

สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหล
ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**CORRELATION FOR PRESSURE DROP PREDICTION
OF FLOW THROUGH HEAT EXCHANGER FINS**



Jongyos Tiandum

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

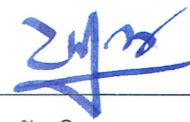
Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหล
ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

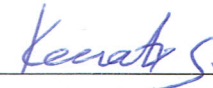
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กীরติ สุตक्षण)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล





(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จยศ เทียนคำ : สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่าน
ครีบแลกเปลี่ยนความร้อน (CORRELATION FOR PRESSURE DROP PREDICTION OF
FLOW THROUGH HEAT EXCHANGER FINS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุภักษ์, 111 หน้า.

เกียร์เป็นชิ้นส่วนสำคัญในระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ ในขณะที่เกียร์ทำงานต้องอาศัยน้ำมัน
เกียร์หล่อลื่นป้องกันความเสียหาย เมื่อเกียร์ทำงานเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนสะสมในน้ำมัน
เกียร์ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ อุปกรณ์ดังกล่าว
ประกอบด้วย ครีบแลกเปลี่ยนความร้อนวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เมื่อน้ำมันเกียร์ไหลผ่านจึงเกิด
ความดันตกคร่อม ซึ่งเพิ่มขึ้นตามลักษณะการไหลและรูปร่างของครีบ ความดันตกคร่อมเป็นตัวแปร
สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ การทดลองเพื่อให้ได้ค่าความดันตกคร่อม
ในกรณีที่น่าสนใจต่าง ๆ มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูง และใช้เวลานาน การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทำนายจึงเป็น
ทางเลือกที่ประหยัดและได้ผลลัพธ์รวดเร็วขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาความดันตกคร่อมของการไหลผ่าน
ครีบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีระยะพิทซ์ 1.75, 2.613, 3, และ 4 มิลลิเมตร ความสูงครีบ 2, 3, 4, และ
5 มิลลิเมตร มุมเอียงครีบ 10, 18.59, 30, และ 45 องศา อัตราการไหล 5, 10, 15, และ 20 ลิตร/นาที
และอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ 10, 100, และ 120 °C โดยใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับแบบจำลองการไหล
ปั่นป่วน $k-\omega$ ผลการจำลองพบว่า ความดันตกคร่อมสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิ
ของน้ำมันเกียร์ต่ำลง เมื่อพิจารณาขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า ความดันตกคร่อมลดลง
เมื่อระยะพิทซ์ ความสูงครีบและมุมเอียงครีบเพิ่มขึ้น โดยปัจจัยขนาดที่มีอิทธิพลต่อความดันตก
คร่อมเรียงลำดับจากมากสุดคือ อัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ ระยะพิทซ์ ความสูงครีบ
และมุมเอียงครีบ ตามลำดับ ผลการจำลองถูกนำไปสร้างสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อม
พบว่าสมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการคำนวณที่ 5.97 % เมื่อ
เทียบกับผลการทดลอง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

JONGYOS TIANDUM : CORRELATION FOR PRESSURE DROP

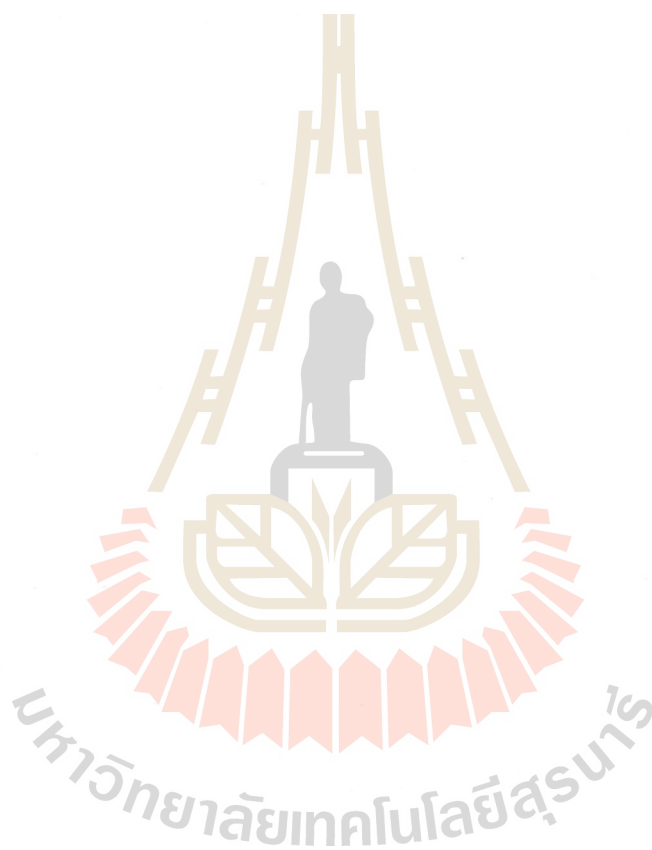
PREDICTION OF FLOW THROUGH HEAT EXCHANGER FINS. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA, Ph.D., 111 PP.

CORRELATION/CFD/PRESSURE DROP/HEAT EXCHAGER FINS

Gear is an important part of the car power transmission system. While its working, the gear system requires gear oil to help lubricating and preventing damage. When the gear operates for a long time, it will result in heat accumulation in gear oil. Therefore, it is necessary to use the heat exchanger to reduce the high temperature of the gear oil. The heat exchanger device consists of fins stacked by layers arrangement. When the gear oil flows through this device, the pressure drop will appear and increase by the flow and fin shape characteristics. Pressure drop is an important factor that affects the performance of the device. To do experiment for obtaining the pressure drop through such device are spent with high cost and time consuming. Using the computer simulation for predicting the results are an economical and faster alternatively. The research investigates the pressure drop of the gear oil flow through the heat exchanger fins. The investigations have been performed on fins with pitch length of 1.75, 2.613, 3, and 4 mm, fin heights of 2, 3, 4, and 5 mm, fin inclinations of 10, 18.59, 30, and 45 degree, based on the oil flow rates of 5, 10, 15, and 20 L/min, and oil temperature of 40, 100, and 120 °C. The computer simulation has been investigated on k-ε turbulent model. The results found that, the pressure drop increased when the oil flow rate increased and the oil temperature decreased. Considering the fin sizes effect, it is found that, the pressure decreased as the pitch length, fin height, and fin inclination angle increased. By the size factor that influences the pressure drop in descending order are oil flow rate,

oil temperature, pitch length, fin height, and fin inclination angle, respectively. The simulation results are used to formulate the correlation for predicting the pressure drop. It is found that the developed correlation gives an average calculation error of 5.97% compare with the experimental data.



School of Mechanical Engineering

Academic year 2018

Student's Signature

Jangpa T.

Advisor's Signature

Keerthi S.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังเป็นผู้ให้ความรู้ คอยให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยต่อไป

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับโอกาสในการศึกษา และทุนการศึกษา

ขอขอบคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาที่คอยติดตามการดำเนินงาน ให้กำลังใจและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ เลขานุการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการเตรียมเอกสารต่าง ๆ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้องในกลุ่มวิจัยพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ รวมถึงบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในการเรียนและการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

ท้ายนี้ขอขอบคุณร่างกายและจิตใจของข้าพเจ้าที่เข้มแข็งและยืนหยัดจนสามารถทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

จงยศ เทียนคำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 สมการควบคุมการไหล.....	3
2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	4
2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	4
2.2.3 สมการแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$	4
2.2.4 สมการแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \omega$ SST.....	5
2.3 ความดันตกคร่อมและการสูญเสีย.....	7
2.3.1 การสูญเสียหลัก.....	8
2.3.2 การสูญเสียย่อย.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม.....	9
2.4.1	เซลล์.....	10
2.4.2	เงื่อนไขขอบเขต.....	10
2.5	การสร้างสหสัมพันธ์.....	11
2.5.1	กำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น.....	11
2.5.2	กำลังสองน้อยที่สุดพหุนาม.....	12
2.5.3	กำลังสองน้อยที่สุดแปลงรูป.....	13
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.6.1	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดครีบลอกเปลี่ยน ความร้อนต่อความดันตกคร่อมของการไหล.....	14
2.6.2	ผลกระทบของการขวางการไหลต่อความดันตกคร่อมของการไหล.....	17
2.6.3	สหสัมพันธ์ในการใช้งานทางด้านวิศวกรรม.....	18
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1	บทนำ.....	19
3.2	ตรวจสอบการใช้งานซอฟต์แวร์.....	19
3.3	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับปัญหาที่วิเคราะห์.....	24
3.3.1	ครีบลอกเปลี่ยนความร้อน.....	25
3.3.2	สมบัติของน้ำมันเกียร์.....	28
3.4	การจำลองความดันตกคร่อมผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อน.....	28
3.4.1	การสร้างโดเมนเพื่อจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	29
3.4.2	การกำหนดค่าสำหรับคำนวณทางคอมพิวเตอร์.....	32
3.4.3	การกำหนดเงื่อนไขขอบ.....	37
3.4.4	การสร้างกริดและการทดสอบความเป็นอิสระของกริด.....	38
3.4.5	การหาความดันตกคร่อมของการไหล.....	40
3.5	การสร้างสหสัมพันธ์.....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.1	ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์.....	41
3.5.2	ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับขนาดของครีบลูกเปลี่ยนความร้อน.....	42
4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	45
4.1	บทนำ.....	45
4.2	ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลต่อความดันตกคร่อมอ้างอิง.....	45
4.3	ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดครีบลูกต่อความดันตกคร่อม.....	48
4.3.1	ผลของระยะพิทช์ต่อความดันตกคร่อม.....	49
4.3.2	ผลของความสูงครีบลูกต่อความดันตกคร่อม.....	50
4.3.3	ผลของมุมเอียงครีบลูกต่อความดันตกคร่อม.....	50
4.4	การสร้างสหสัมพันธ์.....	51
4.4.1	ผลกระทบจากอุณหภูมิและอัตราการไหล.....	52
4.4.2	ผลกระทบจากขนาดครีบลูก.....	53
4.4.3	กระบวนการหาฟังก์ชัน.....	58
4.4.4	การทวนสอบการใช้งานสหสัมพันธ์.....	61
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	65
	รายการอ้างอิง.....	67
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน.....	70
	ภาคผนวก ข. ผลความดันตกคร่อมจากผลกระทบของขนาดครีบลูกเปลี่ยนความร้อน.....	79
	ภาคผนวก ค. ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับขนาดครีบลูกเปลี่ยนความร้อน.....	92
	ภาคผนวก ง. ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์.....	97
	ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$5
2.2	ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST7
3.1	การตั้งค่าการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$22
3.2	สมบัติของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 28
3.3	ผลการจำลองความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อน28
3.4	ขนาดของครีบลอกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับกรณีทดสอบต่าง ๆ29
3.5	การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับการจำลองการไหลราบเรียบ 32
3.6	การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$33
3.7	การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST 34
3.8	ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลอง และการจำลองการไหล 35
3.9	เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อน37
4.1	ตัวแปรอ้างอิงของครีบลอกเปลี่ยนความร้อน46
4.2	ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลอง และจำลองการไหลกรณีอ้างอิง 46
4.3	สัมประสิทธิ์ m, n กับอุณหภูมิน้ำมันเกียร์ 52
4.4	สัมประสิทธิ์ระยะพิทช์ a, b 55
4.5	สัมประสิทธิ์ความสูงครีบลอก c, d ที่มุมเอียงครีบลอกต่าง ๆ 56
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์ m, n และแฟกเตอร์ตัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ 59
4.7	ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการทดลองที่กรณีครีบลอกอ้างอิง 62
ก.1	ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลอกเปลี่ยนความร้อน 71
ง.1	ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบเซลล์ (ซ้าย) Hexahedron และ (ขวา) Tetrahedron 10
3.1	รูปท่อกลมสำหรับการตรวจสอบการใช้งานซอฟต์แวร์..... 20
3.2	แผนภูมิมิติ..... 21
3.3	กริดของท่อที่ใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์..... 21
3.4	เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลด้วยซอฟต์แวร์..... 22
3.5	คอนทัวร์ความดันตรงแนวกึ่งกลางท่อ 23
3.6	คอนทัวร์ความเร็วตรงแนวกึ่งกลางท่อ 23
3.7	เวกเตอร์ความเร็วที่หน้าตัดกลางท่อ 24
3.8	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์ 25
3.9	ลักษณะการจัดเรียงครีบบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์..... 26
3.10	ลักษณะครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์ในแต่ละชั้น..... 26
3.11	ลักษณะครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์ในแต่ละเซลล์..... 27
3.12	รูปทรงของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน 27
3.13	รูปทรงโดเมนที่วิเคราะห์ 30
3.14	เปรียบเทียบลักษณะกริดบริเวณมุม..... 31
3.15	โดเมนของน้ำมันเกียร์สำหรับใช้จำลองการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (mm)..... 32
3.16	อัตราการไหลและความดันตกคร่อมของแบบจำลองการไหลแบบต่าง ๆ และผลการทดลอง..... 36
3.17	เงื่อนไขขอบการจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน..... 37
3.18	กริดสำหรับใช้จำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน 38
3.19	รูปแบบกริดที่ใช้ในการจำลองคอมพิวเตอร์ 39
3.20	จำนวนเซลล์และความดันตกคร่อมครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน 40
3.21	แผนภูมิความสัมพันธ์ของตัวแปรกับความดันตกคร่อม 43
4.1	ความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์กรณีอ้างอิง..... 46
4.2	คอนทัวร์ความดันของครีบบที่อัตราการไหลต่าง ๆ 47
4.3	คอนทัวร์ความดันของครีบบอ้างอิงที่อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ต่าง ๆ 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	เส้นการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบที่อัตราการไหลต่าง ๆ..... 48
4.5	สัดส่วนระยะพิทซ์กับสัดส่วนความดันตกคร่อม..... 49
4.6	สัดส่วนความสูงครีบบกับสัดส่วนความดันตกคร่อม..... 50
4.7	สัดส่วนมุมเอียงครีบบกับสัดส่วนความดันตกคร่อม..... 51
4.8	อุณหภูมิน้ำมันเกียร์กับสัมประสิทธิ์ m, n 53
4.9	ระยะพิทซ์กับสัดส่วนความดันตกคร่อม..... 54
4.10	สัดส่วนความสูงครีบบกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a 55
4.11	สัดส่วนมุมเอียงกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ b และสัมประสิทธิ์ความสูงครีบบ c, d 57
4.12	การตัดผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เข้าสู่ผลการทดลอง 59
4.13	อุณหภูมิน้ำมันเกียร์กับแฟกเตอร์ตัด K_m, K_n 60
4.14	ความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลจากการทดลองและสหสัมพันธ์ที่กรณีครีบบอ้างอิง..... 63
ข.1	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 10 องศา 80
ข.2	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 18.59 องศา 81
ข.3	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 30 องศา 82
ข.4	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 45 องศา 83
ข.5	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีบบที่ระยะพิทซ์ 1.75 mm..... 84
ข.6	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีบบที่ระยะพิทซ์ 2.613 mm..... 85
ข.7	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีบบที่ระยะพิทซ์ 3 mm..... 86
ข.8	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีบบที่ระยะพิทซ์ 4 mm..... 87
ข.9	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนมุมเอียงครีบบที่ความสูงครีบบ 2 mm 88
ข.10	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนมุมเอียงครีบบที่ความสูงครีบบ 3 mm 89
ข.11	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนมุมเอียงครีบบที่ความสูงครีบบ 4 mm 90
ข.12	สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนมุมเอียงครีบบที่ความสูงครีบบ 5 mm 91
ค.1	สัดส่วนความดันตกคร่อมและสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 10 องศา..... 93
ค.2	สัดส่วนความดันตกคร่อมและสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 18.59 องศา..... 93
ค.3	สัดส่วนความดันตกคร่อมและสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครีบบ 30 องศา..... 94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.4	สัดส่วนความดันตกคร่อมและสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงกริบ 45 องศา..... 94
ค.5	สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงกริบที่มุมเอียงกริบ 10 องศา..... 95
ค.6	สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงกริบที่มุมเอียงกริบ 18.59 องศา..... 95
ค.7	สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงกริบที่มุมเอียงกริบ 30 องศา..... 96
ค.8	สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงกริบที่มุมเอียงกริบ 45 องศา..... 96



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a, b	=	สัมประสิทธิ์ระยะพิทช์
c, d	=	สัมประสิทธิ์ความสูงครีป
D_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
f	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
F_H	=	ความสูงครีป
F_p	=	ระยะพิทช์
F_A	=	มุมเอียงครีป
g	=	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก
h_f	=	ความสูญเสียเสียด
h_m	=	ความสูญเสียย่อย
h_M	=	ความสูญเสียหลัก
K_A	=	สัดส่วนมุมเอียงครีป
K_F	=	ตัวประกอบขนาดครีป
K_H	=	สัดส่วนความสูงครีป
K_p	=	สัดส่วนระยะพิทช์
K_m, K_n	=	แฟกเตอร์ตัด
L	=	ความยาว
m, n	=	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิน้ำมันเกียร์
P	=	ความดัน
Q	=	อัตราการไหล
Re	=	เลขเรย์โนลด์ส์
T	=	อุณหภูมิ
v	=	ความเร็ว
ρ	=	ความหนาแน่น
τ	=	ความเค้นเฉือน
μ	=	ความหนืด
ΔP	=	ความดันตกคร่อม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เกียร์เป็นส่วนสำคัญภายในรถยนต์ที่ทำงานเมื่อรถยนต์ขับเคลื่อน เพื่อยืดอายุ และป้องกันความเสียหายจากการทำงานของเกียร์ จึงจำเป็นต้องมีน้ำมันเกียร์ช่วยในการหล่อลื่น และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เมื่อเกียร์ทำงานเป็นเวลานานทำให้เกิดความร้อนสะสมเป็นผลเสียที่สร้างความเสียหายกับระบบเกียร์ในเวลาต่อมา จึงนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้งาน เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะเป็นครีบบีบอัดกันหลายชั้น เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำหล่อเย็นกับน้ำมันเกียร์ การออกแบบครีบบีบอัดแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีน้ำมันเกียร์ลูกค้า (ผู้ผลิตรถยนต์) มักมีข้อกำหนดหลัก 2 อย่าง คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม โดยทั้งสองปัจจัยดังกล่าวจะแปรผันตามขนาดและรูปทรงของครีบบีบอัดแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบครีบบีบอัดแลกเปลี่ยนความร้อนมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน การทดสอบเพื่อหาค่าความดันตกคร่อมของการไหลให้มีค่าเป็นไปตามเสปคการใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามการทดสอบใช้ระยะเวลานาน มีต้นทุนค่าการดำเนินการสูง จึงไม่เหมาะสมหากมีกรณีความต้องการที่หลากหลาย

การนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองและใช้ทำนายพฤติกรรมของการไหล จนนำไปสู่ผลการทำนายความดันตกคร่อมในอุปกรณ์ดังกล่าว ทำให้ในการออกแบบง่ายขึ้น ประหยัดต้นทุนการทดสอบ ได้ผลลัพธ์รวดเร็วทันต่อความต้องการของลูกค้า

สหสัมพันธ์ คือ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเพื่ออธิบายแนวโน้มผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ทำนายผลลัพธ์ความดันตกคร่อมของการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบีบอัดแลกเปลี่ยนความร้อนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบครีบบีบอัดแปรค่าในช่วงที่ต้องการ เพื่อทำนายว่าเมื่อค่าตัวแปรดังกล่าวเปลี่ยนไปจะส่งผลกระทบต่อความดันตกคร่อมอย่างไร ข้อมูลที่ได้ในกรณีทดสอบถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สหสัมพันธ์ เพื่อใช้ทำนายความดันตกคร่อมของการไหลได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนกับความดันตกคร่อมของการไหล

1.2.2 เพื่อสร้างสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาความดันคร่อมการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 1) อัตราการไหล 5, 10, 15, และ 20 L/min
- 2) น้ำมันเกียร์อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C
- 3) ระยะพิทช์ (F_p) ของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน 1.75, 2.163, 3, และ 4 mm
- 4) ความสูงของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (F_H) 3, 2, 4, และ 5 mm
- 5) ความกว้างของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (F_w) 1.5 mm
- 6) ความยาวของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (F_L) 110 mm
- 7) มุมเอียงของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (F_A) 10, 18.59, 30, และ 45 องศา

1.3.2 น้ำมันเกียร์ เป็นชนิด ULV

1.3.3 ใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 18.0 ในการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีต่อความดันตกคร่อมของการไหล

1.4.2 ได้สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการไหลจากนั้นจะนำเสนอวิธีการ และเทคนิคในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และหลักการในการสร้างสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2 สมการควบคุมการไหล

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ต้องอาศัยการแก้สมการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับระบบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จำลองการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะคงตัว ไม่มีการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงาน เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ จากการตรวจสอบค่าเลขเรย์โนลด์ส์บนพื้นฐานการไหลในท่อที่นิยามบนเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h) ดังสมการที่ 2.1

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$D_h = \frac{2WH}{W+H} \quad (2.2)$$

เมื่อ W คือ เป็นความกว้างของครีบ

H คือเป็นความสูงของครีบ

พบว่า Re_{max} มีค่าเท่ากับ 945,899 จึงให้การไหลอยู่ในย่านที่มีความปั่นป่วน ดังนั้นสมการควบคุมที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยสมการดังต่อไปนี้

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.3)$$

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j')$$
(2.4)

โดยที่ $\bar{u}_i' \bar{u}_j'$ คือ พจน์ความเค้นเรย์โนลด์ส์ เกิดจากค่าความปั่นป่วนในรูปแบบของการไหลในสถานะต่าง ๆ

2.2.3 สมการแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$

แบบจำลองนี้ประกอบด้วยสมการส่งถ่าย (Transport Equations) 2 สมการ ได้แก่ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) และสมการอัตราการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ϵ) ซึ่งมีรูปแบบและค่าคงที่ของแบบจำลองดังต่อไปนี้

1) สมการพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon \quad (2.5)$$

2) สมการอัตราการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \left[C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) \right] \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.6)$$

โดยที่ G_k คือ พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนอันเนื่องมาจากการกระจายตัวของความเร็ว

G_b คือ พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนอันเนื่องมาจากการลอยตัว

σ_k คือ เลข Turbulent Prandtl สำหรับ k

σ_ε คือ เลข turbulent Prandtl สำหรับ ε
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$ เป็นค่าคงที่ของแบบจำลอง

โดยค่าความหนืดการปั่นป่วน μ_t (Turbulent Viscosity) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	0-1.0

2.2.4 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ SST (Shear Stress Transport)

แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดย F.R. Menter (1994) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกให้กระชับว่าแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST แบบจำลองนี้ประกอบด้วย 2 สมการ คือสมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน และสมการการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วนเฉพาะในรูปของ ω ดังนี้

- 1) สมการพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k \quad (2.8)$$

- 2) สมการอัตราการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วนเฉพาะ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (2.9)$$

โดยที่

- G_k คือ พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนอันเนื่องมาจากการกระจายตัวของความเร็ว
 G_ω คือ พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนอันเนื่องมาจากการกำเนิดของ ω

μ_t คือ ค่าความหนืดการปั่นป่วน

Y_k, Y_ω คือ การกระจายของ k และ ω เนื่องจากความปั่นป่วน

σ_k, σ_ω คือ เลข turbulent Prandtl ของ k และ ω

โดยค่าความหนืดการปั่นป่วน μ_t (Turbulent Viscosity) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a}, \frac{SF_2}{a_1\omega}\right]} \quad (2.10)$$

ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำสัมพันธ์กับความหนืดของการปั่นป่วน a^* แสดงในสมการ

$$a_0 = a^* \left(\frac{a_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu\omega} \quad (2.12)$$

และ

$$a_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (2.13)$$

ค่าคงที่ของแบบจำลองเป็นดังนี้ $R_k = 6$, $\beta_i = 0.072$, $a^* = a_\infty^* = 1$ ที่เลขเรย์โนลด์ส์สูง เมื่อ S คือ ขนาดของอัตราความเครียด

$$F_2 = \tanh(\phi_2^2) \quad (2.14)$$

และ

$$\phi_2 = \min \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right] \quad (2.15)$$

