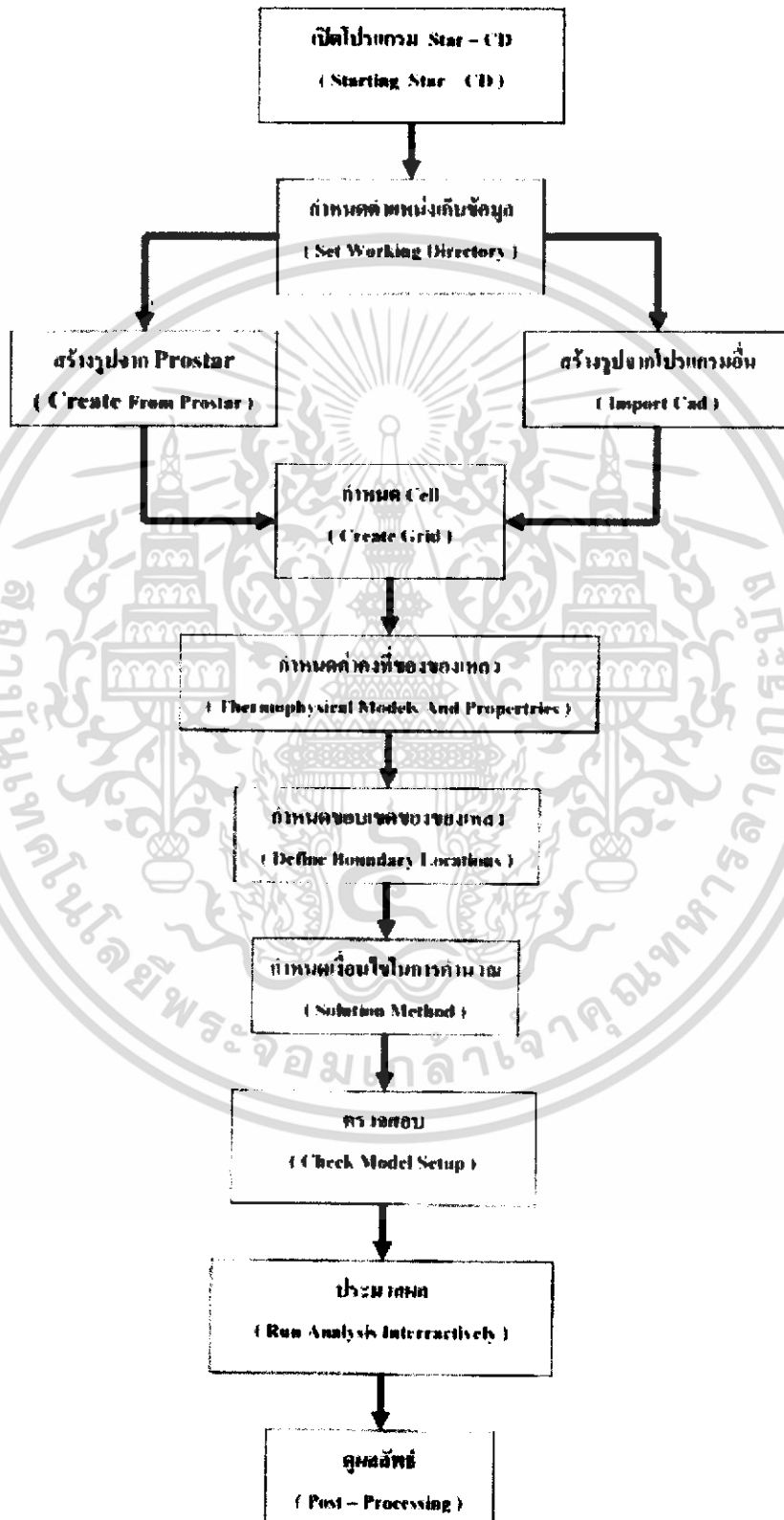


วาล์วขาออกจากถึงผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้