โดยที่ y คือ ระยะห่างจากพื้นผิวถัดไป

ค่าคงที่ของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST

$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,2}$	a_1	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$
1.176	2.0	1.0	1.168	0.31	0.075	0.0828

2.3 ความดันตกคร่อมและการสูญเสีย

ความดันตกคร่อมของการไหลภายในท่อเกิดจากการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงานในรูปแบบดังนี้

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (2.16)$$

โดยที่ P คือ ความดัน (Pa)

v คือ ความเร็ว (m/s)

z คือ ความสูงจากระดับอ้างอิง (m)

h_f คือ การสูญเสียเฮด (Head Loss) (m)

g คือ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

หากพิจารณาท่อในแนวระดับ ($z_1 = z_2$) และพื้นที่หน้าตัดท่อคงที่ทำให้ $v_1 = v_2$ จะได้ว่า Head loss มีค่า “บวก” เสมอ นำไปสู่ข้อสรุปว่า $P_1 > P_2$ ซึ่งความแตกต่างของความดันนี้เรียกกันว่า “ความดันตกคร่อม (Pressure Drop)” หากจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$h_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (2.17)$$

2.3.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss, h_m)

การสูญเสียหลักเกิดจากความฝืดของผิวท่อ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเค้นเฉือน τ_w ความเร็วของการไหล v ความยาวท่อ L และขนาดของท่อ D ดังนี้

$$h_m = \left(\frac{8\tau_w}{\rho v^2} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.18)$$

พจน์ในวงเล็บแรกเป็นพจน์ที่ไม่มีหน่วย พจน์ในวงเล็บที่สองคือความยาวคุณลักษณะของท่อ และพจน์ในวงเล็บที่สามคือ Dynamic Head

ในทางปฏิบัตินิยมเรียกพจน์ในวงเล็บแรกว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f สมการที่ 2.18 จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$h_m = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.19)$$

โดย f เป็นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดาร์ซี และเรียกสมการที่ 2.19 ว่า “ความสัมพันธ์ดาร์ซี-ไวส์บัค” จากสมการจะเห็นว่า การสูญเสียเสดแปรผันตรงกับ f ความยาวคุณลักษณะและ Dynamic head

2.3.2 การสูญเสียย่อย (Minor Loss, h_m)

ในหัวข้อ 2.3.1 เป็นการสูญเสียหลัก เกิดจากความฝืดของผนังท่อที่ต้านทานการไหลเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นตลอดแนวความยาวของท่อ อย่างไรก็ตามการไหลในกรณีที่มี การงอ โค้ง ข้อต่อ หรืออุปกรณ์ติดตั้งระหว่างแนวยาวท่อจะเกิดการสูญเสียเฉพาะจุดขึ้นเรียกว่า “การสูญเสียย่อย” เนื่องจากสูญเสียย่อยเกิดขึ้นเฉพาะจุดจึงไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วท่อ แต่ปริมาณการสูญเสียยังคงเป็นส่วนหนึ่งของความเร็วการไหล ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ของการสูญเสียย่อยให้เป็นสัดส่วนกับ Dynamic head ดังนี้

$$h_m = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียย่อย สมการนี้แสดงการสูญเสียย่อยของอุปกรณ์ใด ๆ ดังนั้น เมื่อรวมทั้งการสูญเสียหลักและการสูญเสียย่อย การสูญเสียรวมจึงเป็นดังนี้

$$h_f = h_M + h_m = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) + K \left(\frac{v^2}{2g} \right) = f \left(\frac{L}{D} + K \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.21)$$

จะเห็นได้ว่าการสูญเสียรวมเป็นผลเนื่องจากขนาด ความยาวของท่อ ความเร็วของการไหลเมื่อความยาวท่อ ความเร็วการไหลมาก และขนาดท่อน้อย จะส่งผลให้การสูญเสียรวมมาก ซึ่งทำให้ความดันตกคร่อมของการไหลภายในท่อมักตามไปด้วย (ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552)

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม

ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method) เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลหรือวิธีซีเอฟ พื้นฐานของซีเอฟคือ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม หากมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบด้วยจะมีการแก้สมการอนุรักษ์พลังงานเพิ่มเติมเข้ามานอกจากนี้หากการไหลเข้าสู่ในย่านการไหลแบบปั่นป่วน ก็จะมีการนำแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเข้ามาแก้เพิ่มเติมอีกด้วย (กิริติ สุตลักษณ์, 2553)

ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม เป็นกระบวนการแปลงสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตใช้หลักการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยที่เรียกว่าเซลล์ (Cell) จากนั้นอินทิเกรตสมการควบคุมบนปริมาตรควบคุม แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่าง และคำนวณหาผลเฉลยที่จุดต่อต่าง ๆ การอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมเป็นหลักการของวิธีนี้จะทำให้ได้ความสัมพัทธ์ของสมการพีชคณิตในรูปแบบความอนุรักษ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม หรือฟลักซ์เป็นอย่างดี ข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ ใช้ได้ผลดีกับการไหลทุกรูปแบบ โดยเฉพาะการไหลแบบปั่นป่วนที่มีรูปสมการซับซ้อน จึงถูกนำไปพัฒนาซอฟต์แวร์ซีเอฟตีทั่วไป (ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์, 2555)

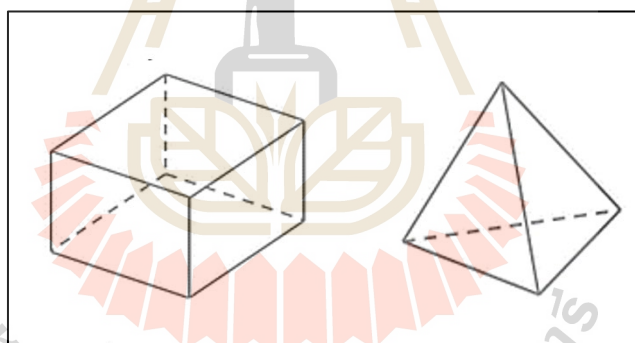
อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาการไหลด้วยซีเอฟตินั้นจะประสบความสำเร็จเพียงใดนั้นพิจารณาจากหลักการ 3 ประการคือ (1) การลู่เข้า (Convergence) เป็นคุณสมบัติสำคัญในการหาผลเฉลยเชิงตัวเลข การลู่เข้าสู่ค่าตอบหมายความว่าผลเฉลยนั้นลู่เข้าและให้ค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ (2) ความสอดคล้อง (Consistency) สมการที่สังเคราะห์ได้จากแบบแผนวิธีเชิงตัวเลขจะต้องสมมูลกับสมการหลักเดิม และ (3) เสถียรภาพ (Stability) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดลงของ

ค่าคลาดเคลื่อนของผลเฉลยระหว่างการคำนวณ การคำนวณที่ไม่มีเสถียรภาพส่งผลให้ผลเฉลยแกว่งไปมา ซึ่งอาจนำไปสู่การไม่ได้คำตอบได้

2.4.1 เซลล์ (Cell)

เซลล์หรือปริมาตรควบคุมเป็นระบบการสร้างเมชสำหรับวิธีไฟไนต์ลุ่ม โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบ คือ แบบมีโครงสร้าง (Structured Cell) และแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Cell) เมื่อนำเซลล์มาต่อกันเป็นโครงสร้างตาข่ายเรียกว่าเมช (Mesh) ความแม่นยำของผลเฉลยที่แก้ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่ใช้ โดยทั่วไปการใช้จำนวนเซลล์มากย่อมได้ความถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนเซลล์น้อย แต่จำนวนเซลล์ที่มากย่อมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

เซลล์ที่ใช้ในการจำลองการไหลมีด้วยกันหลายรูปทรง สำหรับปัญหาสามมิติ เซลล์รูปทรง Hexahedron ให้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำและใช้เวลาในการลู่เข้าของผลเฉลยที่รวดเร็วกว่า เซลล์รูปทรงอื่นแต่มีข้อจำกัดในการปรับเข้ากับรูปทรงที่มีความซับซ้อน ส่วนเซลล์รูปทรง Tetrahedron สามารถปรับเข้ากับรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าแต่ให้ผลเฉลยที่แม่นยำน้อยกว่า และใช้เวลาในการลู่เข้าของผลเฉลยที่นานกว่า โดยเซลล์ทั้งสองแบบมีรูปทรง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบเซลล์ (ซ้าย) Hexahedron และ (ขวา) Tetrahedron

2.4.2 เงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหลนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการจำลองปัญหาการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปนอกจากต้องเข้าใจในลักษณะทางกายภาพของพฤติกรรมกรการไหลนั้นแล้ว ต้องเข้าใจและทราบถึงข้อจำกัดของโปรแกรม มีชนิดของเงื่อนไขขอบเขตทั้งสิ้น 6 ประเภท ซึ่งต้องเลือกใช้ตามความเหมาะสม ดังนี้

1) Inlet เป็นการกำหนดทิศทางการไหลเป็นการไหลเข้าเท่านั้น เงื่อนไขการไหลเข้ามีอยู่หลายประเภทในทางวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขการไหลเข้าแบบอัตราการไหลโดยมวล

- 2) Outlet เป็นการกำหนดทิศทางกรไหลเป็นการไหลออกเท่านั้น
- 3) Wall เป็นการกำหนดให้ด้านต่าง ๆ เป็นผนังซึ่งหมายความว่า จะไม่มีของไหลไหลผ่านเข้าหรือออกพื้นผิวนี้ได้
- 4) Symmetry Plane ของไหลไม่สามารถไหลเข้าหรือออกทะลุผ่านพื้นผิวนี้ได้ พื้นผิวสมมาตรจะทำหน้าที่เสมือนกระจกสะท้อนค่าที่ได้จากการคำนวณ พฤติกรรมการไหลหรือสมบัติต่าง ๆ ของการไหลภายในโดเมนที่อยู่เป็นระยะห่างเท่ากันเมื่อวัดจากพื้นผิวสมมาตรออกไปจะมีค่าเท่ากันเสมอ เงื่อนไขประเภทนี้ใช้กับปัญหาที่มีลักษณะสมมาตร (กรีติ สุลักษณ์, 2553)

2.5 การสร้างสหสัมพันธ์

สหสัมพันธ์เป็นการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป (ฉหทัย ราตรี, 2556) ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อความดันตกคร่อมการไหลของน้ำมันก๊วยผ่านครีบบล็อกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความดันตกคร่อมดังกล่าวจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องอีกด้วย การสร้างสหสัมพันธ์ที่กล่าวมานั้นใช้เทคนิคของการฟิตเส้นแนวโน้ม (Curve Fitting) เข้ากับข้อมูลผลการทดสอบ โดยการเลือกฟังก์ชันเส้นแนวโน้มที่สอดคล้องกับธรรมชาติของชุดข้อมูลและผ่านจุดข้อมูลมากที่สุด ซึ่งจะทำได้สมการที่มีรูปแบบกระชับง่ายต่อการตีความเส้นแนวโน้มที่สร้างขึ้นจะเป็นตัวแทนของข้อมูลหรือทำนายผลได้ว่าข้อมูลจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด

ในงานวิจัยนี้สร้างสหสัมพันธ์จากการฟิตเส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) โดยมีหลักการดังนี้

2.5.1 กำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (Linear least square)

สมมติให้มีข้อมูลจำนวน n ข้อมูล นั่นคือ (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ จะหาสมการเส้นตรง $P(x) = ax + b$ โดยให้

$$E(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (2.22)$$

เมื่อ $E(a, b)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองรวมน้อยที่สุด
โดยที่ $ax_i + b$ คือ ค่าของ $P(x_i)$ ซึ่งเป็นค่าประมาณของ y_i

เนื่องจาก E เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า a และ b ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุดจึงหาได้จากจุดวิกฤตที่ทำให้ $\frac{\partial E}{\partial a} = 0$ และ $\frac{\partial E}{\partial b} = 0$

จึงได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \right] = \sum_{i=1}^n 2(y_i - (ax_i + b))(-x_i) = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \right] = \sum_{i=1}^n 2(y_i - (ax_i + b))(-1) = 0 \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 มีตัวแปรไม่ทราบค่าคือ a และ b หากจัดรูปใหม่และแก้สมการจะหาค่า a และ b ได้จาก

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.25)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.26)$$

เมื่อทราบค่า a และ b จะสามารถหาสมการเส้นตรงที่เป็นตัวแทนของข้อมูลได้โดยแทนค่าในสมการ $P(x) = ax + b$

2.5.2 กำลังสองน้อยที่สุดพหุนาม (polynomial least square)

ในกรณีทั่วไปถ้าต้องการประมาณข้อมูลจำนวน n ข้อมูล นั่นคือ (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ด้วยพหุนามกำลัง k โดยที่ $k < n-1$ จะได้รูปแบบสมการ $P_k(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k$ โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุดเป็นดังนี้

$$E(a_0, a_1, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^n (y_i - (P_k(x_k)))^2 \quad (2.27)$$

โดยที่ $P_k(x_k)$ คือ ค่าของ $P(x_i)$ ซึ่งเป็นค่าประมาณของ y_i

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุดจะหาได้จากจุดวิกฤตที่ทำให้ $\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0$ สำหรับ $i = 0, 1, 2, \dots, k$ จะได้ระบบสมการเชิงเส้นที่มี $k+1$ สมการและมีตัวทั้งหมดเท่ากับ $k+1$

$$\begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^n x_i^0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^1 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k &= \sum_{i=1}^n y_i x_i^0 \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^1 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} &= \sum_{i=1}^n y_i x_i^1 \\ &\vdots \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^{k+2} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} &= \sum_{i=1}^n y_i x_i^k \end{aligned} \quad (2.28)$$

ระบบสมการเชิงเส้นนี้จะมีผลเฉลยเพียงชุดเดียวเมื่อ x_i แต่ละ i มีค่าที่แตกต่างกัน

2.5.3 กำลังสองน้อยที่สุดแปลงรูป (Transform least square)

ในบางกรณีความสัมพันธ์ของข้อมูลอาจไม่สามารถใช้สมการเชิงเส้นหรือพหุนามได้จึงต้องใช้สมการฟังก์ชันอื่น ในการฟิตข้อมูล เช่น ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล หรือ ฟังก์ชันเลขยกกำลัง

- 1) สมการฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล

$$y = ae^{kx} \quad (2.29)$$

เมื่อใส่ฟังก์ชันลอการิทึมเข้ากับสมการจะได้

$$\ln y = \ln(ae^{kx}) \quad (2.30)$$

จากนั้นใช้สมบัติของฟังก์ชันลอการิทึมจะสามารถจัดสมการใหม่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln y = kx + \ln a \quad (2.31)$$

จากขั้นตอนดังกล่าวจะได้สมการเชิงเส้นของ x และ $\ln y$ ที่สามารถประยุกต์ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดสำหรับสมการเชิงเส้นในหัวข้อที่ 2.5.1 ได้

2) สมการฟังก์ชันเลขยกกำลัง

$$y = ax^m \quad (2.32)$$

เมื่อใส่ฟังก์ชันลอการิทึมเข้ากับสมการจะได้

$$\ln y = \ln(ax^m) \quad (2.33)$$

จากนั้นใช้สมบัติของฟังก์ชันลอการิทึมจะสามารถจัดสมการใหม่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln y = m \ln x + \ln a \quad (2.34)$$

จากขั้นตอนดังกล่าวจะได้สมการเชิงเส้นของ $\ln x$ และ $\ln y$ ที่สามารถประยุกต์ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดสำหรับสมการเชิงเส้นในหัวข้อที่ 2.5.1 ได้

จากระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดทั้ง 3 วิธีที่กล่าวมานั้นสามารถใช้สร้างเส้นแนวโน้มแทนชุดข้อมูลที่มีอยู่ได้ โดยการจะเลือกใช้วิธีใดนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบและธรรมชาติของชุดข้อมูลที่มี

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดครีบแลกเปลี่ยนความร้อนต่อความดันตกคร่อมของการไหล

รูปร่างลักษณะและขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความดันคร่อมในครีบแลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อรูปร่างและขนาดของครีบเปลี่ยนแปลงทำให้ความดันตกคร่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ณรงค์ ทิพย์มงคล (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของตัวครีบ โดยแบ่งครีบออกเป็น 3 ลักษณะคือ Inline Continuous Plate Fin, Inline Plate Fin และ Louver Plate Fin โดยผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าค่าความดันคร่อมที่เกิดขึ้นในกรณี Inline Continuous Plate Fin มีค่าน้อยกว่ากรณี Inline Plate Fin และ Louver Plate Fin ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากรูปร่างของครีบที่แตกต่างกัน ทำให้มีพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน

กิตติราช สัจวิริยทรัพย์ (2011) ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติของการถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นออริฟิตทำมุม กำหนดให้ผิวท่อมี่ลักษณะแบบอูณหภูมิที่ผิวคงที่ โดยได้มีการติดตั้งแผ่นออริฟิตให้มีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่ 30 องศา โดยมีค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 0.5-0.8 และอัตราส่วนของระยะห่าง ระหว่างแผ่นออริฟิตต่อความสูงของท่อเท่ากับ 1.5 พบว่าการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นออริฟิตเมื่อเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ มีการสูญเสียความดันโดยแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทานพบว่าท่อ สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นออริฟิตที่ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.5 มีค่ามากที่สุด

สาริต ทูลไชสง (2011) ทำการศึกษาประสิทธิภาพผลคุณลักษณะทางความร้อนและการสูญเสียความดันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดไหลสวนทางกันที่มีความยาว 1.2 เมตร โดยกำหนดอัตราส่วนของท่อชั้นในต่อท่อชั้นนอกที่แตกต่างกันจำนวน 6 ค่า และที่อัตราการไหลและอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ค่าประสิทธิภาพและค่าจำนวนหน่วยการถ่ายเทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนขนาดของท่อเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลงสวนทางกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนขนาดของท่อ สำหรับการสูญเสียความดันของน้ำร้อนและน้ำเย็นพบว่าเมื่ออัตราส่วนขนาดของท่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดของน้ำเย็นมีค่าลดลงอย่างชัดเจนส่วนความดันลดของน้ำร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

Carlos A. Rubio-Jimenez (2012) ใช้ระบบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานและออกแบบของครีบระบายความร้อนแบบกลมและแบบแผ่นเรียบเปรียบเทียบกัน 2 แบบ พบว่า ความดันคร่อมของครีบระบายความร้อนแบบกลมมีค่าประมาณ 4.6 kPa และแบบแผ่นเรียบมีค่าประมาณ 5.7 kPa แสดงให้เห็นว่าความดันตกคร่อมของการไหลจากลักษณะของครีบระบายความร้อนแบบกลมให้ค่าที่น้อยกว่าแบบแผ่นเรียบถึง 1.1 kPa

ทแก้ว เข็มสวัสดิ์ (2015) ได้ทำการวิจัยการศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะบนอุปกรณ์ ระบายความร้อนที่ใช้ครีบแท่งขนาดเล็กกรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

และทรงกระบอก ขนาดของครีบนั่นได้ควบคุมให้ค่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของครีบ, ความสูง และระยะห่างหรือช่องทางการไหลระหว่างครีบให้มีขนาดที่เท่ากัน ใช้สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน พบว่าความดันตกคร่อมของการไหลของอุปกรณ์ระบายความร้อนครีบบนแบบเหลี่ยมมีค่าที่สูงกว่าครีบบนแบบกลม

วีรพันธ์ คิวทองสุข (2016) ทำการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อน และความดันตกจากการไหล 2 สถานะ ของสารทำความเย็น R-134a ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็ก แบบซิกแซก ขนานกัน และแบบลูกคลื่นขนานกัน โดยอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ใช้ในการศึกษาทั้งสองแบบทำมาจากทองแดง มีขนาด $40 \times 40 \times 20$ mm (กว้าง×ยาว×หนา) และลูกคลื่นแบบให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน คือ สำหรับช่องทางการไหลแบบซิกแซกขนานกันมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 966 mm^2 ส่วนช่องทางการไหลแบบลูกคลื่นขนานกันมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 952 mm^2 ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของอุปกรณ์ระบายความร้อนทั้ง 2 แบบเท่ากับ 0.88 และ 0.8 mm ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ความดันตกคร่อมของการไหลของของไหลที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็ก แบบซิกแซกขนานกันจะต่ำกว่าแบบลูกคลื่นขนานกัน

จิตรกร กนกนัยการ (2557) ศึกษาความดันตกคร่อมของการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องขนานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สอดคล้องแผ่นกันเอียงโดยจัดวางไขว้กัน ที่ผนังช่องขนานด้วยตรงข้ามกัน 2 ด้าน โดยทำการศึกษากการไหลของของไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 4,000 ถึง 40,000 โดยติดตั้งแผ่นกันทำมุม 45 องศา มีระยะห่างระหว่างแผ่นกันเท่ากับ ความสูงของช่องขนาน ที่ผนังด้านบนและล่างตลอดความยาวของชุดทดลอง ทำการทดสอบโดยพิจารณาผลของตัวแปรด้านสัดส่วนความสูงของแผ่นกันต่อความสูงช่องขนานที่ 0.1, 0.15, 0.3, และ 0.3 ผลการทดลองพบว่า การสอดคล้องแผ่นกันเอียงที่จัดวางไขว้กันที่มีสัดส่วนความสูงของแผ่นกันต่อความสูงช่องขนาน 0.3 มีตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าสัดส่วนอื่น ๆ

เก่งกล้า กุณธิ์ (2017) ทำการศึกษาตัวประกอบเสียดทานจากการไหลในผิวข้อปล้องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 18 mm ความสูงข้อปล้อง 1 mm อัตราส่วนของระยะพิทซ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่างกัน 3 แบบ เท่ากับ 1.0, 1.5, และ 2.0 ตามลำดับทดสอบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยให้อากาศเป็นของไหลที่เลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง 20,000 ถึง 34,000 จากการทดลองพบว่า ตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะพิทซ์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยท่อผิวปล้องที่มีระยะพิทซ์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 mm มีตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อผิวเรียบ 2.9 เท่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การสูญเสียภายในท่อในรูปของความดันตกคร่อมหรือตัวประกอบเสียดทานของการไหลจะมีค่าต่ำเมื่อของไหลสามารถไหลได้สะดวกเช่น มีขนาดของช่องทางการไหล หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกที่มากขึ้น นอกจากขนาดแล้วรูปร่างของช่องทางการไหลหรือรูปทรงครีบกี้ส่งผลต่อความดันตกคร่อมด้วยเช่นเดียวกับโดยรูปร่างของช่องทางการไหลครีบกี้ที่มีลักษณะกลมหรือจะเกิดการสูญเสียของการไหลที่น้อยกว่าแบบเหลี่ยม เนื่องจากการไหลสะดวกทำให้เกิดความสูญเสียของความดันตกคร่อมจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย

2.6.2 ผลกระทบของการขวางการไหลต่อความดันตกคร่อมของการไหล

อีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความดันคร่อมในครีบระบายความร้อนหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนหรือระบายความร้อนคือการขวางการไหลเนื่องจากการขวางการไหลทำให้เกิดการสูญเสียย่อย ซึ่งเมื่อยังมีการขวางการไหลมากส่งผลให้ความดันตกคร่อมสูงมากขึ้นตามไปด้วย

ธนาพล สุขชนะ (2011) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก ความดันลดในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ที่มีลวดภายใน เพื่อเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากความดันลดภายในท่อ โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่เป็นอุปกรณ์ในการทดลอง ติดตั้งแปรงลวดภายในท่อน้ำร้อนซึ่งมีปริมาณของเส้นลวด 3 ระดับ ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำร้อนระหว่าง 14,000-40,000 และใช้น้ำเย็นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ ผลการทดลองพบว่าพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความดันลดภายในท่อที่มีขดลวดทองแดงสูงถึง 12-49 เท่าของท่อเปล่า

วิญญ์ อ่ำไพจิตร (2551) ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบวมเหลี่ยมและปีก โดยทำการทดลองที่ความเร็วอากาศต่าง ๆ กัน ที่เลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 25,000 เปรียบเทียบผลของกรณีท่อสี่เหลี่ยมผนังเรียบ ท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบวมเหลี่ยมและล่าง และท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบวมเหลี่ยมและล่างและติดตั้งปีกที่ทางเข้า พบว่าที่มีครีบบวมเหลี่ยมและล่างและติดตั้งปีกที่ทางเข้าให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อที่มีผนังเรียบและท่อที่มีการติดครีบบวมเหลี่ยมเพียงอย่างเดียว

ภูมิ จาตุนิตานนท์ (2552) ศึกษาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง โดยมีการเพิ่มร่องเกลียวให้กับท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มร่องเกลียวให้กับท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ความเสียดทานของการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่า นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ (ระหว่าง 10,000 ถึง 40,000) จะส่งผลให้ความเสียดทานลดลงอีกด้วย

จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าครีบลแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะการขวางการไหลที่มากจะส่งผลให้ความสูญเสียของการไหลในรูปของตัวประกอบเสียดทานหรือความดันตกคร่อมของการไหลมีค่ามากตามไปด้วย

2.6.3 สหสัมพันธ์ในการใช้งานทางด้านวิศวกรรม

อนุชา กล้าน้อย (2559) ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้การถอดอยแบบเส้นตรงเชิงพหุสำหรับทำนายปริมาณ NO_x จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สของหัวพันไฟวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น โดยศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และค่าความพูนในการวิเคราะห์เชิงสถิติของวิธีการถอดอยแบบเส้นตรงเชิงพหุที่ความสูงของชั้นวัสดุพูน อัตราเร็วเชิงปริมาตร และอัตราส่วนสมมูลต่าง ๆ พบว่า ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อปริมาณ NO_x ของหัวพันไฟวัสดุพูน โดยนำเสนอความสัมพันธ์ที่ทำนายปริมาณ NO_x ได้อย่างน่าเชื่อถือ คือ $\text{NO}_x = -2.099H + 33.443\phi - 8.048V_{\text{mix}} + 1.055(HV_{\text{mix}}) + 11.839(\phi V_{\text{mix}}) - 1.492(H\phi V_{\text{mix}})$ ที่ R^2 จะมีค่าเท่ากับ 0.792

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ (2561) ได้ศึกษาอิทธิพลของการใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมภายใต้สภาวะพลศาสตร์ความร้อนที่มีผิวคงที่ ต่อการต้านทานการไหลโดยทำการทดลองที่มุมปะทะแผ่นปีกสามเหลี่ยม 45 องศา ภายในท่อที่มีสัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เท่ากับ 0.1, 0.15, และ 0.2 และสัดส่วนระยะพิทช์ปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1, 2, และ 3 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบโดยเลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง 4,200 ถึง 25,800 ผลการทดลองพบว่า การใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 31.62 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยที่เมื่อสัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่สัดส่วนระยะพิทช์ปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง และสหสัมพันธ์สำหรับทำนายผลการทดลอง คือ $f = 3.575\text{Re}^{-0.059} (b/d)^{0.433} (P/D+1)^{-0.336}$

บทที่ 3

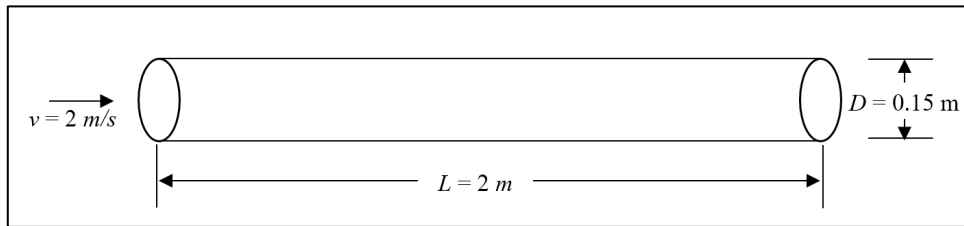
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้นำเสนอสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะพิทซ์ ความสูง และมุมเอียงของครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน การคำนวณใช้ซอฟต์แวร์ซีเอฟดีทำนายความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ที่ไหลผ่านครีบลแลกเปลี่ยนความร้อน มีการดำเนินการมี 3 ขั้นตอน (1) การตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 18.0 ในการจำลองความดันตกคร่อมของการไหลปัญหาทดสอบมาตรฐาน (2) การประยุกต์ซอฟต์แวร์ทำนายความดันตกคร่อมจากการไหลของน้ำมันเกียร์ ผ่านครีบลแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้การแปรค่าปัจจัยกระทบตามเงื่อนไขที่กำหนด และ (3) การสร้างสหสัมพันธ์โดยนำข้อมูลผลการจำลองคอมพิวเตอร์ที่ได้จากหัวข้อที่ (2) มาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรกับความดันตกคร่อม

3.2 การตรวจสอบการใช้งานซอฟต์แวร์

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความดันตกคร่อมโดยใช้การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าวิธีการที่ใช้ในการกำหนดค่าต่าง ๆ มีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำซอฟต์แวร์ไปประยุกต์เข้ากับปัญหามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความดันตกคร่อม ในปัญหาการไหลทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับความดันตกคร่อมที่มีการยอมรับและประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางคือ ความดันตกคร่อมของการไหลในท่อในรูปความสัมพันธ์ของมูดี้ (Moody Chart) ดังนั้นจึงเปรียบเทียบผลการจำลองจากซอฟต์แวร์กับผลจากการคำนวณจากแผนภูมิมูดี้ โดยได้กำหนดปัญหาที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.15 m ความยาวท่อ 2 m ท่อแป๊ปประปา (Galvanized Steel) ความขรุขระผิวท่อ 0.15 mm และน้ำที่มีความเร็วการไหล 2 m/s ความหนาแน่น 998.2 kg/m³ ความหนืด 0.001003 kg/m-s ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปท่อกลมสำหรับการตรวจสอบการใช้งานซอฟต์แวร์

จากสมการที่ 2.1 หาค่าเลขเรย์โนลด์ส์ได้

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{998.2 \times 2 \times 0.15}{0.001003} = 3 \times 10^5$$

จากเลขเรย์โนลด์ส์ทำให้ทราบได้ว่าการไหลอยู่ในช่วงปั่นป่วน ส่วนค่าความขรุขระสัมพัทธ์หาได้จาก

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.15 \times 10^{-3}}{0.15} = 0.001$$

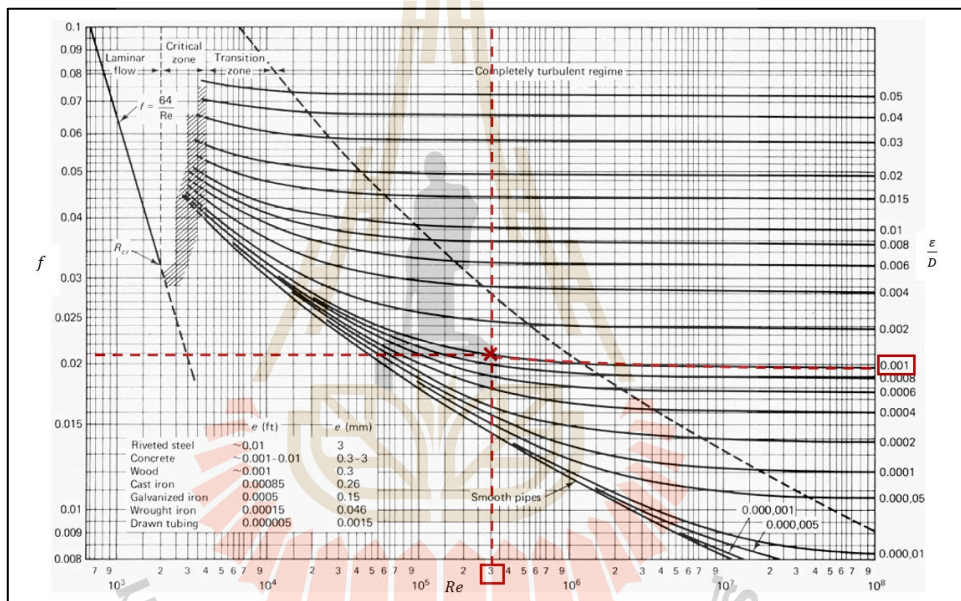
จากค่าความขรุขระสัมพัทธ์กับเลขเรย์โนลด์ส์อ่านค่าสัมประสิทธิ์ความความเสียดทาน (f) จากแผนภูมิมิติ ได้ประมาณ 0.021 ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถคำนวณการสูญเสียเฮดได้จากสมการที่ 2.19

$$h_M = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 0.021 \times \left(\frac{2}{0.15} \right) \times \left(\frac{2^2}{2 \times 9.81} \right) = 0.0571$$

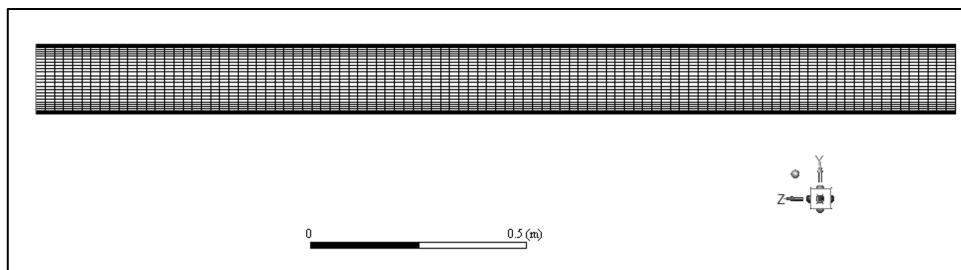
เนื่องจากท่อเป็นท่อตรงไม่มีข้องอ โค้ง หรือผ่านอุปกรณ์ใด ๆ จึงไม่มีความสูญเสียย่อย จึงหาความดันตกคร่อมได้จากสมการที่ 2.21

$$\Delta P = \rho g h_M = 998.2 \times 9.81 \times 0.0571 = 558.99 \text{ Pa}$$

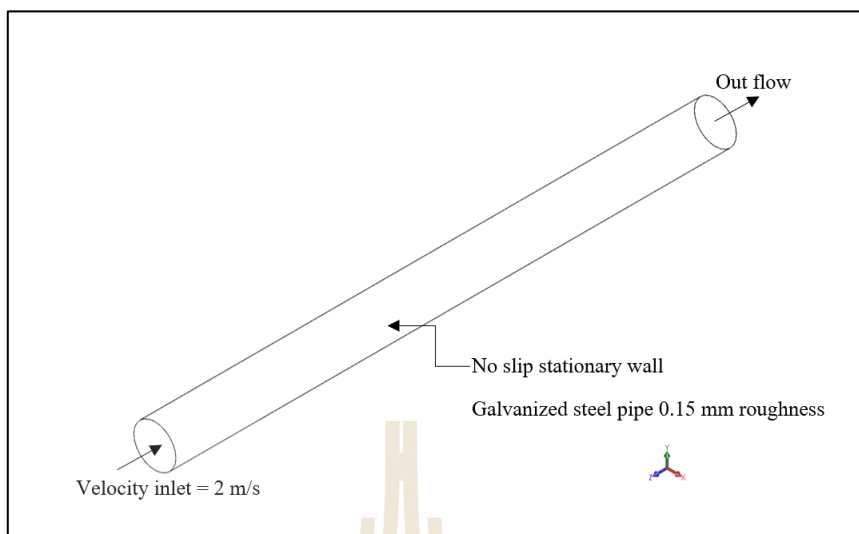
การจำลองจากซอฟต์แวร์ด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\epsilon$ ใช้กริดแบบ Hexahedron จำนวน 202,500 เซลล์ ดังรูปที่ 3.3 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีการตั้งค่าการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ดังตารางที่ 3.1 ความดันตกคร่อมจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 596.83 Pa การกระจายตัวของความดัน โดยความดันสูงที่บริเวณทางเข้า และลดลงเรื่อย ๆ ตามความยาวท่อจนมีค่าน้อยสุดที่ทางออกปลายท่อ ดังรูปที่ 3.5 และความเร็วที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 2 m/s และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตลอดความยาวของท่อดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาการกระจายความเร็วจะเห็นว่า ความเร็วที่ผนังท่อมีค่าศูนย์ด้วยเงื่อนไข No-slip จากนั้นค่อย ๆ มีค่าสูงขึ้นเมื่อห่างจากผนังท่อจนมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณกลางท่อ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.2 แผนภูมิมูดี



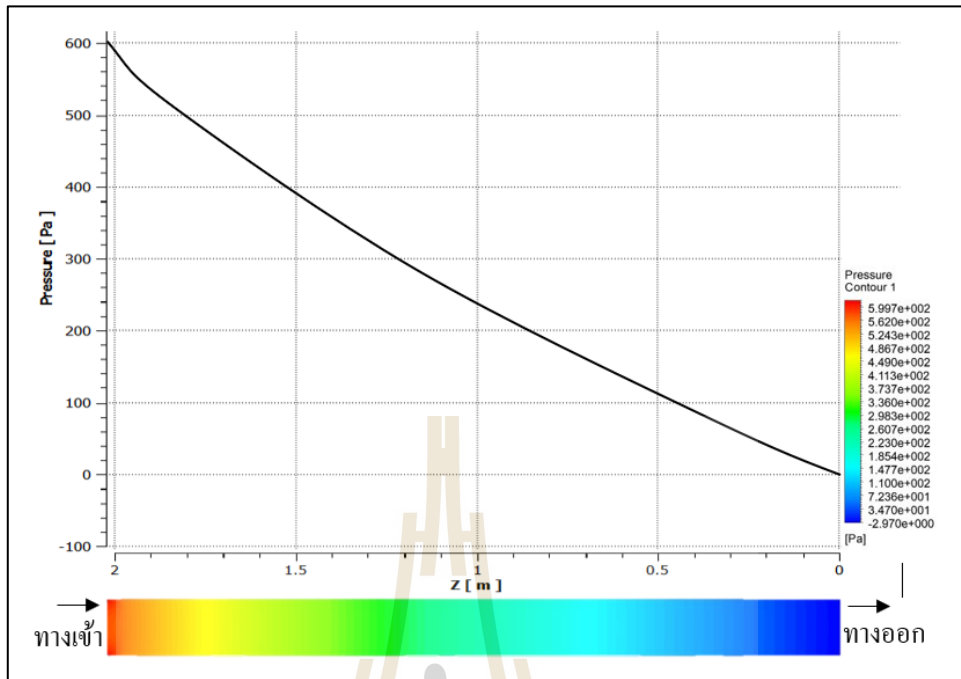
รูปที่ 3.3 กริดของท่อที่ใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์



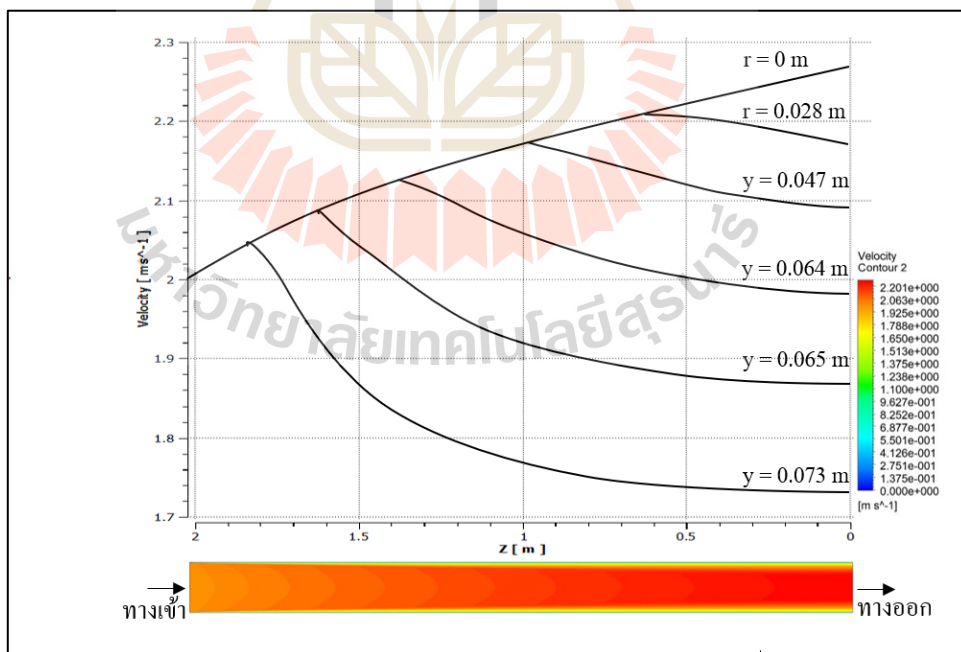
รูปที่ 3.4 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลด้วยซอฟต์แวร์

ตารางที่ 3.1 การตั้งค่าการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$

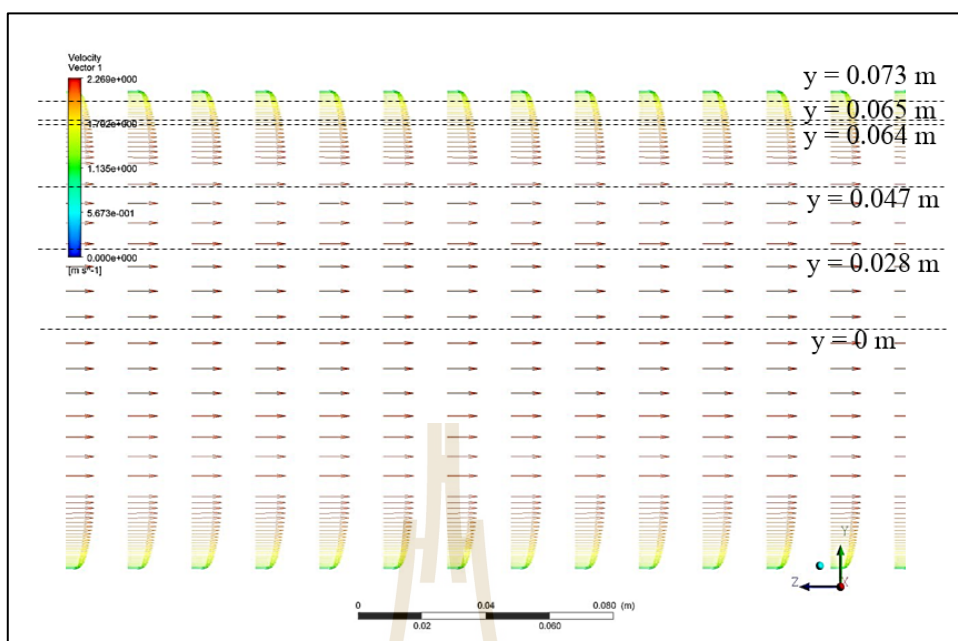
Solver time	Steady
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)
Discretization (Interpolation schemes)	2 nd Order Upwind differencing scheme
Cmu	0.09
C1-Epsilon	1.44
C2-Epsilon	1.92
TKE Prandtl Number	1
TDR Prandtl Number	1.3
Under-Relaxation factors	
Pressure	0.3
Force	1
Momentum	0.7
Turbulent kinetic energy	0.8
Specific dissipation rate	0.8
Turbulent viscosity	1
Residuals	1×10^{-3} for all equations



รูปที่ 3.5 คอนทัวร์ความดันตรงแนวกึ่งกลางท่อ



รูปที่ 3.6 คอนทัวร์ความเร็วตรงแนวกึ่งกลางท่อ



รูปที่ 3.7 เวกเตอร์ความเร็วที่หน้าตัดกลางท่อ

เมื่อนำผลการคำนวณจากแผนภูมิมิติ เปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์พบว่า ความดันตกคร่อมที่ได้มีความแตกต่างกัน 37.84 Pa โดยมีความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$\%Error = \left| \frac{\Delta P_{CAL} - \Delta P_{SIM}}{\Delta P_{CAL}} \right| \times 100 = \left| \frac{558.99 - 596.83}{558.99} \right| \times 100 = 6.77\%$$

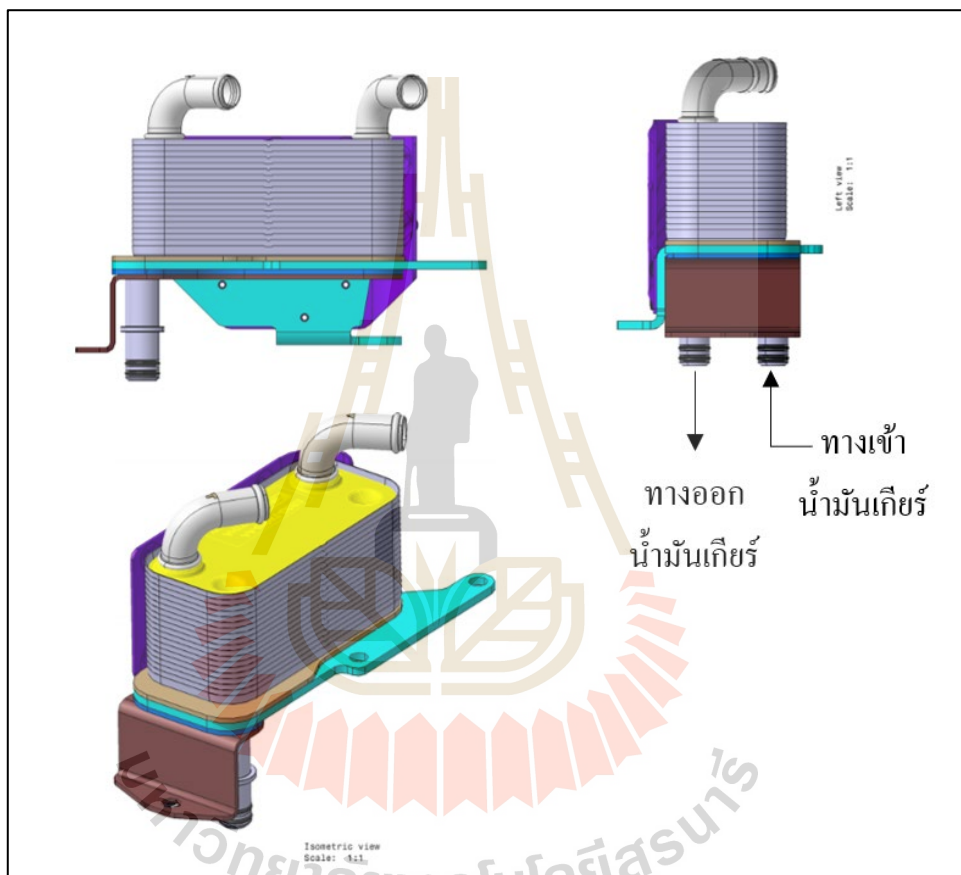
สำหรับกรณีการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีรูปแบบปัญหาเหมือนกับการไหลในท่อ กล่าวคือน้ำมันเกียร์ถูกให้ไหลเข้าไประหว่างช่องครีบที่ขดไปมาเรียงตัวกันอยู่ ดังนั้นการจำลองผลจึงนำเทคนิคและหลักการการกำหนดค่าดังกล่าวใช้ในการจำลองการไหลเพื่อหาความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

3.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับปัญหาที่วิเคราะห์

งานวิจัยนี้มีสนใจศึกษาความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมการไหลของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C อัตราการไหล 5, 10, 15, และ 20 L/min ผ่านครีบที่อยู่ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดทั้งสิ้น 64 รูปแบบ โดยมีข้อมูลทั่วไปของครีบและน้ำมันเกียร์ดังต่อไปนี้

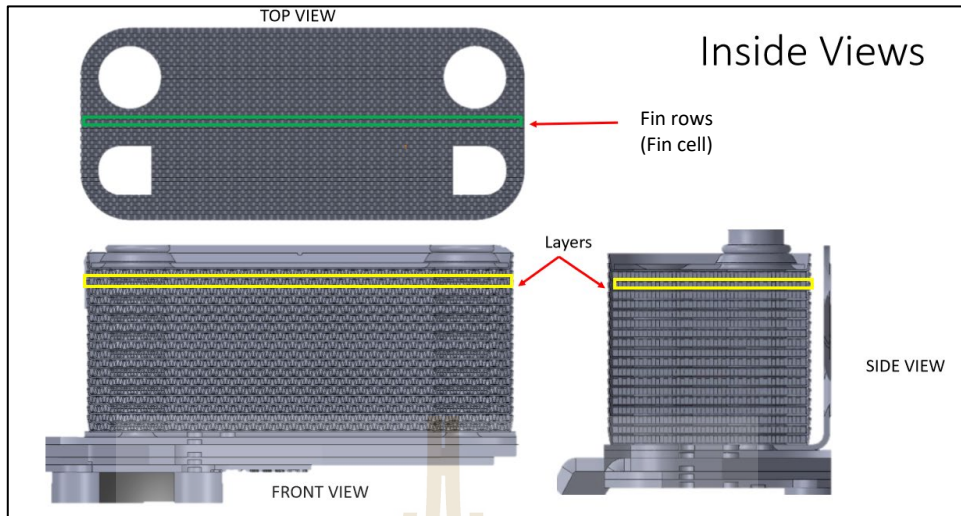
3.3.1 ครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนน้ำมันเกียร์ ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ ใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยให้น้ำมันเกียร์และน้ำยาหล่อเย็นไหลแยกชั้น และสวนทางกัน ผ่านครีบที่ถูกแบ่งเป็นชั้น ๆ อยู่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีทางเข้าและทางออกของน้ำมันเกียร์อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.8



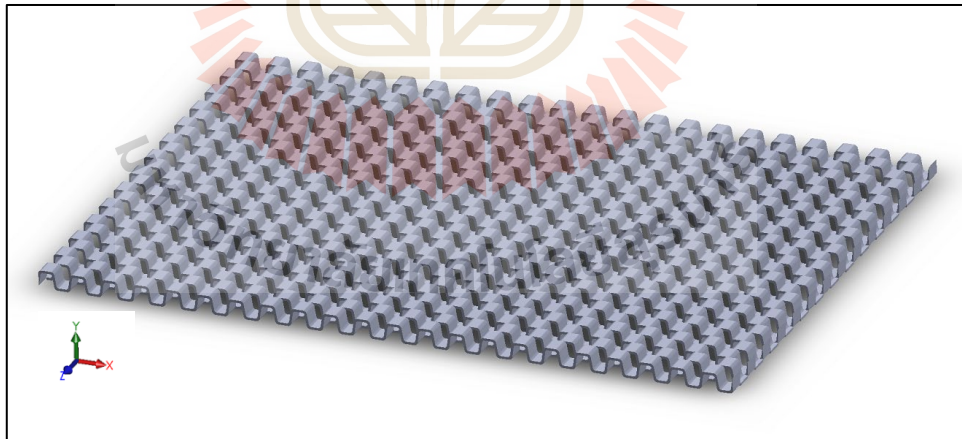
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์

ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีการนำแผ่นครีบมาเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อนำมาซ้อนกันแต่ละแผ่นเรียกว่า ชั้น (Layer) แต่ละชั้นมีแผ่นครีบวางเรียงสลับกันไปมาเรียกว่า เซลล์ (Cell) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจัดเรียงครีบบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์

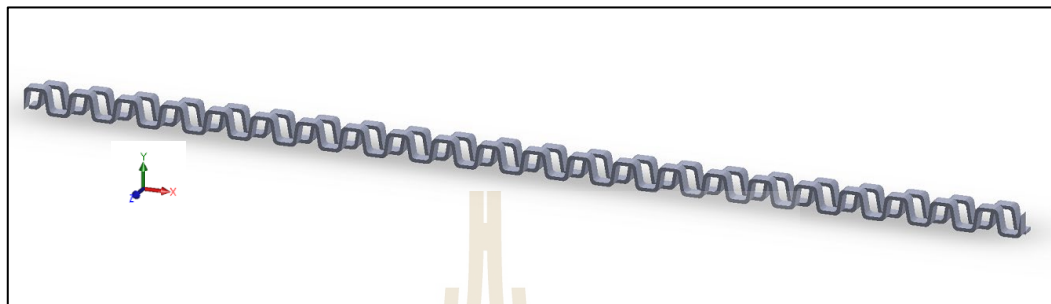
ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีครีบบเรียงตัวอยู่หลายชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีน้ำมันเกียร์หรือน้ำยาหล่อเย็นเพียง 1 ชนิดไหลผ่านครีบบนชั้นสลับกัน โดยมีลักษณะการเรียงตัวของครีบบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์ในแต่ละชั้น

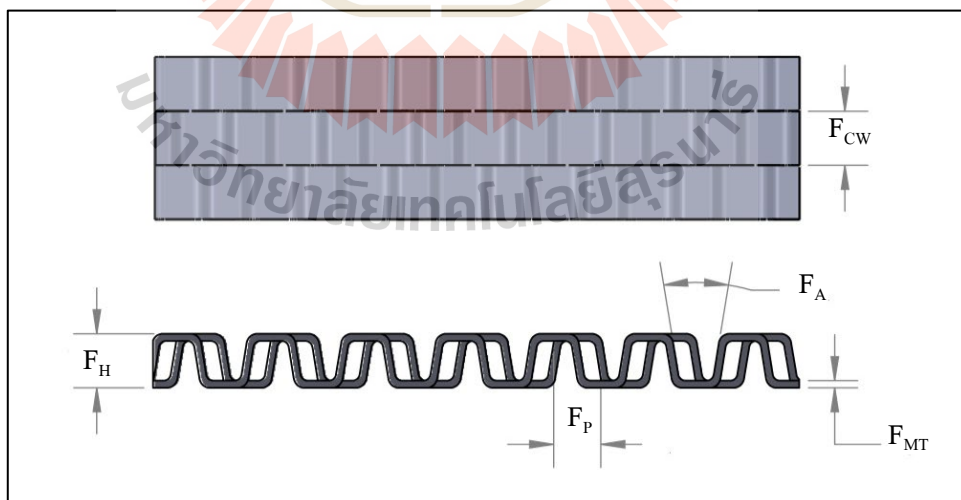
ในแต่ละชั้นมีการเรียงตัวของครีบบสลับไปมา เมื่อพิจารณาช่องทางไหลของน้ำมันเกียร์พบว่าน้ำมันเกียร์จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างครีบบ ซึ่งแต่ละช่องมีลักษณะเหมือนกัน และจัดเรียงตัวขนานกันอยู่ในแต่ละชั้น จากหลักการไหลในท่อขนานพบว่าความดันตกคร่อมของ

การไหลในท่อขนานแต่ละท่อมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ จึงพิจารณาช่องทางการไหลเพียง 1 ช่อง หรือ 1 เซลล์เท่านั้น โดยลักษณะครีบบัดแต่ละเซลล์ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะครีบบัดเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์ในแต่ละเซลล์

ครีบบัดเปลี่ยนความร้อนแต่ละเซลล์มีลักษณะเป็นคลื่นเรียงตัวกันตลอดแนว ความยาวครีบบัด โดยรูปทรงอ้างอิงของครีบบัดเปลี่ยนความร้อนมีระยะพิชต์ครีบบัด (F_p) 2.6 mm ความสูงครีบบัด (F_H) 3.0 mm ความกว้างครีบบัด (F_{CW}) 1.5 mm ความหนาตามวัสดุที่ใช้ทำครีบบัด (F_{MT}) 0.4 mm และมุมเอียงครีบบัด (F_A) 18.6 องศา ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปทรงของครีบบัดเปลี่ยนความร้อน

3.3.2 สมบัติของน้ำมันเกียร์

ของไหลที่ใช้ในการจำลองการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน คือ น้ำมันเกียร์ โดยสมบัติของน้ำมันเกียร์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่าสมบัติแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

T (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m-s)
40	824	0.01659
100	788	0.00355
120	776	0.00254

3.4 การจำลองความดันตกคร่อมผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

การจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C ตามลำดับ โดยความดันตกคร่อมจากการทดลองที่น้ำมันเกียร์อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C อัตราการไหลเท่ากับ 5, 10, 15, และ 20 L/min ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

Q (L/min)	ΔP (kPa)		
	T = 40 °C	T = 100 °C	T = 120 °C
5	7.99	4.20	2.10
10	22.88	14.70	12.34
15	38.04	26.46	24.32
20	59.93	43.61	38.74

ขั้นตอนการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 18.0 เพื่อจำลองการไหลที่นำไปสู่การได้ความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน มีดังนี้

3.4.1 การสร้างโดเมนเพื่อจำลองทางคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมและการเปลี่ยนแปลงขนาดของครีบลอกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของระยะพิทช์ (F_p) ความสูงครีบลอก (F_H) มุมเอียงครีบลอก (F_A) จำนวน 64 กรณี โดยรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

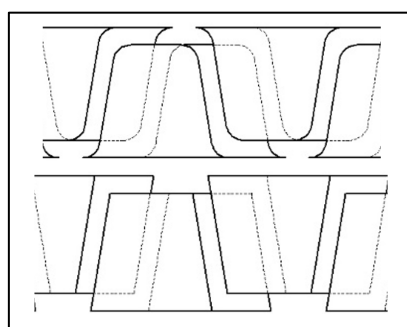
ตารางที่ 3.4 ขนาดของครีบลอกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับกรณีทดสอบต่าง ๆ

กรณีทดสอบ	F_p (mm)	F_H (mm)	F_A (degree)	กรณีทดสอบ	F_p (mm)	F_H (mm)	F_A (degree)
1	1.750	2	10.00	28	3.000	2.00	10.00
2	1.750	2.00	18.59	29	3.000	2.00	18.59
3	1.750	2.00	30.00	30	3.000	2.00	30.00
4	1.750	3.00	45.00	31	3.000	3.00	45.00
5	1.750	3.00	10.00	32	3.000	3.00	10.00
6	1.750	3.00	18.59	33	3.000	3.00	18.59
7	1.750	3.00	30.00	34	3.000	3.00	30.00
8	1.750	4.00	45.00	35	3.000	4.00	45.00
9	1.750	4.00	10.00	36	3.000	4.00	10.00
10	1.750	4.00	18.59	37	3.000	4.00	18.59
11	1.750	4.00	30.00	38	3.000	4.00	30.00
12	1.750	4.00	45.00	39	3.000	4.00	45.00
13	1.750	5.00	10.00	40	3.000	5.00	10.00
14	1.750	5.00	18.59	41	3.000	5.00	18.59
15	1.750	5.00	30.00	42	3.000	5.00	30.00
16	1.750	5.00	45.00	43	3.000	5.00	45.00
17	2.613	2.00	10.00	44	4.000	2.00	10.00
18	2.613	2.00	18.59	45	4.000	2.00	18.59
19	2.613	2.00	30.00	46	4.000	2.00	30.00
20	2.613	2.00	45.00	47	4.000	2.00	45.00
21	2.613	3.00	10.00	48	4.000	3.00	10.00
22	2.613	3.00	18.59	49	4.000	3.00	18.59

ตารางที่ 3.4 ขนาดของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับกรณีทดสอบต่าง ๆ

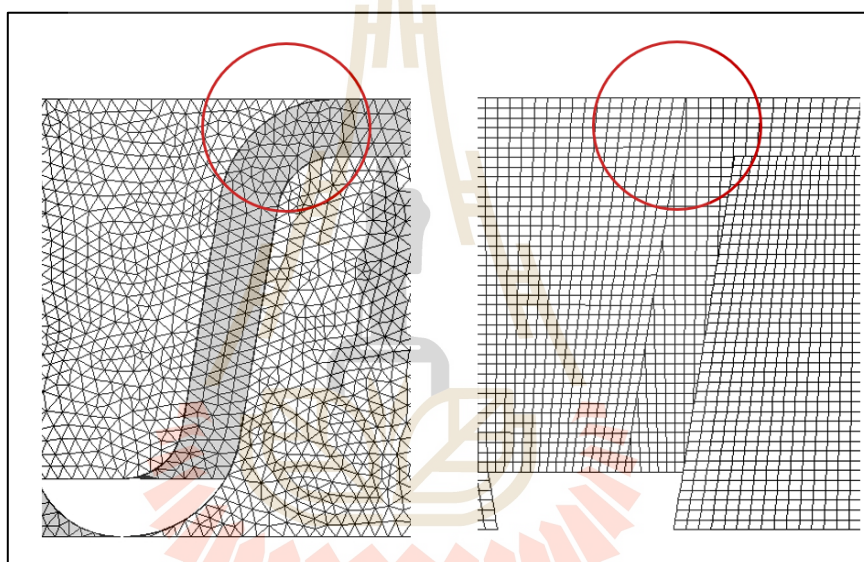
กรณี ทดสอบ	FP (mm)	FH (mm)	FA (degree)	กรณี ทดสอบ	FP (mm)	FH (mm)	FA (degree)
23	2.613	3.00	30.00	50	4.000	3.00	30.00
24	2.613	4.00	45.00	51	4.000	4.00	45.00
25	2.613	4.00	10.00	52	4.000	4.00	10.00
26	2.613	4.00	18.59	53	4.000	4.00	18.59
27	2.613	4.00	30.00	54	4.000	4.00	30.00
55	2.613	4.00	45.00	60	4.000	4.00	45.00
56	2.613	5.00	10.00	61	4.000	5.00	10.00
57	2.613	5.00	18.59	62	4.000	5.00	18.59
58	2.613	5.00	30.00	63	4.000	5.00	30.00
59	2.613	5.00	45.00	64	4.000	5.00	45.00

อย่างไรก็ตามเนื่องจากรูปทรงของงานจริงมีความซับซ้อน เพราะประกอบด้วย มุมแหลม (ดูรูปที่ 3.14 ประกอบ) รูปทรงลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้เกิดปัญหาในการสร้างกริด เมื่อนำไปจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กล่าวคือ ต้องใช้กริดเป็นจำนวนมากเพื่อ-fitเข้ากับบริเวณดังกล่าว ในความเป็นจริงมุมแหลมขนาดเล็กดังกล่าวนี้ส่งผลน้อยมากต่อความดันตกคร่อมของการไหล ที่คำนวณได้ ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของรูปทรงสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ จึงได้ปรับ มุมดังกล่าวออกไปเพื่อให้ได้รูปทรงที่เหมาะสมในการสร้างกริด และการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ลดรายละเอียดและความซับซ้อนของรูปทรง ดังรูปที่ 3.13



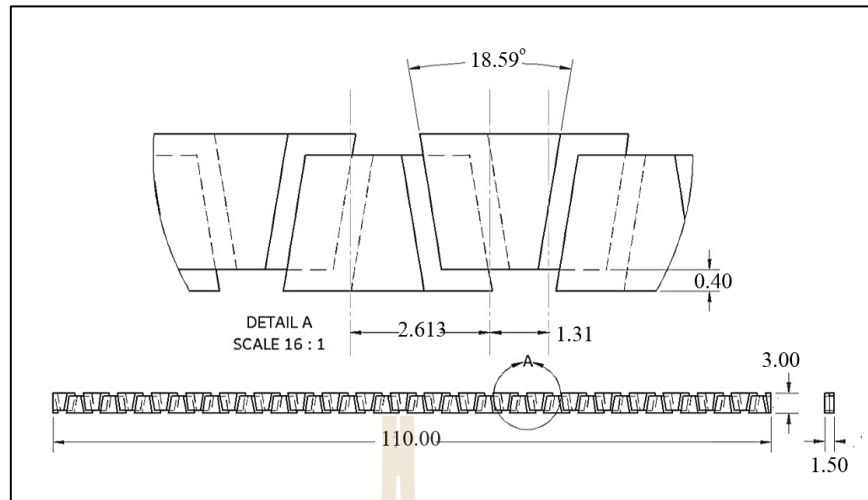
รูปที่ 3.13 รูปทรงโดเมนที่วิเคราะห์ (บน) แบบจริง (ล่าง) แบบจำลองสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

บริเวณที่มีความจำเป็นต้องปรับให้รูปทรงง่ายขึ้นดังเช่นบริเวณส่วนโค้งทั้งด้านบนและด้านล่างของครีป ด้วยเหตุผลที่ว่าบริเวณดังกล่าวก่อให้เกิดมุมแหลมขนาดเล็กซึ่งยากต่อการสร้างกริด หรือใช้กริดจำนวนมาก จากการทดสอบพบว่า หากไม่ปรับให้เป็นรูปทรงที่ง่ายขึ้นจำเป็นต้องใช้กริดถึง 4,585,500 เซลล์ ในการสร้างโดเมนปัญหาดังกล่าวแต่เมื่อปรับให้เป็นแบบเส้นตรงไปตามแนวเส้นขอบเดิมของครีป (ลบซอกแหลมออก) ทำให้ใช้กริดเพียง 677,754 เซลล์ หรือลดลงกว่า 6.8 เท่า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลเฉลยที่จะได้จากการคำนวณ ดังรูปที่ 3.14 นอกจากนี้การลบซอกมุมแหลมดังกล่าวออกไป ช่วยให้การสร้างกริดสามารถใช้รูปแบบ Hexahedron ได้ซึ่งส่งผลดีอย่างมากต่อความเร็ว คุณภาพกริด และเสถียรภาพในการคำนวณ



รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบลักษณะกริดบริเวณมุม (ซ้าย) กริด Tetrahedron (ขวา) Hexahedron

ขนาดของครีปแลกเปลี่ยนความร้อนอ้างอิงถูกนำมาสร้างเป็นแบบเขียนคอมพิวเตอร์ซึ่งแบบเขียนนี้จะใช้เป็นโดเมนสำหรับจำลองการไหล แบบเขียนดังกล่าวถูกสร้างขึ้นโดยพิจารณาช่องว่างระหว่างครีปที่ขุดพบไปมา ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำมันเกียร์ไหลเข้าไปโดยมีครีปเป็นผนัง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โดเมนของน้ำมันเกียร์สำหรับใช้จำลองการไหลผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน (mm)

3.4.2 การกำหนดค่าสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

พฤติกรรมของการไหลใช้การจำลองการไหล 3 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ การจำลองแบบปั่นป่วน โดยใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ และแบบจำลอง SST ผลเฉลยทั้ง 3 รูปแบบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาแบบจำลองที่ให้ผลเฉลยสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดผลการดำเนินการเป็นดังต่อไปนี้

1) การจำลองการไหลแบบราบเรียบ

การจำลองการไหลแบบราบเรียบ ตั้งค่าการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองการไหลราบเรียบ

Solver time	Steady
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)
Discretization (Interpolation schemes)	2 nd Order Upwind differencing scheme
Under-Relaxation factors	
Pressure	1
Force	1
Momentum	0.7
Residuals	1×10^{-3} for all equations

2) การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง $k - \varepsilon$

การจำลองการไหลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ตั้งค่าการคำนวณ
ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$

Solver time	Steady
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)
Discretization (Interpolation schemes)	2 nd Order Upwind differencing scheme
Cmu	0.09
C1-Epsilon	1.44
C2-Epsilon	1.92
TKE Prandtl Number	1
TDR Prandtl Number	1.3
Under-Relaxation factors	
Pressure	0.3
Force	1
Momentum	0.7
Turbulent kinetic energy	0.8
Specific dissipation rate	0.8
Turbulent viscosity	1
Residuals	1×10^{-3} for all equations

3) การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง SST

ในการจำลองการไหลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST ตั้งค่าการคำนวณ
ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST

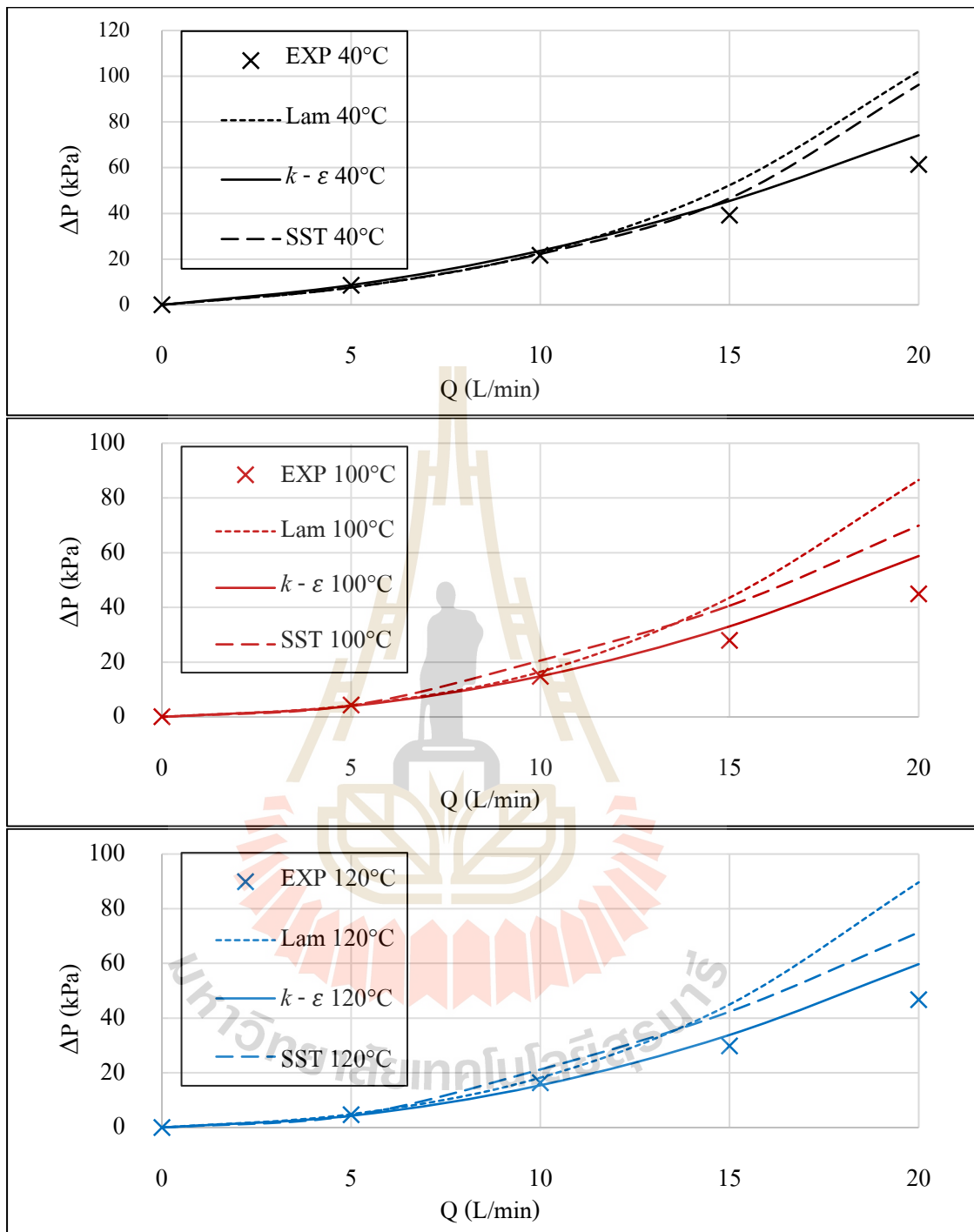
Solver time	Steady
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)
Discretization (Interpolation schemes)	2 nd Order Upwind differencing scheme
Alpha*_inf	1
Alpha_inf	0.52
Beta*_inf	0.09
a1	0.3
Beta_i (inner)	0.075
Beta_i (outer)	0.0828
TKE (inner)Prandtl #	1.176
TKE (outer)Prandtl #	1
SDR (inner)Prandtl #	2
SDR (outer)Prandtl #	1.168
Production Limiter Clip Factor	10
Under-Relaxation factors	
Pressure	0.3
Force	1
Momentum	0.7
Turbulent kinetic energy	0.8
Specific dissipation rate	0.8
Turbulent viscosity	1
Residuals	1×10^{-3} for all equations

ความดันตกคร่อมของการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน อังอิง ที่อุณหภูมิ 100 °C อัตราไหล 5, 10, 15, และ 20 L/min ด้วยการจำลองการไหลทั้งสามรูปแบบคือ การจำลองการไหลแบบราบเรียบ การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง $k - \varepsilon$ และการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง SST มีผลแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลอง และการจำลองการไหล

Q (L/min)	ΔP (kPa)											
	T = 40 °C				T = 100 °C				T = 120 °C			
	EXP	Lam	$k - \varepsilon$	SST	EXP	Lam	$k - \varepsilon$	SST	EXP	Lam	$k - \varepsilon$	SST
5	8.5	7.6	8.6	7.6	4.7	4.9	4.3	4.4	4.3	4.2	4.0	4.2
10	21.6	22.7	23.7	22.3	16.4	18.2	15.4	21.2	14.9	16.5	14.9	20.6
15	39.2	52.3	45.5	46.6	29.8	45.0	33.9	42.4	28.0	43.6	33.1	40.6
20	61.4	102.1	74.2	96.3	46.7	89.7	59.7	71.4	44.9	86.6	58.8	69.9

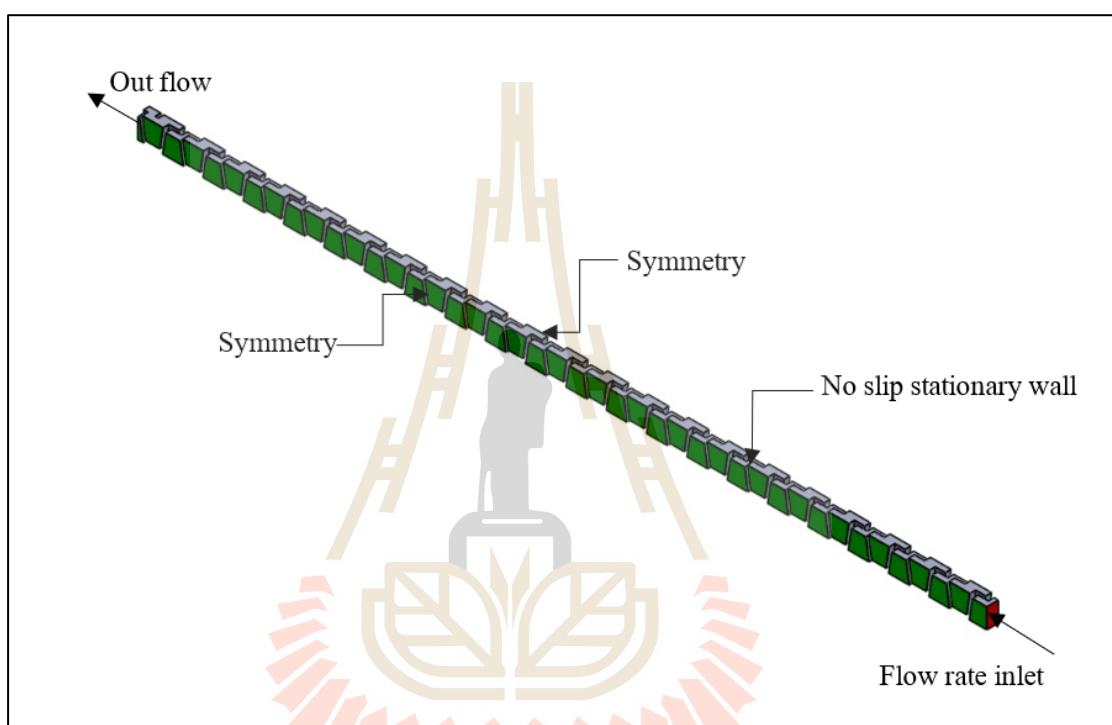
จากข้อมูลตามตารางที่ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราการไหล จากการจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อนด้วยแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST และผลทดสอบ ดังรูปที่ 3.16 พบว่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยเป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งสามแบบจำลองการไหลและผลการทดลอง แต่ผลจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ให้ค่าความดันตกคร่อมสอดคล้องกับการทดลองในช่วงอัตราการไหลต่ำ (ต่ำกว่า 10 L/min) และเริ่มมีค่าสูงกว่าผลการทดลองเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST และแบบจำลองการไหลราบเรียบเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นสูงกว่าผลการทดลองเป็นอย่างมาก ในขณะที่แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ในการจำลองความดันตกคร่อมการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อนในกรณีอื่นต่อไป



รูปที่ 3.16 อัตราการไหลกับความดันตกคร่อมของแบบจำลองการไหลแบบต่าง ๆ และผลการทดลอง (บน) อุณหภูมิ 40 °C (กลาง) 100 °C และ (ล่าง) 120 °C

3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหล ได้พิจารณาให้มีความสอดคล้องกับธรรมชาติของปัญหาที่วิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความสมจริง โดยจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อนในที่นั่งได้จำลองบนค่าอุณหภูมิน้ำมันเกียร์ 40, 100 และ 120 °C เงื่อนไขขอบที่กำหนดในการจำลองผลแสดงในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เงื่อนไขขอบการจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน

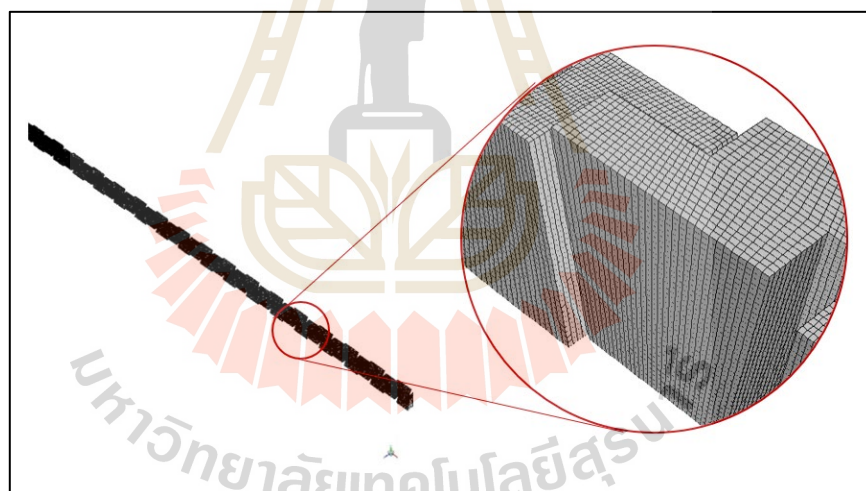
ตารางที่ 3.9 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน

ขอบเขต	เงื่อนไขขอบที่กำหนดในซอฟต์แวร์	ขนาด
ทางเข้า	Flow rate inlet	5, 10, 15, และ 20 L/min
ทางออก	Out flow	-
ด้านข้างซ้าย	Symmetry	-
ด้านข้างขวา	Symmetry	-
ผนังครีบลูก	No slip stationary wall	-

ทางเข้าเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่ในการใช้งานจริงกำหนดเงื่อนไขเป็นในรูปอัตรา
การไหล โดยในที่นี้ได้จำลองบนเงื่อนไขขอบเขตทางเข้าในรูปอัตราการไหล 4 ค่า ได้แก่ 5, 10, 15,
และ 20 L/min ที่ทางออกใช้เงื่อนไข Out Flow สำหรับขอบด้านซ้ายและด้านขวาใช้เงื่อนไข
แบบสมมาตร (Symmetry) เพราะการวางเรียงของชุดครีบมีลักษณะสลับไปมาอย่างสมมาตร ส่วน
รูปทรงครีบใช้เงื่อนไขแบบผนังฝืด (No Slip Stationary Wall)

3.4.4 การสร้างกริดและการทดสอบความเป็นอิสระของกริด

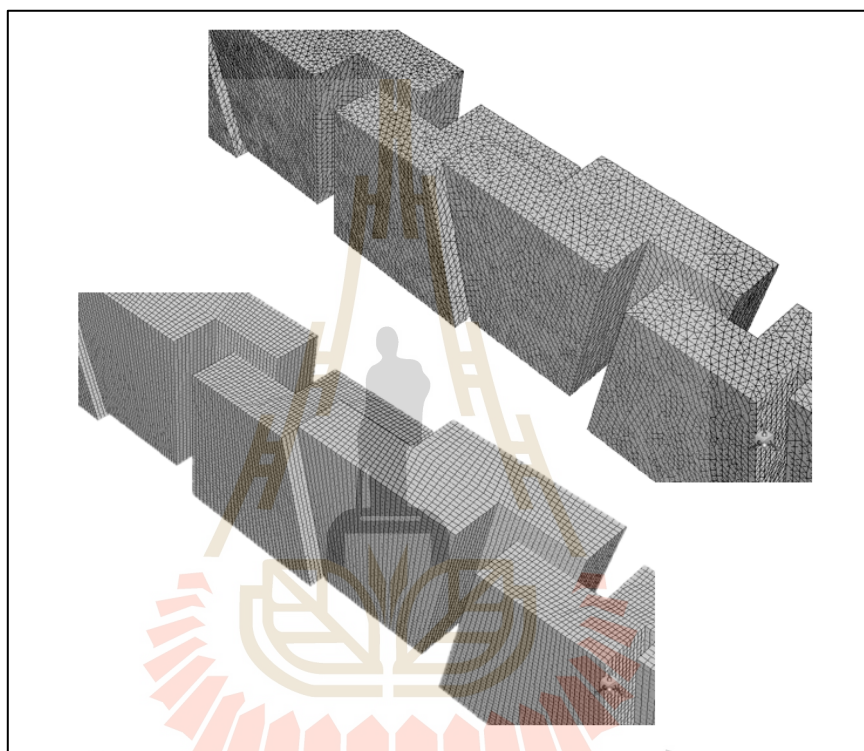
เมื่อได้โดเมนของน้ำมันเกียร์ที่อยู่ภายในครีบแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว
โดเมนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการสร้างกริด กริดที่ใช้เป็นกริดสี่เหลี่ยมหกด้าน ขนาดเซลล์
0.0009 mm เพื่อให้มั่นใจว่ากริดที่ใช้จะให้ผลการจำลองที่แม่นยำเพียงพอจึงทำการทดสอบ
ความเป็นอิสระของกริดที่ใช้ด้วยการปรับขนาดเซลล์ให้ละเอียดขึ้น โดยลำดับ ผลการทดสอบพบว่า
กริดชุดที่มีจำนวน 677,754 เซลล์ โดยมีค่า Element Quality เฉลี่ย 0.964 ค่า Aspect Ratio ในช่วง 1.030
ถึง 5.872 เป็นกริดชุดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กริดสำหรับใช้จำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

กริดเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของผลเฉลยในการจำลองการไหล
แม้ว่ากริดแบบ Tetrahedron จะสามารถสร้างและปรับเข้ากับรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่ายกว่ากริด
แบบ Hexahedron รวมถึงสามารถใช้คำสั่งสร้างกริดอัตโนมัติได้ด้วย แต่จากการทดสอบพบว่า
กริดแบบ Tetrahedron ให้ผลการคำนวณที่ลู่เข้าช้ากว่าแบบ Hexahedron รวมทั้งยังให้ความแม่นยำ
ของคำตอบน้อยกว่าเมื่อเทียบที่การใช้จำนวนกริดเท่า ๆ กัน การสร้างกริดในงานวิจัยนี้จึงมี

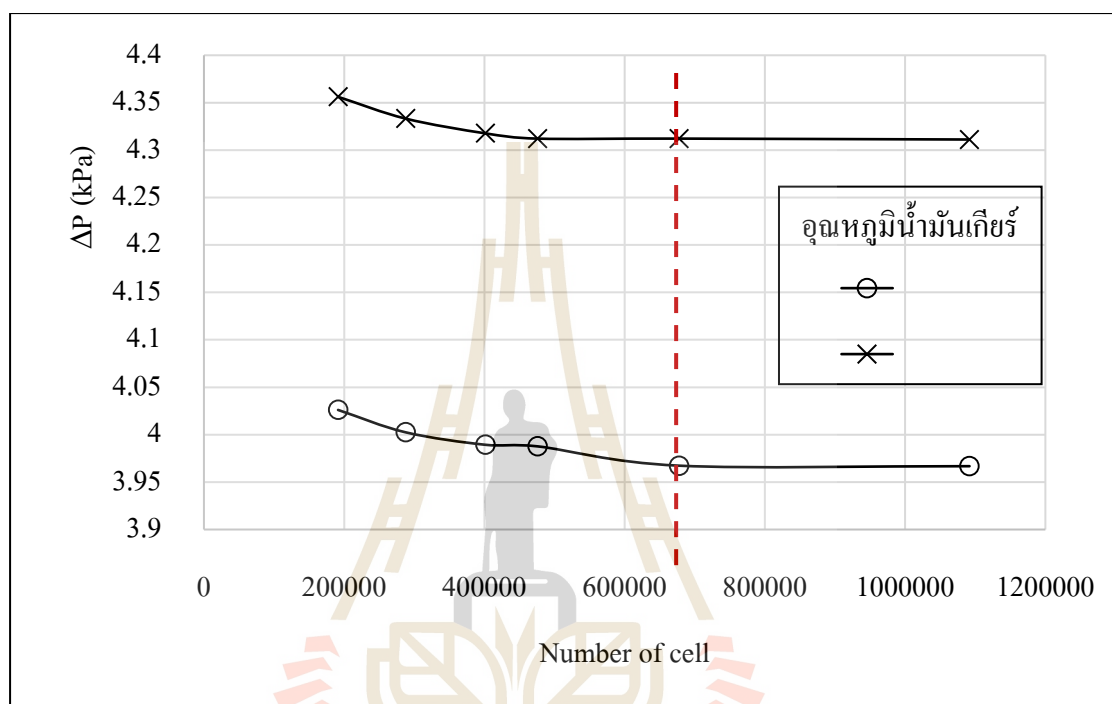
ความพยายามใช้กริด Hexahedron เป็นหลัก แต่ในบางขนาดของกริดระบายความร้อนไม่สามารถใช้กริด Hexahedron ได้ทั้งหมด ก็มีการใช้กริดแบบ Tetrahedron ผสมเข้าในบางส่วน โดยกำหนดขนาดของเซลล์เท่ากับ 0.00008 ถึง 0.000013 mm มีจำนวนเซลล์ซึ่งได้จากการทดสอบความเป็นอิสระของกริด กริดสำหรับการจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รูปแบบกริดที่ใช้ในการจำลองคอมพิวเตอร์ (บน) Tetrahedron (ล่าง) Hexahedron

จำนวนเซลล์มีผลโดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณกล่าวคือ จำนวนเซลล์ยิ่งมาก เวลาในการคำนวณก็จะมากตามไปด้วย การทดสอบความเป็นอิสระของกริดจำเป็นกระบวนการเพื่อลดเวลาในการคำนวณลงเพื่อค้นหาชุดกริดที่ให้ความแม่นยำของผลเฉลยโดยไม่ขึ้นกับจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้น การทดสอบความเป็นอิสระของกริดทำได้โดยเปรียบเทียบผลเฉลยของการที่ใช้กริดที่มีจำนวนเซลล์จากหายับและเพิ่มความละเอียดไปเรื่อย ๆ จนแน่ใจว่าแม้จะเพิ่มความละเอียดกริดมากขึ้น แต่ความถูกต้องของผลเฉลยยังคงเดิม หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก กริดชุดที่มีจำนวนเซลล์น้อยที่สุดที่เข้าเงื่อนไขดังกล่าว จะเป็นกริดอิสระและถูกนำไปใช้ในการคำนวณ ในกรณีอื่นต่อไป

สำหรับการจำลองการไหลเพื่อหาความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเหล็กเปลี่ยนความร้อนในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบกริดทั้งหมด 6 ชุด ที่มีความละเอียด 191,256, 287,616, 401,232, 475,880, 677,754, และ 1,091,816 เซลล์ ตามลำดับ โดยทำการจำลองการไหลของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิ 100 และ 120 °C และอัตราการไหล 5 L/min ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 จำนวนเซลล์กับความดันตกคร่อมครีบลูกเหล็กเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ของกริดที่ใช้คำนวณและความดันตกคร่อมครีบลูกเหล็กเปลี่ยนความร้อนพบว่า ผลการคำนวณความดันตกคร่อมผ่านครีบลูกเหล็กเปลี่ยนความร้อน เริ่มคงที่ที่กริดชุดที่ 5 (จำนวนเซลล์เท่ากับ 677,754) เป็นต้นไป ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดชุดดังกล่าว ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในกรณีอื่นต่อไป

3.4.5 การหาความดันตกคร่อมของการไหล

จากผลเฉลยของการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถหาความดันตกคร่อมของการไหลโดยคำนวณจากความแตกต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกครีบลูกเหล็กเปลี่ยนความร้อน $\Delta P = P_{in} - P_{out}$

3.5 การสร้างสหสัมพันธ์

งานวิจัยนี้การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความดันตกคร่อมอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะพิทซ์ ความสูง และมุมเอียง ของครีบแลกเปลี่ยนความร้อน ที่อุณหภูมิและอัตราไหลต่าง ๆ ของน้ำมันเกียร์จากผลเฉลยของการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้พีตกราฟข้อมูลความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในโปรแกรม Microsoft Excel 2016 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

ความดันตกคร่อมที่ศึกษามีทั้งสิ้น 768 กรณี ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ และขนาดของครีบอันประกอบไปด้วย ระยะพิทซ์ครีบ ความสูงครีบ และมุมเอียงครีบ ดังรูปที่ 3.21 ความดันตกคร่อมที่ได้จากการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ดังกล่าวถูกนำกลับมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมและอัตราไหลของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละขนาด จำนวน 64 กรณีหลัก ดังตารางที่ 3.4 แล้วสร้างสมการจากเส้นกราฟแนวโน้มที่พิตด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนในการสร้างสหสัมพันธ์ดังนี้

3.5.1 ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์

1) สร้างความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดอ้างอิงกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ ที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C โดยทำการพิตข้อมูลด้วยฟังก์ชันที่สอดคล้องกับข้อมูลและธรรมชาติของการไหล โดยจะได้สมการที่อธิบายความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C จำนวน 3 สมการดังนี้

$$\Delta P_{\text{ref}, T40^{\circ}\text{C}} = f(Q)_{T40^{\circ}\text{C}} \quad (3.1)$$

$$\Delta P_{\text{ref}, T100^{\circ}\text{C}} = f(Q)_{T100^{\circ}\text{C}} \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{\text{ref}, T120^{\circ}\text{C}} = f(Q)_{T120^{\circ}\text{C}} \quad (3.3)$$

2) จากสมการที่ 3.1-3.3 จะพบว่า ความดันตกคร่อมเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta P_{\text{ref}} = f(Q, T) \quad (3.4)$$

3.5.2 ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อน

ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนถูกแจกแจงได้ทั้งหมด 64 กรณี โดยเลือกพิจารณาจากตัวแปรขนาดที่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อมมากที่สุดไปน้อยที่สุด

1) สร้างตัวแปรสัดส่วนขนาดครีบที่ประกอบด้วยระยะพิทช์ (F_p), ความสูงครีบ (F_H), และมุมเอียงครีบ (F_A) ด้วยการนำขนาดครีบแต่ละกรณีหารด้วยขนาดของครีบอ้างอิง ($F_{p,\text{ref}} = 2.613 \text{ mm}$, $F_{H,\text{ref}} = 3 \text{ mm}$, และ $F_{A,\text{ref}} = 18.59$ องศา) จะได้ตัวแปรสัดส่วนของระยะพิทช์ ($F_p/F_{p,\text{ref}}$) สัดส่วนความสูงครีบ ($F_H/F_{H,\text{ref}}$) และสัดส่วนมุมเอียงครีบ ($F_A/F_{A,\text{ref}}$) จากนั้นสร้างตัวแปรสัดส่วนของความดันตกคร่อมแต่ละกรณีที่ทำการทำงานการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการนำความดันตกคร่อมดังกล่าวหารด้วยความดันตกคร่อมของครีบขนาดอ้างอิง ($\Delta P / \Delta P_{\text{ref}}$) เพื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลต่อไป

2) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนขนาดครีบ โดยพิจารณาตัวแปรสัดส่วนขนาดครีบที่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อมมากที่สุดก่อน แล้วสร้างความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลดังกล่าว จากนั้นจึงพิจารณาตัวแปรสัดส่วนสำคัญรองลงมาเป็นลำดับ โดยพิจารณาด้วยฟังก์ชันที่ได้มีความสอดคล้องกับธรรมชาติของข้อมูลมากที่สุด สมการที่ได้อยู่ในรูปสัดส่วนความดันตกคร่อมที่เป็นฟังก์ชันของสัดส่วนระยะพิทช์ ความสูงครีบ และมุมเอียงครีบ

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} = f\left(\frac{F_p}{F_{p,\text{ref}}}, \frac{F_H}{F_{H,\text{ref}}}, \frac{F_A}{F_{A,\text{ref}}}\right) \quad (3.5)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ของสัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนขนาดครีบจึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสัมประสิทธิ์ขนาดครีบ (K_F)

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} = f\left(\frac{F_p}{F_{p,\text{ref}}}, \frac{F_H}{F_{H,\text{ref}}}, \frac{F_A}{F_{A,\text{ref}}}\right) = f(K_F) \quad (3.6)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ref}} f(K_F) = f(Q, T, K_F) \quad (3.7)$$

สหสัมพันธ์ที่ได้มาจากผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองดังนี้ จึงมีการปรับสหสัมพันธ์ให้เข้ากับผลการทดลองโดยการสร้างตัวแปรสัมประสิทธิ์ของการปรับผล (แฟกเตอร์คัต K_B) โดยอิงจากกรณีครีบนขนาดอ้างอิง

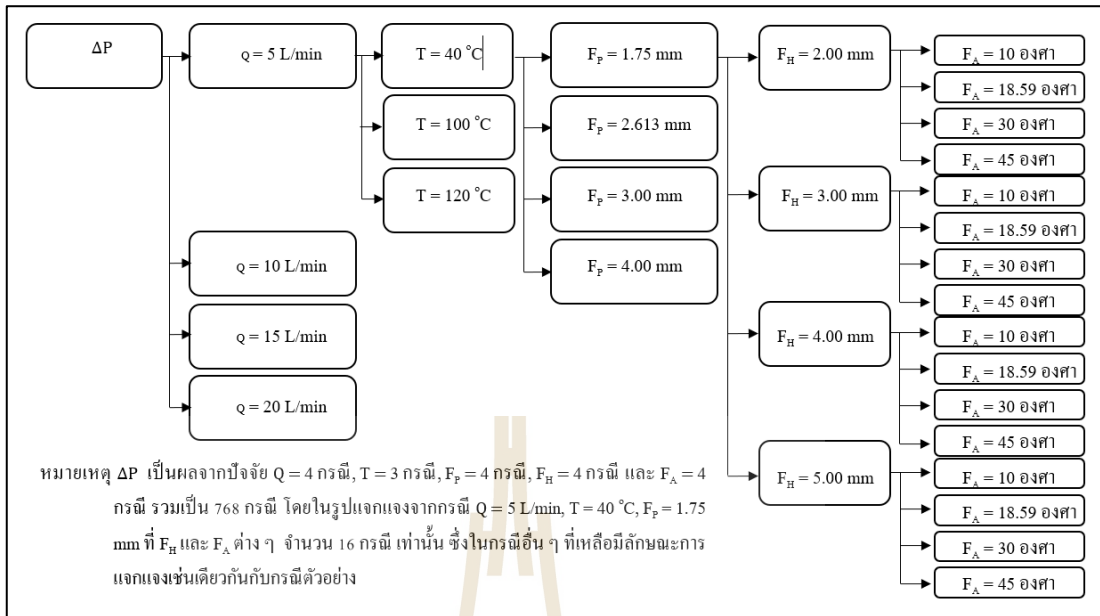
$$\Delta P = \Delta P_{\text{EXP}} = K_B (\Delta P_{\text{SIM}}) \quad (3.8)$$

3) สร้างสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน โดยผนวกสมการที่ 3.7 และ 3.8 เข้าด้วยกันจะได้สมการสหสัมพันธ์อยู่ในรูปดังนี้

$$\Delta P = K_B f(Q, T, K_F) \quad (3.9)$$

4) ตรวจสอบความแม่นยำของสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายความดันตกคร่อมที่ได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ กลับเข้าไปในสมการและเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยแสดงในรูปร้อยละความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$\% \text{Error} = \left| \frac{\Delta P_{\text{COR}} - \Delta P_{\text{SIM}}}{\Delta P_{\text{SIM}}} \right| \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.21 แผนภูมิความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อม

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอผลและการวิเคราะห์ผลการจำลองความดันตกคร่อมกรณีทดสอบที่ได้แจกแจงไว้แล้วในตารางที่ 3.4 ซึ่งในการจำลองผลดังกล่าวใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\epsilon$ เนื่องจากให้ผลสอดคล้องเข้ากับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 3.16 และแสดงผลเฉลยจากแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีทดสอบทั้ง 768 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยที่นำผลการทำนายนั้นสร้างเป็นสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกรณีอื่นต่อไป การทำนายความดันตกคร่อมกรณีทดสอบดังกล่าวมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ ระยะพิทช์ ความสูงครีบ และมุมเอียงครีบ โดยผลของความดันตกคร่อมจากการจำลองการไหลที่มาจากปัจจัยดังกล่าวทั้ง 768 กรณี แสดงในภาคผนวก ก. และมีรายละเอียดดังนี้

4.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลต่อความดันตกคร่อมกรณีอ้างอิง

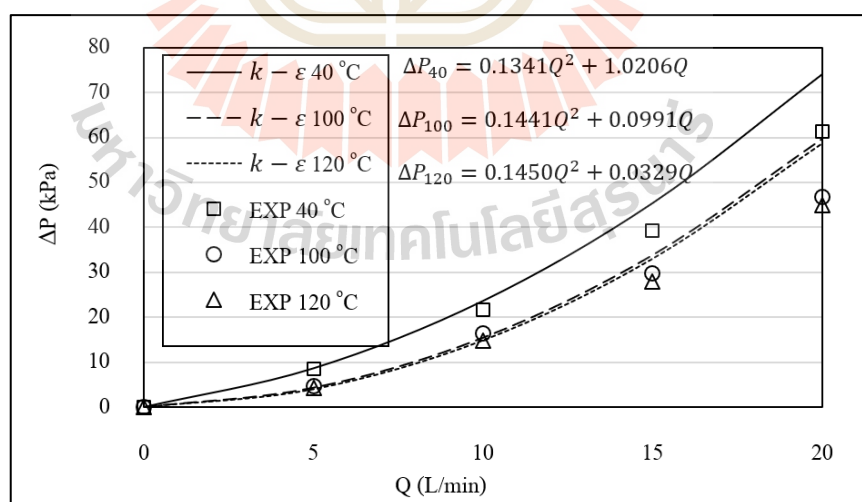
ผลการจำลองการไหลน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีอ้างอิง (กรณีที่มีผลการทดลองให้เปรียบเทียบ) รายละเอียดของครีบอ้างอิง ดังตารางที่ 4.1 สำหรับผลการทดลองกรณีครีบอ้างอิง แสดงความดันตกคร่อมเมื่ออัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์เปลี่ยนไป ดังตารางที่ 3.3 ค่าความดันนี้เรียกว่า “ความดันตกคร่อมอ้างอิง” ซึ่งจะถูกใช้ในการสร้างสหสัมพันธ์ต่อไป การจำลองการไหลใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ พบว่า ความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นและมีความลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลการจำลองกรณีอ้างอิง ดังตารางที่ 4.2 และความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลที่อุณหภูมิ น้ำมันเกียร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 สรุปได้ว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการไหลมีแนวโน้มปั่นป่วนมากขึ้น เกิดการไหลที่เสียดสี และเกิดความเสียดทานมากขึ้น ส่งผลให้ความดันตกคร่อมสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.2 ส่วนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของน้ำมันเกียร์ลดลง การไหลจึงสะดวกขึ้นส่งผลให้ความเสียดทานลดลง ความดันตกคร่อมจึงลดลง ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรอ้างอิงของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปรอ้างอิง	ค่าอ้างอิง
ระยะพิทช์ ($F_{P,ref}$)	2.613 mm
ความสูงครีบบ ($F_{H,ref}$)	3 mm
มุมเอียงครีบบ ($F_{A,ref}$)	18.59 องศา

ตารางที่ 4.2 ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองและการจำลองการไหลกรณีอ้างอิง

Q (L/min)	ΔP_{ref} (kPa)					
	T = 40 °C		T = 100 °C		T = 120 °C	
	EXP	$k - \varepsilon$	EXP	$k - \varepsilon$	EXP	$k - \varepsilon$
5	8.5	8.6	4.7	4.3	4.3	4.0
10	21.6	23.7	16.4	15.4	14.9	14.9
15	39.2	45.5	29.8	33.9	28.0	33.1
20	61.4	74.2	46.7	59.7	44.9	58.8

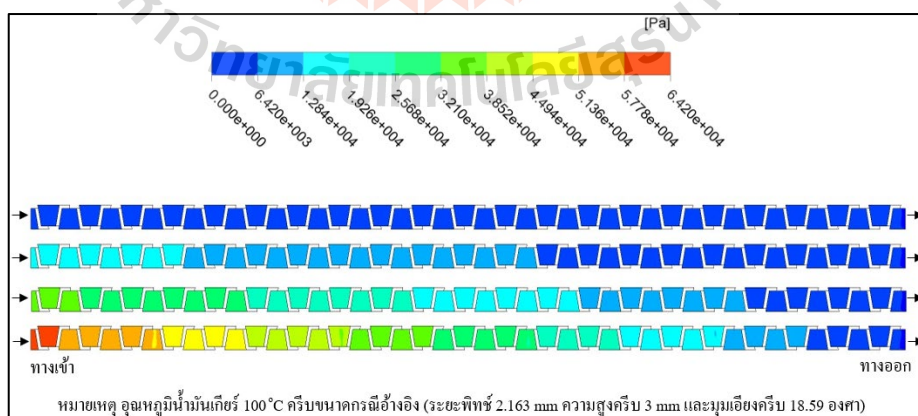


รูปที่ 4.1 ความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์กรณีอ้างอิง

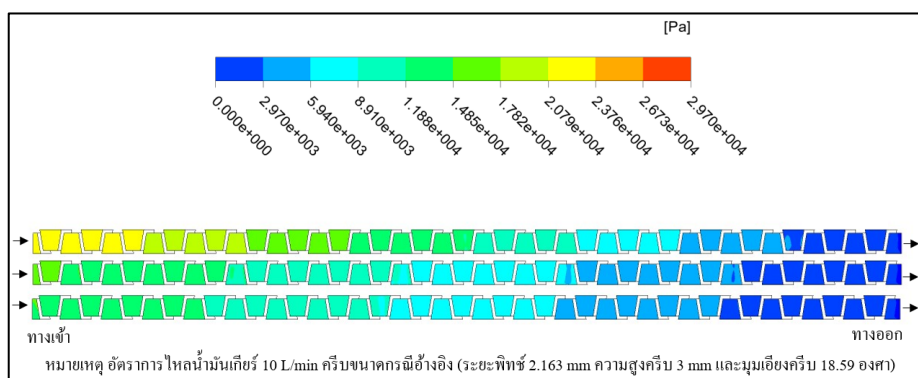
จากรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบการจำลองและผลการทดลองกรณีครีบบ้างอิงพบว่า ผลการจำลองสอดคล้องเป็นอย่างดีในช่วงอัตราไหลต่ำ (น้อยกว่า 10 L/min) และมีแนวโน้มให้ค่าสูงขึ้นกว่าผลการทดลองเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นพฤติกรรม การไหลมีแนวโน้มปั่นป่วนมากขึ้น มีการแยกตัวของกระแสการไหลและเกิดการหมุนวน ดังรูปที่ 4.4 จนการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำนายผลได้อย่างแม่นยำ

เมื่อพิจารณาความดันตลอดความยาวของครีบบนอุณหภูมิที่อุณหภูมิอ้างอิงที่อุณหภูมิ น้ำมันเกียร์ 100 °C อัตราการไหล 5, 10, 15, และ 20 L/min พบว่าที่บริเวณทางเข้าของน้ำมันเกียร์ มีความดันสูงและลดลงเรื่อยไปจนถึงทางออก โดยที่อัตราการไหล 20 L/min มีความดันที่ทางเข้า มากที่สุด ตามด้วยอัตราการไหล 15, 10, และ 5 L/min ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 และเมื่อพิจารณา ความดันตลอดความยาวของครีบบนอุณหภูมิที่อุณหภูมิอ้างอิงที่อัตราการไหล 10 L/min อุณหภูมิ น้ำมันเกียร์ 40, 100, และ 120 °C พบว่าที่บริเวณทางเข้าของน้ำมันเกียร์มีความดันสูง และลดลงเรื่อยไปจนถึงทางออก โดยที่อุณหภูมิ น้ำมันเกียร์ 40 °C มีความดันที่ทางเข้ามากที่สุด ตามด้วยอุณหภูมิ 100 และ 120 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 ความดันที่ลดลงเป็นผลจากการสูญเสีย ตลอดความยาวของครีบบนอุณหภูมิที่อุณหภูมิอ้างอิงที่อัตราการไหลมากและอุณหภูมิต่ำ

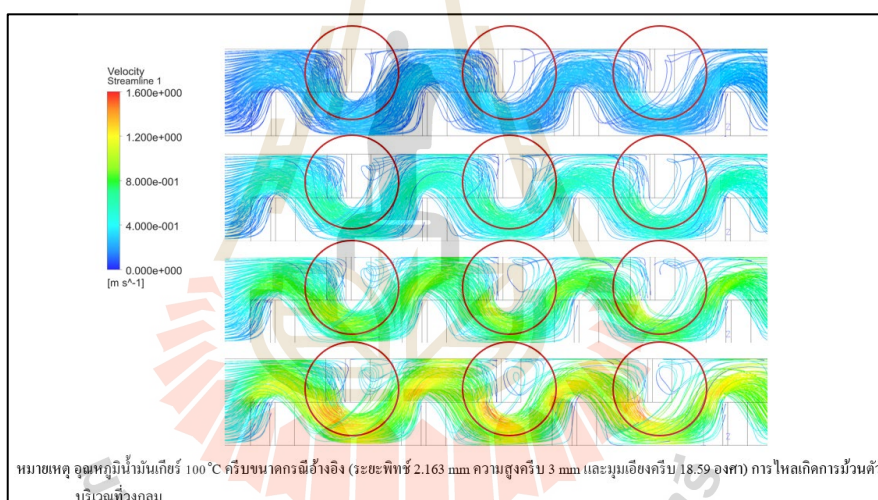
เมื่อพิจารณาเส้นทางไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบนอุณหภูมิที่อุณหภูมิอ้างอิงที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่าเส้นทางไหลเกิดการหมุนตัวในบริเวณด้านหลังของแผ่นครีบบน โดยเกิด การหมุนตัวมากที่สุดที่อัตราการไหลสูงสุด คือ 20 L/min และลดลงตามอัตราการไหล 15, 10, และ 5 L/min ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 การไหลวนดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความปั่นป่วนในการไหล เกิดการสูญเสียในการไหลและเกิดความดันตกคร่อมของการไหลขึ้น



รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ความดันของครีบบนอัตราการไหลต่าง ๆ
(5, 10, 15, และ 20 L/min เรียงลำดับจากบนลงล่าง)



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์ความดันของครีบบ้างอิงที่อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ต่าง ๆ (40, 100, และ 120 °C เรียงลำดับจากบนลงล่าง)



รูปที่ 4.4 เส้นการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบ้างอิงที่อัตราการไหลต่าง ๆ (5, 10, 15, และ 20 L/min เรียงลำดับจากบนลงล่าง)

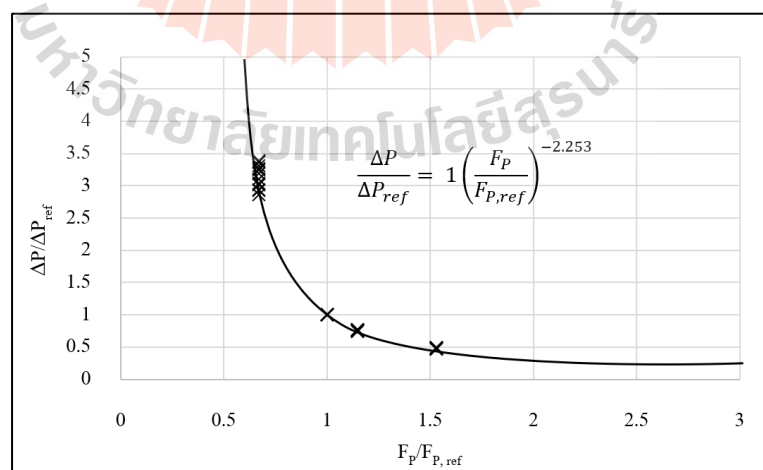
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดครีบบ้างอิงต่อความดันตกคร่อม

ในการออกแบบครีบบ้างอิงเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันเกียร์นั้น ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนแล้วว่า มี 2 ปัจจัยหลักที่ถูกลำดับกำหนด คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนกับความดันตกคร่อมอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะปัจจัยความดันตกคร่อม ปัจจัยที่ศึกษามีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะรูปทรงของครีบบ้างอิง เพราะเป็นการไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างกลุ่มครีบบ้างอิงที่จัดเรียงตัวซ้อนกันไปมา ดังนั้นในการออกแบบจึงมีความต้องการทราบว่าหากรูปทรงของครีบบ้างอิงเปลี่ยนแปลง

ไปจะส่งผลให้ความดันตกคร่อมเปลี่ยนไปอย่างไร และเพื่อให้สามารถนำผลไปใช้คาดการณ์กรณีศึกษาอื่น ๆ ด้วยการสร้างสหสัมพันธ์ใช้งาน จึงมีความจำเป็นเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตัวแปรที่ส่งผลต่อปัจจัยที่ศึกษา (ความดันตกคร่อม) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรรูปทรงของครีบริบที่ศึกษา 3 ตัวแปร คือ ระยะเวลาพิทซ์ ($F_{P,ref}$) ความสูงครีบริบ ($F_{H,ref}$) และมุมเอียงครีบริบ ($F_{A,ref}$) (ดูรูปที่ 3.10 ประกอบ)

4.3.1 ผลของระยะเวลาพิทซ์ต่อความดันตกคร่อม

ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบริบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับสัดส่วนระยะเวลาพิทซ์ ($F_P/F_{P,ref}$) เมื่อ $F_{P,ref}$ เป็นระยะเวลาพิทซ์อ้างอิง (ดูตารางที่ 4.1) และ ΔP_{ref} เป็นความดันตกคร่อมอ้างอิง (ดูตารางที่ 4.2) ที่อุณหภูมิและอัตราการไหล ต่าง ๆ ดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.2 (บนขวา) ทั้งหมด 12 กรณีทดสอบ เมื่อนำข้อมูลทั้ง 12 กรณี (48 ชุดข้อมูล) มารวมกัน จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยจุด \times ได้จากการจำลองคอมพิวเตอร์ส่วนเส้นประเป็นเส้นแนวโน้มที่ได้จากการฟิตข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากรูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระยะเวลาพิทซ์ ($F_P/F_{P,ref}$) ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อม ($\Delta P/\Delta P_{ref}$) เปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อสัดส่วนระยะเวลาพิทซ์น้อย ช่องทางการไหลภายในครีบริบมีการเลี้ยวตัวถี่มากขึ้น ทำให้เกิดการขวางการไหลจึงสูญเสียความดันมาก ในทางกลับกันเมื่อสัดส่วนระยะเวลาพิทซ์เพิ่มขึ้น ความถี่ในการเลี้ยวตัวขณะไหลของน้ำมันเกียร์น้อยลง การสูญเสียความดันจึงลดลง เมื่อสัดส่วนระยะเวลาพิทซ์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ($F_P/F_{P,ref} \rightarrow 0$) ทำให้น้ำมันเกียร์ไม่สามารถไหลผ่านครีบริบไปได้ ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อมมีค่าเข้าสู่ค่าอนันต์ ($\Delta P/\Delta P_{ref} \rightarrow \infty$)

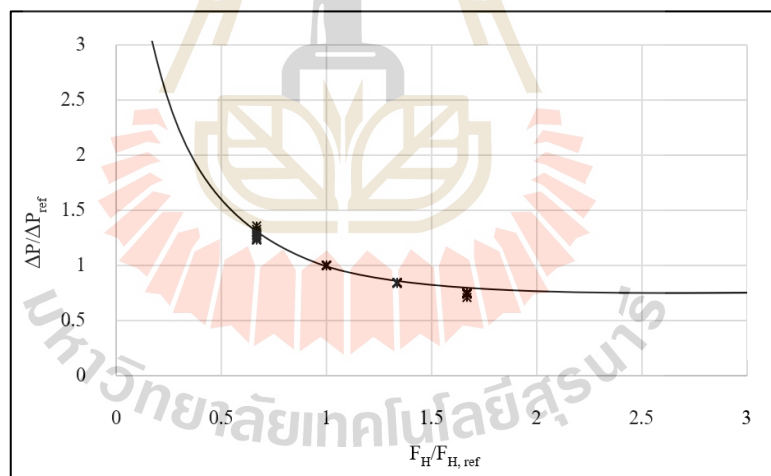


รูปที่ 4.5 สัดส่วนระยะเวลาพิทซ์กับสัดส่วนความดันตกคร่อม

(ที่ความสูงครีบริบ 3 mm และมุมเอียงครีบริบ 18.59 องศา)

4.3.2 ผลของความสูงครีบท่อความดันตกคร่อม

ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบล็อกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับสัดส่วนความสูงครีบ ($F_H/F_{H,ref}$) เมื่อ $F_{H,ref}$ เป็นความสูงครีบอ้างอิง (ดูตารางที่ 4.1) และ ΔP_{ref} เป็นความดันตกคร่อมอ้างอิง (ดูตารางที่ 4.2) ที่อุณหภูมิและอัตราการไหล ต่าง ๆ ดังภาคผนวก ข. รูปที่ ข.6 (บนขวา) ทั้งหมด 12 กรณีทดสอบ เมื่อนำข้อมูลทั้ง 12 กรณี (48 ชุดข้อมูล) มารวมกันจะได้ ดังรูปที่ 4.6 โดยจุด \times ได้จากการจำลองคอมพิวเตอร์ส่วนเส้นประเป็นเส้นแนวโน้มที่ได้จากการฟิตข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากรูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความสูงครีบ ($F_H/F_{H,ref}$) ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อม ($\Delta P/\Delta P_{ref}$) เปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อสัดส่วนความสูงครีบน้อย ช่องทางการไหลภายในครีบบล็อก ทำให้การไหลยากขึ้นจึงสูญเสียความดันมาก ในทางกลับกันเมื่อสัดส่วนความสูงครีบเพิ่มขึ้น น้ำมันเกียร์ไหลสะดวกขึ้น การสูญเสียความดันจึงลดลง เมื่อความสูงครีบลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ($F_H/F_{H,ref} \rightarrow 0$) ทำให้น้ำมันเกียร์ไม่สามารถไหลผ่านครีบไปได้ ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อมมีค่าเข้าสู่ค่าอนันต์ ($\Delta P/\Delta P_{ref} \rightarrow \infty$)

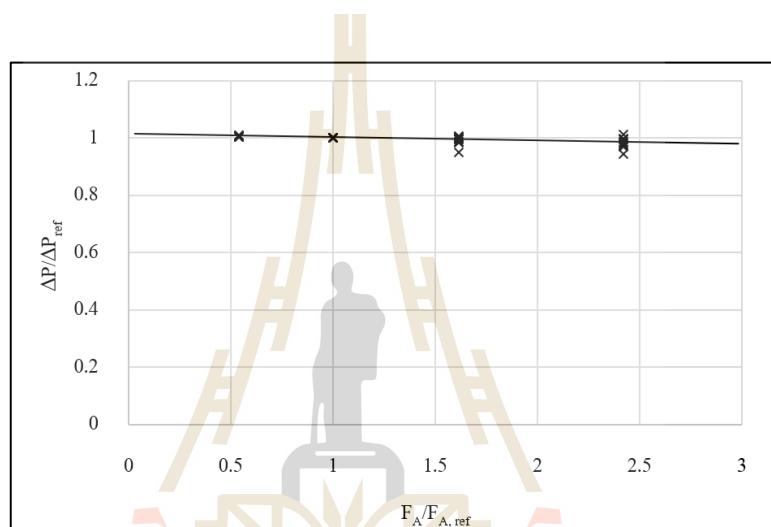


รูปที่ 4.6 สัดส่วนความสูงครีบท่อความดันตกคร่อม
(ที่ระยะพิทซ์ 2.613 mm และมุมเอียงครีบ 18.59 องศา)

4.3.3 ผลของมุมเอียงครีบท่อความดันตกคร่อม

ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบล็อกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับสัดส่วนมุมเอียงครีบ ($F_A/F_{A,ref}$) เมื่อ $F_{A,ref}$ เป็นมุมเอียงครีบอ้างอิง (ดูตารางที่ 4.1) และ ΔP_{ref} เป็นความดันตกคร่อมอ้างอิง (ดูตารางที่ 4.2) ที่อุณหภูมิและอัตราการไหล ต่าง ๆ แสดงใน

ภาคผนวก ข.รูปที่ ข.10 (บนขวา) ทั้งหมด 12 กรณีทดสอบ เมื่อนำข้อมูลทั้ง 12 กรณี (48 ชุดข้อมูล) มารวมกันจะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยจุด × ได้จากการจำลองคอมพิวเตอร์ ส่วนเส้นประเป็นเส้นแนวโน้มที่ได้จากการฟิตข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากรูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนมุมเอียงครีบ ($F_A/F_{A,ref}$) ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อม ($\Delta P/\Delta P_{ref}$) เปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อสัดส่วนมุมเอียงครีบน้อย มุมปะทะครีบมาก ทำให้มีการขวางการไหลสูง จึงสูญเสียความดันมาก ในทางกลับกันเมื่อสัดส่วนมุมเอียงครีบเพิ่มขึ้น การขวางการไหลน้อยลง น้ำมันเกียร์ไหลสะดวกขึ้น การสูญเสียความดันจึงลดลง



รูปที่ 4.7 สัดส่วนมุมเอียงครีบกับสัดส่วนความดันตกคร่อม
(ที่ระยะพิทซ์ 2.613 mm และมุมเอียงครีบ 18.59 องศา)

4.4 การสร้างสหสัมพันธ์

จากผลการจำลองการไหลที่กล่าวมานั้นพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อม การไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบไปด้วยอัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ และขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อน (ระยะพิทซ์ ความสูง มุมเอียง) จากความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวสามารถสร้างสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อม การไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

4.4.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิและอัตราการไหล

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมและอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดอ้างอิงสำหรับครีบกรณีอ้างอิง ดังรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์

ระหว่างความดันตกคร่อมและอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ที่อุณหภูมิน้ำมันเกียร์เปลี่ยนไป ลักษณะข้อมูลสามารถพิตได้ด้วยสมการในรูปแบบสมการพหุนามกำลัง 2 ดังสมการที่ 4.1a-4.1c

$$\Delta P_{T=40^{\circ}\text{C}} = 0.1341Q^2 + 1.0206Q \quad (4.1a)$$

$$\Delta P_{T=100^{\circ}\text{C}} = 0.1441Q^2 + 0.0991Q \quad (4.1b)$$

$$\Delta P_{T=120^{\circ}\text{C}} = 0.1450Q^2 + 0.0329Q \quad (4.1c)$$

ทั้ง 3 สมการสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ตามสมการที่ 4.2

$$\Delta P = mQ^2 + nQ \quad (4.2)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน (kPa)
 Q คือ อัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ (L/min)
 m, n คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์

โดยค่า m, n เป็นสัมประสิทธิ์ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ m, n กับอุณหภูมิน้ำมันเกียร์

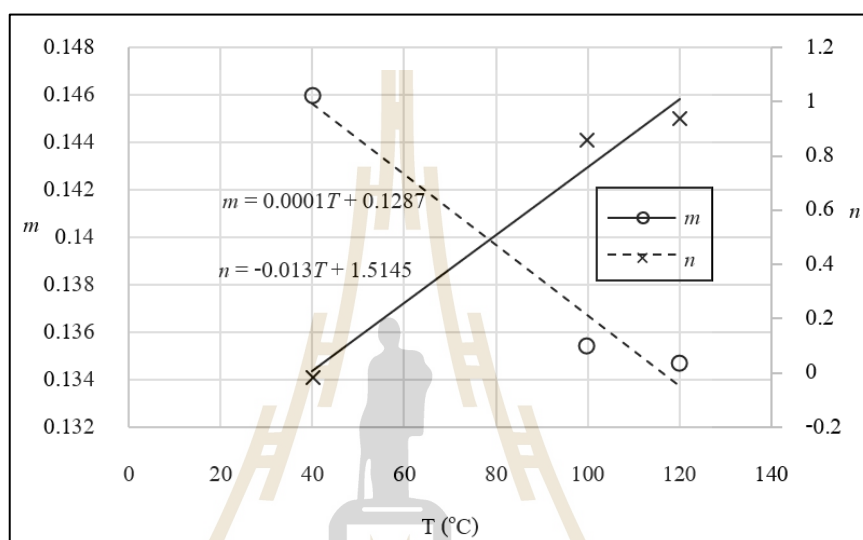
T (°C)	m	n
40	0.1341	1.0206
100	0.1441	0.0991
120	0.1450	0.0329

จากข้อมูล m, n ในตาราง เมื่อนำมาพล็อตกราฟเทียบกับอุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 4.8 พบว่าการกระจายของข้อมูลเป็นลักษณะเส้นตรงดังนั้นจึงเลือกพิตข้อมูลด้วยสมการเส้นตรงเพื่อแทนค่า m, n ในสมการที่ 4.2 และได้สมการสำหรับ m, n ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังนี้

$$m = 0.0001T + 0.1287 \quad (4.3)$$

$$n = -0.013T + 1.5145 \quad (4.4)$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิน้ำมันเกียร์ ($^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิน้ำมันเกียร์กับสัมประสิทธิ์ m , n

4.4.2 ผลกระทบจากขนาดของครีบ

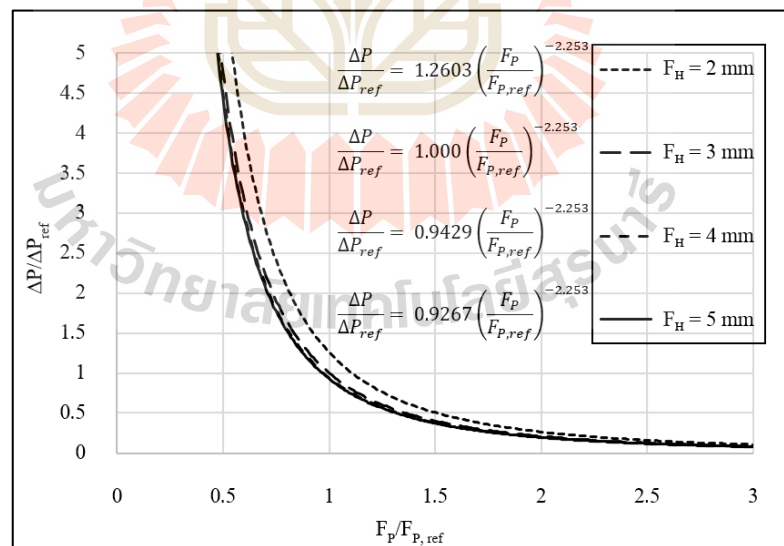
จากผลการทำนายความดันตกคร่อมทั้ง 768 กรณี เมื่อพิจารณากรณีความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดครีบแลกเปลี่ยนความร้อนกับความดันตกคร่อมพบว่า การเปลี่ยนแปลงระยะพิทช์มีผลกระทบต่อความดันตกคร่อมของการไหลมากที่สุด ถัดมาคือ ความสูงครีบ และมุมเอียงครีบตามลำดับ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดครีบต่อความดันตกคร่อมพิจารณาจากผลของการเปลี่ยนแปลงระยะพิทช์เป็นอันดับแรก ในรูปสัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทช์ โดยนำข้อมูลจากผลการจำลองทั้ง 768 กรณี มาผนวกเข้าด้วยกันสร้างเป็นกราฟและสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวจำนวน 16 ความสัมพันธ์ ดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.1-ข.4 จากกรณีที่ความสูงครีบและมุมเอียงครีบเป็นขนาดอ้างอิงในรูปที่ 4.5 จะพบว่าลักษณะของข้อมูลเมื่อฟิตด้วยสมการเลขยกกำลังมีความเหมาะสมที่สุด เพราะเมื่อสัดส่วนระยะพิทช์มีค่าน้อยจนเข้าใกล้

ศูนย์ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อมมีค่าเข้าสู่นันต์ สมการของข้อมูลรูปที่ 4.5 ในฟังก์ชันเลขยกกำลังดังสมการที่ 4.5

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} = a \left(\frac{F_p}{F_{p,ref}} \right)^b \quad (4.5)$$

เมื่อ $(\Delta P/\Delta P_{ref})$ คือ สัดส่วนความดันตกคร่อม
 $(F_p/F_{p,ref})$ คือ สัดส่วนระยะพิทซ์
 a, b คือ สัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์

จากกราฟความสัมพันธ์ของสัดส่วนระยะพิทซ์ ($F_p/F_{p,ref}$) กับสัดส่วนความดันตกคร่อม ($\Delta P/\Delta P_{ref}$) เมื่อรวมกราฟดังกล่าวที่มุมเอียงครีบเดียวกันไว้ด้วยกันดังแสดงใน ภาคผนวก ก. รูปที่ ค.1-ค.4 จากรูปที่ 4.9 ได้รวมกราฟของสัดส่วนระยะพิทซ์กับสัดส่วนความดันตกคร่อมที่มุมเอียงครีบบ้างอิงไว้ในรูปเดียวกันพบว่า สัมประสิทธิ์ a มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของความสูงครีบเพิ่มขึ้น ขณะที่สัมประสิทธิ์ b มีค่าเท่ากันที่มุมเอียงครีบ



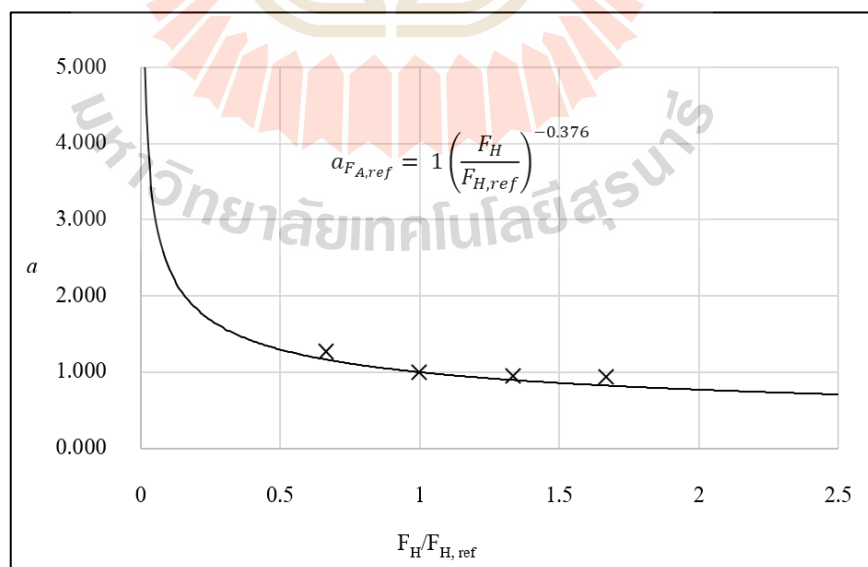
รูปที่ 4.9 สัดส่วนระยะพิทซ์กับสัดส่วนความดันตกคร่อมที่ความสูงครีบต่าง ๆ (ที่มุมเอียงครีบ 18.59 องศา)

โดยค่าสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ ทั้ง 16 ความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a, b

F_H (mm)	a				b			
	$F_A=10^\circ$	$F_A=18.59^\circ$	$F_A=30^\circ$	$F_A=45^\circ$	$F_A=10^\circ$	$F_A=18.59^\circ$	$F_A=30^\circ$	$F_A=45^\circ$
2	1.430	1.260	1.263	1.223	-2.387	-2.253	-2.412	-2.254
3	1.094	1.000	0.921	0.971	-2.387	-2.253	-2.412	-2.254
4	0.857	0.943	0.872	0.836	-2.387	-2.253	-2.412	-2.254
5	0.921	0.927	0.775	0.754	-2.387	-2.253	-2.412	-2.254

จากตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ a มีค่าลดลงเมื่อความสูงครีบเพิ่มขึ้น ขณะที่สัมประสิทธิ์ b ซึ่งเป็นเลขชี้กำลังตามสมการที่ 4.5 มีค่าเท่ากันที่มุมเอียงครีบเดียวกัน โดยความสัมพันธ์ของสัดส่วนความสูงครีบกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a มีความสัมพันธ์ดังแสดงในภาคผนวก ค. รูปที่ ค.5-ค.8 จากรูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนความสูงครีบกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a ที่มุมเอียงครีบอ้างอิงพบว่าเมื่อสัดส่วนความสูงครีบมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a ลดลง ขณะที่ b เป็นค่าคงที่



รูปที่ 4.10 สัดส่วนความสูงครีบกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a (ที่มุมเอียงครีบอ้างอิง)

จากสมการที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ a แปรผันตรงกับความดันตกคร่อม ดังนั้นสัดส่วนความสูงครีบจึงส่งผลไปยังความดันตกคร่อมด้วย จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าลักษณะของข้อมูลเมื่อฟิตด้วยฟังก์ชันเลขยกกำลังมีความเหมาะสมกับธรรมชาติของข้อมูลมากที่สุด เนื่องจากเมื่อสัดส่วนความสูงครีบบมีค่าน้อยจนเข้าใกล้ศูนย์ส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อมมีค่าเข้าสู่อินฟินิตี้ ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ 4.6

$$a = c \left(\frac{F_H}{F_{H,ref}} \right)^d \quad (4.6)$$

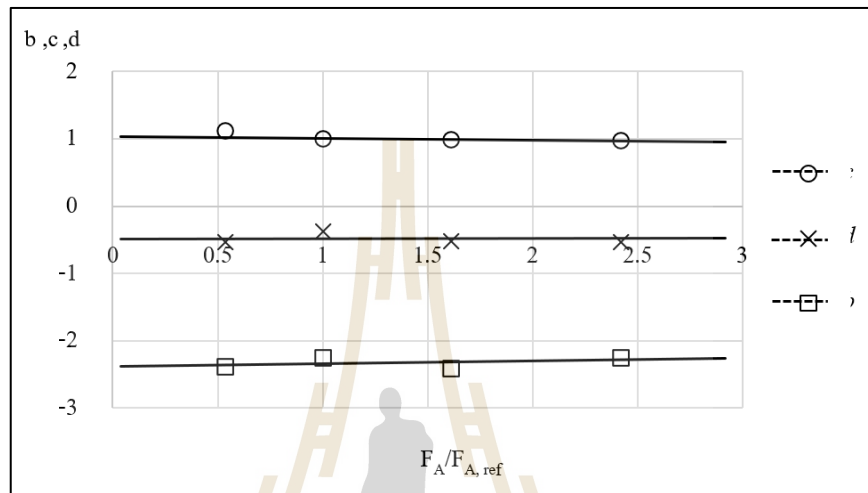
เมื่อ a คือ สัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์
 $(F_H/F_{H,ref})$ คือ สัดส่วนความสูงครีบ
 c, d คือ สัมประสิทธิ์ความสูงครีบ

จากสมการที่ 4.6 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูงครีบ c, d และที่มุมเอียงครีบ 10, 18.59, 30, และ 45 องศา โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์ความสูงครีบ c, d ที่มุมเอียงครีบต่าง ๆ

F_A (องศา)	c	d
10	1.111	-0.537
18.59	1.000	-0.376
30	0.989	-0.512
45	0.980	-0.530

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ b เปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงครีบ เช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์ความสูงครีบ c, d ในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสัดส่วนมุมเอียงครีบ $(F_A/F_{A,ref})$ กับสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 พจน์ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัดส่วนมุมเอียงกับสัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ b และสัมประสิทธิ์ความสูงกริบ c, d

จากรูปที่ 4.10 เมื่อสัดส่วนมุมเอียงกริบ ($F_A / F_{A,ref}$) มากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ระยะพิทซ์ b เพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์มุมเอียงกริบ c, d ลดลงส่งผลให้สัดส่วนความดันตกคร่อมลดลง ความความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นที่ 4.7-4.9

$$b = 0.0394 \left(\frac{F_A}{F_{A,ref}} \right) - 2.3814 \quad (4.7)$$

$$c = -0.0301 \left(\frac{F_A}{F_{A,ref}} \right) + 1.039 \quad (4.8)$$

$$d = 0.0051 \left(\frac{F_A}{F_{A,ref}} \right) - 0.4894 \quad (4.9)$$

เมื่อ ($F_A / F_{A,ref}$) คือ สัดส่วนความสูงกริบ

- b คือ สัมประสิทธิ์ระยะพิทช์
 c คือ สัมประสิทธิ์มุมเอียงครีบ
 d คือ สัมประสิทธิ์ความสูงครีบ

เพื่อให้ง่ายต่อการจัดรูปแบบสมการจึงกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรแทนที่ตัวแปรบางตัวใหม่ดังนี้

- $K_p = (F_p/F_{p,ref})$ คือ ตัวประกอบระยะพิทช์
 $K_H = (F_H/F_{H,ref})$ คือ ตัวประกอบความสูงครีบ
 $K_A = (F_A/F_{A,ref})$ คือ ตัวประกอบมุมเอียงครีบ
 $K_F = a(F_p/F_{p,ref})^b$ คือ ตัวประกอบขนาดครีบ

ตัวประกอบขนาดครีบจากสมการที่ 4.3-4.9 จะได้ว่า

$$K_F = \{[-0.0301(K_A) + 1.039](K_H)^{[0.0051(K_A) - 0.4894]}\} (K_p)^{[0.0394(K_A) - 2.3814]}$$

เมื่อรวมความสัมพันธ์ต่าง ๆ จากสมการที่ 4.1-4.9 เข้าด้วยกันเป็นสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกครีบการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นผลจากการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้

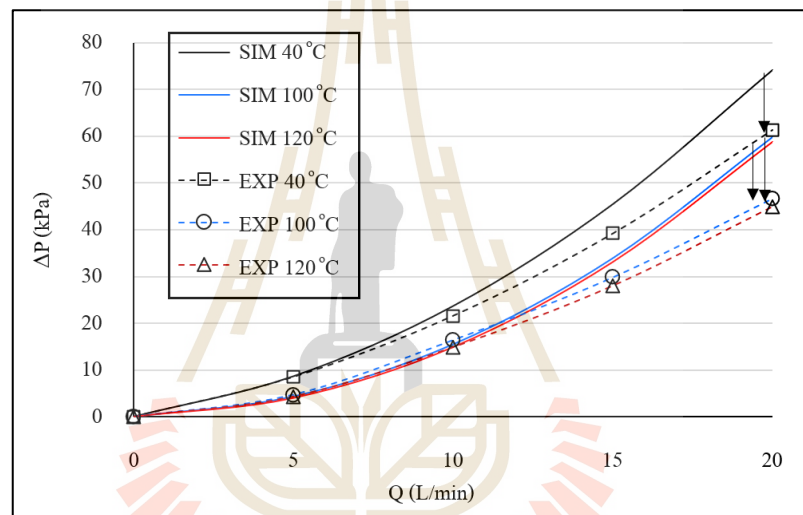
$$\Delta P = K_F \{mQ^2 + nQ\} \quad (4.10)$$

- เมื่อ ΔP คือ ความดันตกครีบของการไหลผ่านครีบแลกเปลี่ยนความร้อน (kPa)
 K_F คือ ตัวประกอบขนาดครีบ
 Q คือ อัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ (L/min)
 m, n คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์

สมการดังกล่าวอธิบายความสัมพันธ์ของความดันตกครีบกับอัตราการไหลอุณหภูมิของน้ำมันเกียร์และปัจจัยด้านขนาดของครีบแลกเปลี่ยนความร้อน จากผลการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 4.10

4.4.3 การหาแฟกเตอร์ตัด

เนื่องจากการสร้างสหสัมพันธ์ดังกล่าวได้ข้อมูลจากการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากผลทดสอบดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.2 จึงมีการปรับสมการเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลอง (ดูรูปที่ 4.12) ด้วยการนำแฟกเตอร์ตัดเข้ามาช่วยในการปรับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ให้สอดคล้องกับผลการทดลอง จากการหาสัมประสิทธิ์ m, n ของสมการเส้นแนวโน้มจากผลทดลองกับผลการทำนายด้วยสหสัมพันธ์ในสมการที่ 4.10 ที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C โดยมีค่าแฟกเตอร์ตัดซึ่งได้จากการนำสัมประสิทธิ์ m, n ของผลการทดลองหารด้วยผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.12 การตัดผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เข้าสู่ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ m, n และแฟกเตอร์ตัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

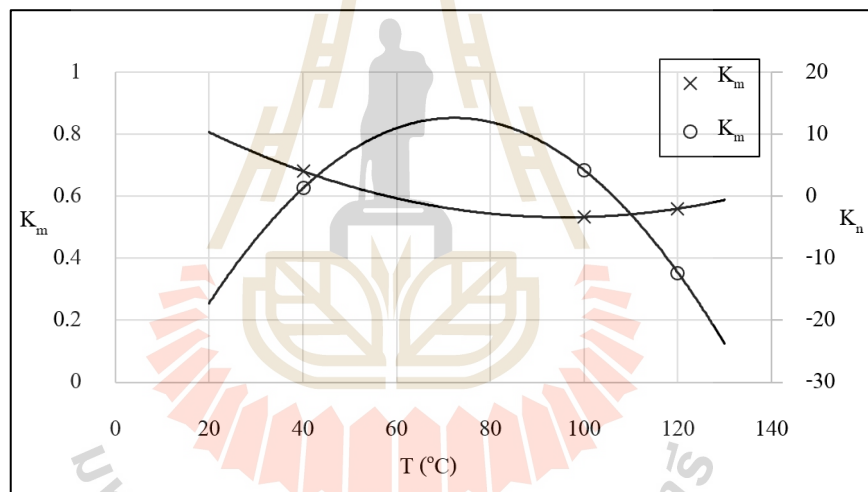
T (°C)	m	n	m	n	K_m (m_{EXP}/m_{SIM})	K_n (n_{EXP}/n_{SIM})
	Experiment (EXP)		Simulation (SIM)			
40	0.1338	1.0006	0.0911	1.2471	0.6809	1.2464
100	0.1398	0.2086	0.0745	0.8796	0.5329	4.2167
120	0.1418	-0.0554	0.0794	0.6807	0.5599	-12.287

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและแฟกเตอร์ตัดทั้ง 2 พจน์ พบว่าแฟกเตอร์ตัด K_m และ K_n เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยสมการดังนี้

$$K_m = 0.000477T^2 - 0.00915T + 0.9704 \quad (4.11)$$

$$K_n = -0.010934T^2 + 1.5802T - 44.468 \quad (4.12)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ ($^{\circ}\text{C}$)
 K_m, K_n คือ แฟกเตอร์ตัด



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิน้ำมันเกียร์กับแฟกเตอร์ตัด K_m, K_n

เมื่อรวมสมการที่ 4.10 กับแฟกเตอร์ตัดสมการที่ 4.11-4.12 จะได้

$$\Delta P = K_F (K_m mQ^2 + K_n nQ) \quad (4.13)$$

โดยที่ $K_m = -0.0002T^2 + 0.0307T + 0.5038$

$$K_n = -0.0001T^2 - 0.0267T + 1.7174$$

$$K_F = \left\{ [-0.0301(K_A) + 1.039]^{[0.0051(K_A) - 0.4894]} \right\} (K_P)^{[0.0394(K_A) - 2.3814]}$$

$$m = 0.0001T + 0.1287$$

$$n = -0.013T + 1.5145$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (kPa)

K_F คือ ตัวประกอบขนาดครีบบ

K_P คือ ตัวประกอบระยะพิทช์

K_H คือ ตัวประกอบความสูงครีบบ

K_A คือ ตัวประกอบมุมเอียงครีบบ

T คือ อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ ($^{\circ}\text{C}$)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ (L/min)

K_m, K_n คือ แฟกเตอร์ตัด

m, n คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิน้ำมันเกียร์

4.4.4 การทวนสอบการใช้งานสหสัมพันธ์

สหสัมพันธ์ความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานโดยแทนค่าตัวแปรขนาดครีบบ อุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ย้อนกลับในสมการที่ 4.10 จากนั้นคำนวณความคลาดเคลื่อนได้จากสมการ

$$\% \text{Error} = \left| \frac{\Delta P_{\text{COR}} - \Delta P_{\text{SIM}}}{\Delta P_{\text{COR}}} \right| \times 100 \quad (4.14)$$

เมื่อ ΔP_{SIM} คือ ความดันตกคร่อมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (kPa)

ΔP_{COR} คือ ความดันตกคร่อมทำนายจากสมการที่ 4.10 (kPa)

ผลความดันตกคร่อมทำนายด้วยสหสัมพันธ์ที่ยังไม่ปรับปรุง (ยังไม่มีแฟกเตอร์ตัด) ΔP_{COR} เปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ΔP_{SIM} ดังแสดงในภาคผนวก ง. ตารางที่ ง.1 โดยมีค่าความความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 13.79%

เมื่อใช้แฟกเตอร์ตัดเข้าไปปรับปรุงสมการสหสัมพันธ์ให้สอดคล้องกับการทดลอง ได้รูปแบบในสมการที่ 4.13 ผลที่คำนวณได้จากสมการสหสัมพันธ์ที่ได้รับการปรับปรุง (รวมแฟกเตอร์ตัด) ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่กรณีอ้างอิง จำนวนความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

$$\%Error = \left| \frac{\Delta P_{MOD} - \Delta P_{EXP}}{\Delta P_{EXP}} \right| \times 100 \quad (4.15)$$

เมื่อ ΔP_{EXP} คือ ความดันตกคร่อมจากการทดลอง
 ΔP_{MOD} คือ ความดันตกคร่อมทำนายจากสหสัมพันธ์ที่ปรับปรุงแล้ว (สมการที่ 4.13)

ผลการทำนายด้วยสหสัมพันธ์สมการที่ 4.13 เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่กรณีอ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5.97 % และเมื่อนำผลความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลที่อุณหภูมิต่าง ๆ พล็อตกราฟเทียบกับที่อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C พบว่ากราฟของการทำนายด้วยสหสัมพันธ์และการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการทดลองที่กรณีอ้างอิง

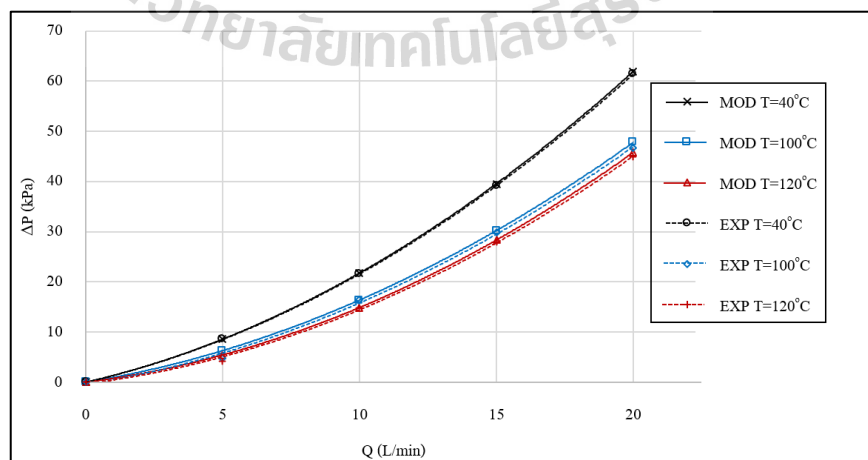
F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 L/min		
				EXP (kPa)	MOD (kPa)	% ERROR
2.613	3.00	18.59	40	8.51	8.59	0.89
2.613	3.00	18.59	100	4.70	6.31	34.34
2.613	3.00	18.59	120	4.30	5.44	26.52
F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 10 L/min		
				EXP (kPa)	MOD (kPa)	% ERROR
2.613	3.00	18.59	40	21.58	21.77	0.90
2.613	3.00	18.59	100	16.40	16.39	0.09
2.613	3.00	18.59	120	14.85	14.89	0.23
F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 15 L/min		

				EXP (kPa)	MOD (kPa)	% ERROR
2.613	3.00	18.59	40	39.20	39.56	0.90
2.613	3.00	18.59	100	29.81	30.22	1.36
2.613	3.00	18.59	120	27.97	28.34	1.32

ตารางที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนของสทสัมพันธ์และการทดลองที่กรณีcribอ้างอิง (ต่อ)

F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 20 L/min		
				EXP (kPa)	MOD (kPa)	% ERROR
2.613	3.00	18.59	40	39.20	39.56	0.90
2.613	3.00	18.59	100	29.81	30.22	1.36
2.613	3.00	18.59	120	27.97	28.34	1.32

หมายเหตุ EXP = ผลการทดลอง, MOD = สทสัมพันธ์ที่ปรับปรุงแล้ว (สมการที่ 4.13) และ
% ERR = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4.14 ความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลจากการทดลองและสหสัมพันธ์ที่กรณีcribอ้างอิง



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสร้างสหสัมพันธ์จากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดกับความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ต่าง ๆ ด้วยการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\epsilon$ โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะพิทซ์ ความสูงครีบบ และมุมเอียงครีบบ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อมการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหล อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ ระยะพิทซ์ ความสูงครีบบ และมุมเอียงครีบบ คือ

$$\Delta P = \left\{ [-0.0301(K_A) + 1.039](K_H)^{[0.0051(K_A) - 0.4897]} \right\} (K_P)^{[0.0394(K_A) - 2.3814]} \\ [(-0.0002 T^2 + 0.0307 T + 0.5038)(0.0001 T + 0.1287) Q^2 + (0.0001 T^2 - \\ 0.0267 T + 1.7174)(-0.013 T + 1.5145) Q]$$

เมื่อ	ΔP	คือ ความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (kPa)
	K_F	คือ ตัวประกอบขนาดครีบบ
	K_P	คือ ตัวประกอบระยะพิทซ์
	K_H	คือ ตัวประกอบความสูงครีบบ
	K_A	คือ ตัวประกอบมุมเอียงครีบบ
	T	คือ อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ (°C)
	Q	คือ อัตราการไหลของน้ำมันเกียร์ (L/min)
	K_m, K_n	คือ แฟกเตอร์ตัด
	m, n	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิน้ำมันเกียร์

2. ความดันตกคร่อมของการไหลสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำมันเกียร์เพิ่มขึ้น โดยความดันตกคร่อมสูงสุดที่อัตราการไหล 20 L/min และต่ำสุดที่อัตราการไหล 5 L/min
3. ความดันตกคร่อมของการไหลสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเกียร์ลดลง โดยความดันตกคร่อมสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 °C และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 120 °C
4. ความดันตกคร่อมของการไหลลดลง เมื่อระยะพิทช์ ความสูงครีป และมุมเอียงครีปเพิ่มขึ้น โดยความดันตกคร่อมสูงสุดในกรณีครีปที่มี ระยะพิทช์ 1.75 mm ความสูงครีป 2 mm มุมเอียงครีป 10 องศา และต่ำสุดในกรณีครีปที่มี ระยะพิทช์ 4 mm ความสูงครีป 5 mm และ มุมเอียงครีป 45 องศา
5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีปแลกเปลี่ยนความร้อนเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ อัตราการไหล อุณหภูมิน้ำมันเกียร์ ระยะพิทช์ ความสูงครีป และมุมเอียงครีป ตามลำดับ
6. สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อมของการไหลผ่านครีปแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ขนาดครีปกรณีอ้างอิง (ระยะพิทช์ 2.613 mm ความสูงครีป 3 mm มุมเอียงครีป 18.59 องศา) และน้ำมันเกียร์ที่มีอัตราการไหล 5, 10, 15, และ 20 L/min อุณหภูมิ 40, 100, และ 120 °C มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.97%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันตกคร่อมการไหลของน้ำมันเกียร์ผ่านครีปแลกเปลี่ยนความร้อนของงานวิจัยนี้เหมาะสมสำหรับน้ำมันเกียร์และครีปแลกเปลี่ยนความร้อนที่สมบัติในช่วงขอบเขตของการศึกษานี้เท่านั้น
2. งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ส่งผลต่อความดันตกคร่อมของการไหล ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งชี้สมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แต่มิได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยทั้งสองควบคู่กันไป เพื่อเป็นปัจจัยที่เพียงพอต่อการเลือกใช้งานครีปแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ
3. ครีปแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะหลากหลายแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมในการใช้งาน งานวิจัยนี้ศึกษาความดันตกคร่อมของครีปด้วยครีปแลกเปลี่ยนความร้อนโดยปรับเปลี่ยนระยะพิทช์ ความสูงครีป และมุมเอียงครีป เพียงลักษณะเดียวเท่านั้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3.1 ดังนั้นควรศึกษาครีปในลักษณะอื่นที่แตกต่างจากงานวิจัยเพิ่มเติมเพื่อเป็นปัจจัยในการเลือกใช้ครีปแลกเปลี่ยนความร้อนที่หลากหลายขึ้น

4. งานวิจัยนี้ศึกษาความดันตกคร่อมของการไหลน้ำมันเกียร์เพียง 1 ชนิด ในการใช้งาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจมีของไหลชนิดอื่น เช่น น้ำยาหล่อเย็น หรือน้ำมันเกียร์ที่มีสมบัติต่างออกไป ดังนั้นควรศึกษาของไหลชนิดอื่นที่มีสมบัติแตกต่างจากในงานวิจัยนี้เพิ่มเติม เพื่อครอบคลุมของไหลชนิดอื่น ๆ



รายการอ้างอิง

- กิตติราช สัจวิริยทรัพย์, พิทักษ์ พร้อมไธสง, กิตติชัย คำพันธ์ และ พงษ์เจต พรหมวงษ์. (2011). การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นออริฟิต. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME)* 1 (1): 37-41.
- กิริติ สุกฤษณ์. (2553). พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เก่งกล้า ภูธรักษ์, วิชาญ คงเกียรติไพบุลย์ และ ขวัญชัย หนาแน่น. (2017). การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานในท่อผิวปล้อง. *Engineering Transactions* 20 (2): 68-74.
- จิตรกร กนกนัยการ, ทวีเทศเจริญ และ พงษ์เจต พรหมวงษ์. (พฤศจิกายน 2552). อิทธิพลของมุมเอียงของครีบต่อการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีครีบหยัก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จิตรกร กนกนัยการ, สมพล สกุดทอง และ พงษ์เจต พรหมวงษ์. (ตุลาคม 2557). พฤติกรรมเชิงความร้อนภายในช่องขนานจัตุรัสสอดด้วยแผ่นกั้นเอียง 45° ไขว้กัน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 28 (หน้า 1, 313-1, 318). ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณรงค์ ทิพย์มงคลศิลป์. (2545). การศึกษาผลกระทบเนื่องจากรูปแบบของครีบต่อการถ่ายเทความร้อนโดยเทคนิค CFD. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณททัย ราตรี. (2556). สถิติเบื้องต้น แนวคิดและทฤษฎี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.
- ทแก้ว เขียมสวัสดิ์ และ วีรพันธ์ด้วงทองสุข. (2015). สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและความดันลดจากการเดือดขณะไหลของสารทำความเย็น R-134a ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบแท่งขนาดเล็ก. *SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY* 1 (1): 39-49

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- ธนาพล สุขชนะ. (2554). การถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความดันลด ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ที่มีลวดอยู่ภายใน. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัย ปทุมธานี 3 (1): 37-47.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณโสภากย์. (2555). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และสมพล สกุลหลง. (2561). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการไหล แบบปั่นป่วนผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยม. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 28 (3): 557-566.
- ภูมิ จาตุนิทานนท์ และอภิชาติ แจ็งบำรุง. (พฤศจิกายน 2552). การศึกษาการไหลของของไหลที่ ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเกลียวโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิษณุ อำไพจิตร, จำลอง ปราบแก้ว และพงษ์เทพ พรหมวงศ์. (ตุลาคม 2551). การเพิ่มการถ่าย เทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมโดยใช้ครีบบและปีก. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 (หน้า 335-340). ปทุมธานี: ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- วีระพันธ์ ด้วงทองสุข, วิชรพล อินทรชนบท และทแก้ว เขียมสวัสดิ์. (2016). สมรรถนะ การถ่ายเทความร้อนและความดันลดแบบสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ที่ไหล ผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็กแบบลูกคลื่นและแบบซิกแซก ขนานกัน. SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY 2 (1): 1-10.
- สาธิต ทูลไชสง, บัณฑิต กฤษดาคม และสัญญาชัย รำเพยพัค. (2554). อัตราส่วนของท่อที่มีผลต่อค่า ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น. วิศวกรรมสาร มข. 38 (2): 139-146.
- อนุชา กุลาน้อย และบัณฑิต กฤษดาคม. (2559). การประยุกต์ใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ สำหรับทำนายปริมาณ NO_x จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สของหัวพันไฟวัสดุพุนแบบเม็ด กลมอัดแน่น. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 9 (1): 31-38.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Carlos A. Rubio-Jimenez. (2012). Numerical Analysis of Novel Micro Pin Fin Heat Sink with Variable Fin Density. **IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY** 2 (5): 825-833.

Steven G. Penoncello. (2015). **Thermal Energy Systems Design and Analysis**. New York: Taylor & Francis Group.





ภาคผนวก ก

ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบดแลกเปลี่ยนความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบล็อกเปลี่ยนความร้อน

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
1	1.75	2	10	40	37.56	98.74	185.37	297.23
	1.75	2	10	100	17.18	58.59	124.20	214.47
	1.75	2	10	120	15.56	54.95	118.49	206.40
2	1.75	2	18.59	40	37.23	98.59	185.82	298.63
	1.75	2	18.59	100	17.29	59.35	126.32	218.46
	1.75	2	18.59	120	15.70	55.84	120.71	210.28
3	1.75	2	30	40	35.91	95.16	179.72	289.59
	1.75	2	30	100	16.78	58.16	124.55	216.25
	1.75	2	30	120	15.30	54.99	119.51	209.14
4	1.75	2	45	40	35.27	92.53	175.67	284.59
	1.75	2	45	100	16.68	58.95	127.68	223.20
	1.75	2	45	120	15.48	56.77	124.61	219.45
5	1.75	3	10	40	31.62	82.19	153.60	246.00
	1.75	3	10	100	14.20	48.33	102.86	178.24
	1.75	3	10	120	12.83	45.45	98.51	172.38
6	1.75	3	18.59	40	29.27	79.53	150.28	241.95
	1.75	3	18.59	100	13.99	48.00	102.17	175.76
	1.75	3	18.59	120	12.71	45.17	97.04	168.14
7	1.75	3	30	40	28.25	74.07	141.44	230.77
	1.75	3	30	100	13.54	47.97	103.97	181.91
	1.75	3	30	120	12.59	46.22	101.57	178.93
8	1.75	3	45	40	29.83	77.15	153.82	231.58
	1.75	3	45	100	13.35	46.78	100.76	175.49
	1.75	3	45	120	12.32	44.84	97.92	171.59

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
9	1.75	4	10	40	27.81	71.54	132.86	211.96
	1.75	4	10	100	13.04	44.12	91.37	161.87
	1.75	4	10	120	11.64	41.04	88.64	154.63
10	1.75	4	18.59	40	28.42	74.24	141.45	230.77
	1.75	4	18.59	100	13.42	47.37	102.45	178.97
	1.75	4	18.59	120	12.34	45.15	98.99	174.04
11	1.75	4	30	40	27.36	72.52	137.42	224.11
	1.75	4	30	100	13.13	46.44	100.81	176.40
	1.75	4	30	120	12.19	44.81	98.49	173.26
12	1.75	4	45	40	29.93	71.76	131.27	206.38
	1.75	4	45	100	13.02	43.57	92.15	158.63
	1.75	4	45	120	11.64	40.78	87.61	151.98
13	1.75	5	10	40	28.35	73.38	137.07	219.51
	1.75	5	10	100	12.67	42.95	90.82	156.43
	1.75	5	10	120	11.44	40.21	86.39	148.44
14	1.75	5	18.59	40	28.22	74.00	143.07	236.06
	1.75	5	18.59	100	13.78	49.34	107.41	188.25
	1.75	5	18.59	120	12.78	47.27	104.15	183.48
15	1.75	5	30	40	28.24	75.49	145.49	236.79
	1.75	5	30	100	13.86	48.23	103.21	178.54
	1.75	5	30	120	12.78	46.02	99.55	173.29
16	1.75	5	45	40	23.45	57.52	105.22	167.54
	1.75	5	45	100	9.66	33.31	71.57	124.52
	1.75	5	45	120	8.76	31.60	68.84	120.42

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบลูกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
17	2.613	2	10	40	11.85	31.72	60	96.67
	2.613	2	10	100	5.60	19.56	42.37	74.35
	2.613	2	10	120	5.11	18.65	41.15	72.85
18	2.613	2	18.59	40	11.73	31.34	59.32	95.58
	2.613	2	18.59	100	5.54	19.37	42.06	73.93
	2.613	2	18.59	120	5.06	18.51	40.92	72.56
19	2.613	2	30	40	11.67	31.12	58.81	94.77
	2.613	2	30	100	5.49	19.32	42.09	74.13
	2.613	2	30	120	5.03	18.51	41.03	72.79
20	2.613	2	45	40	11.69	30.94	58.27	93.67
	2.613	2	45	100	5.43	19.04	41.47	73.03
	2.613	2	45	120	4.96	18.24	40.44	71.42
21	2.613	3	10	40	8.68	23.79	45.73	74.63
	2.613	3	10	100	4.34	15.56	34.11	60.26
	2.613	3	10	120	4.01	14.98	33.37	59.39
22	2.613	3	18.59	40	8.63	23.65	45.45	74.17
	2.613	3	18.59	100	4.31	15.45	33.86	59.75
	2.613	3	18.59	120	3.99	14.87	33.08	58.79
23	2.613	3	30	40	8.70	23.78	45.61	74.30
	2.613	3	30	100	4.10	15.24	33.71	59.72
	2.613	3	30	120	3.99	14.79	32.71	57.91
24	2.613	3	45	40	8.73	23.37	45.21	74.03
	2.613	3	45	100	4.08	15.01	33.17	58.76
	2.613	3	45	120	3.96	14.57	32.18	56.98

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
25	2.613	4	10	40	7.19	19.59	37.73	61.71
	2.613	4	10	100	3.59	12.89	28.30	50.08
	2.613	4	10	120	3.32	12.43	27.74	49.38
26	2.613	4	18.59	40	7.31	19.95	38.40	62.76
	2.613	4	18.59	100	3.65	13.08	28.59	50.34
	2.613	4	18.59	120	3.38	12.57	27.87	49.35
27	2.613	4	30	40	6.42	21.18	40.96	66.34
	2.613	4	30	100	3.88	13.40	28.56	49.23
	2.613	4	30	120	3.57	12.75	27.44	47.75
28	2.613	4	45	40	7.57	19.30	37.75	61.40
	2.613	4	45	100	3.56	12.72	27.85	48.98
	2.613	4	45	120	3.29	12.24	27.09	47.86
29	2.613	5	10	40	6.63	17.86	34.27	56.01
	2.613	5	10	100	3.26	11.74	25.86	45.83
	2.613	5	10	120	3.02	11.35	25.38	45.21
30	2.613	5	18.59	40	6.51	17.62	33.85	55.36
	2.613	5	18.59	100	3.07	11.46	25.39	44.90
	2.613	5	18.59	120	2.99	11.12	24.63	43.55
31	2.613	5	30	40	6.09	16.98	33.66	56.28
	2.613	5	30	100	3.30	12.23	26.99	47.63
	2.613	5	30	120	3.11	11.85	26.37	46.75
32	2.613	5	45	40	6.69	18.20	35.19	57.57
	2.613	5	45	100	3.33	11.76	25.50	44.67
	2.613	5	45	120	3.06	11.23	24.71	43.55

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
33	3	2	10	40	8.97	24.03	45.46	73.30
	3	2	10	100	4.25	14.88	32.36	56.90
	3	2	10	120	3.88	14.23	31.50	55.80
34	3	2	18.59	40	8.89	23.81	45.03	72.60
	3	2	18.59	100	4.21	14.75	32.13	56.56
	3	2	18.59	120	3.85	14.13	31.32	55.52
35	3	2	30	40	8.85	23.55	44.46	71.67
	3	2	30	100	4.15	14.60	31.87	56.22
	3	2	30	120	3.80	14.01	31.12	55.28
36	3	2	45	40	8.80	23.34	43.91	70.53
	3	2	45	100	4.08	14.30	31.23	55.11
	3	2	45	120	3.73	13.73	30.52	54.30
37	3	3	10	40	6.46	17.37	34.76	56.90
	3	3	10	100	3.31	11.96	26.33	46.61
	3	3	10	120	3.07	11.55	25.81	45.99
38	3	3	18.59	40	6.40	17.78	34.32	56.13
	3	3	18.59	100	3.27	11.78	25.91	45.84
	3	3	18.59	120	3.03	11.37	25.39	45.19
39	3	3	30	40	6.36	17.58	33.89	55.36
	3	3	30	100	3.22	11.59	25.22	44.99
	3	3	30	120	2.98	11.18	24.91	44.29
40	3	3	45	40	7.39	17.85	33.69	54.18
	3	3	45	100	3.22	11.59	25.46	44.99
	3	3	45	120	2.88	10.67	23.68	42.08

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
41	3	4	10	40	5.25	14.62	28.37	46.59
	3	4	10	100	2.70	9.84	21.69	38.50
	3	4	10	120	2.51	9.52	21.34	38.05
42	3	4	18.59	40	5.28	14.66	28.51	46.93
	3	4	18.59	100	2.74	9.95	21.94	38.85
	3	4	18.59	120	2.55	9.63	21.52	38.33
43	3	4	30	40	5.45	15.06	29.22	47.97
	3	4	30	100	2.79	10.04	21.87	38.38
	3	4	30	120	2.59	9.63	21.24	37.43
44	3	4	45	40	5.63	14.30	28.27	46.97
	3	4	45	100	2.77	10.03	21.91	38.50
	3	4	45	120	2.61	9.72	21.50	38.03
45	3	5	10	40	4.42	12.23	23.80	39.27
	3	5	10	100	2.29	8.44	18.77	33.38
	3	5	10	120	2.15	8.22	18.50	33.03
46	3	5	18.59	40	4.62	12.61	24.77	40.08
	3	5	18.59	100	2.34	8.50	18.79	33.15
	3	5	18.59	120	2.18	8.23	18.37	32.67
47	3	5	30	40	4.66	12.33	24.30	40.45
	3	5	30	100	2.37	8.81	19.50	34.46
	3	5	30	120	2.23	8.55	19.08	33.82
48	3	5	45	40	4.66	12.28	24.70	41.52
	3	5	45	100	2.44	8.87	19.36	33.93
	3	5	45	120	2.29	8.52	18.77	33.06

ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบแลกเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณีที่	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
49	4	2	10	40	5.78	15.41	28.99	46.57
	4	2	10	100	2.70	9.36	20.32	35.70
	4	2	10	120	2.46	8.94	19.76	34.90
50	4	2	18.59	40	5.75	15.30	26.77	46.19
	4	2	18.59	100	2.67	9.27	20.10	35.32
	4	2	18.59	120	2.43	8.84	19.55	34.54
51	4	2	30	40	5.68	15.05	28.20	45.21
	4	2	30	100	2.61	9.04	19.60	34.40
	4	2	30	120	2.38	8.63	19.04	33.61
52	4	2	45	40	5.61	14.73	27.49	43.91
	4	2	45	100	2.54	8.72	18.85	33.03
	4	2	45	120	2.30	8.30	18.27	32.24
53	4	3	10	40	4.22	11.74	22.69	37.15
	4	3	10	100	2.16	7.75	16.98	29.99
	4	3	10	120	2.00	7.46	16.60	29.55
54	4	3	18.59	40	4.01	11.25	21.85	35.83
	4	3	18.59	100	2.09	7.51	16.49	29.11
	4	3	18.59	120	1.93	7.24	16.13	28.63
55	4	3	30	40	4.12	11.42	22.02	35.98
	4	3	30	100	2.09	7.42	16.14	28.35
	4	3	30	120	1.92	7.10	15.69	27.45
56	4	3	45	40	4.29	11.49	22.07	35.93
	4	3	45	100	2.07	7.22	15.46	26.81
	4	3	45	120	1.91	6.89	14.95	26.09

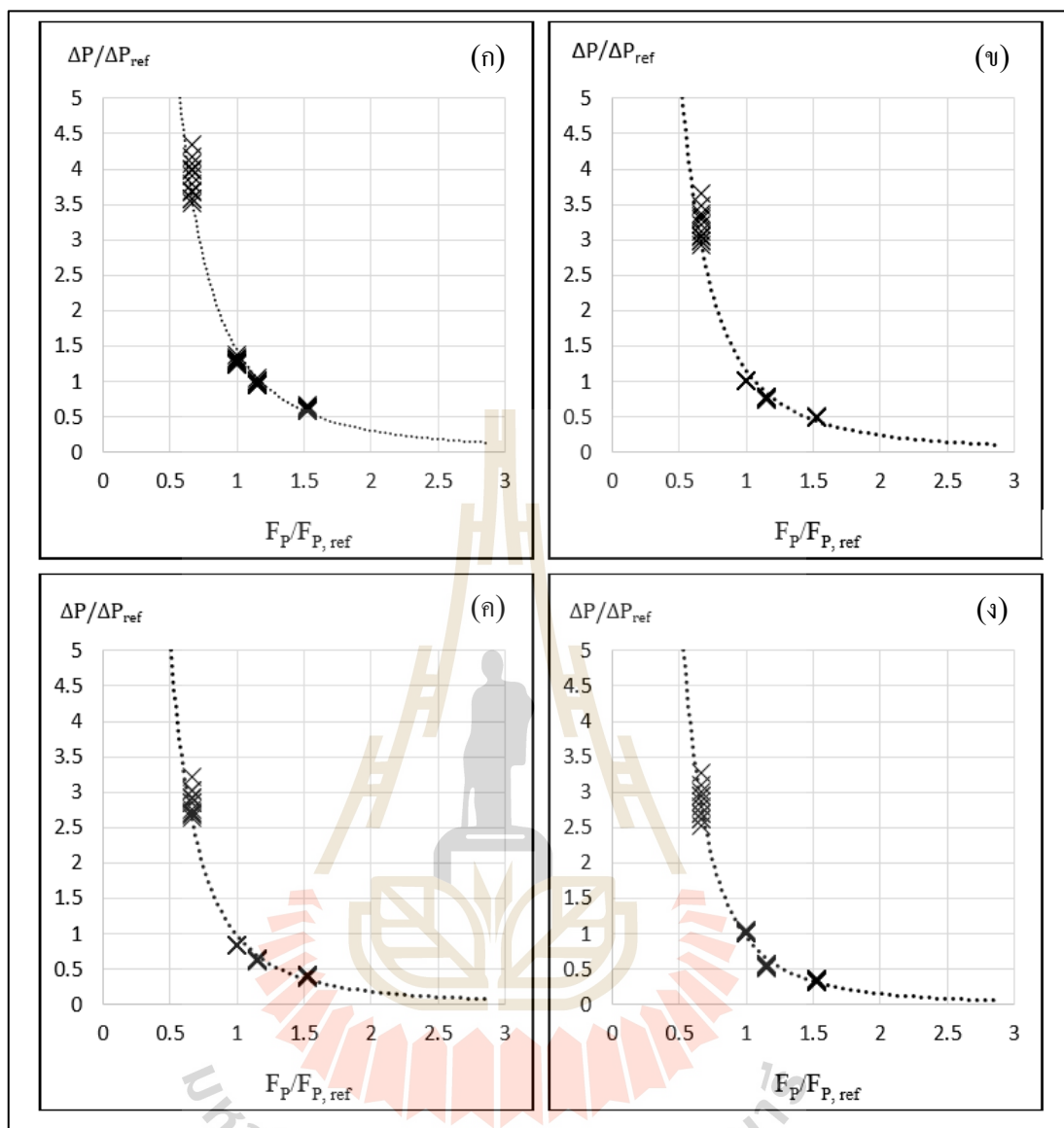
ตารางที่ ก.1 ผลจำลองความดันตกคร่อมของน้ำมันเกียร์ผ่านครีบบลัดเปลี่ยนความร้อน (ต่อ)

กรณี	F _P (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	ΔP (kPa)			
					Q=5 (L/min)	Q=10 (L/min)	Q=15 (L/min)	Q=20 (L/min)
57	4	4	10	40	3.23	9.16	17.92	29.56
	4	4	10	100	1.72	6.26	13.81	24.46
	4	4	10	120	1.60	6.06	13.55	24.14
58	4	4	18.59	40	3.25	9.04	17.52	28.76
	4	4	18.59	100	1.68	6.09	13.43	23.82
	4	4	18.59	120	1.56	5.89	13.18	23.46
59	4	4	30	40	3.15	8.83	17.21	28.33
	4	4	30	100	1.65	5.99	13.16	23.22
	4	4	30	120	1.54	5.78	12.86	22.83
60	4	4	45	40	3.28	9.12	17.70	29.03
	4	4	45	100	1.69	6.04	13.11	22.80
	4	4	45	120	1.57	5.75	12.61	22.17
61	4	5	10	40	2.69	7.52	14.79	24.50
	4	5	10	100	1.43	5.23	11.80	20.98
	4	5	10	120	1.35	5.17	11.63	20.75
62	4	5	18.59	40	2.65	7.46	14.66	24.34
	4	5	18.59	100	1.42	5.24	11.63	20.64
	4	5	18.59	120	1.34	5.10	11.43	20.35
63	4	5	30	40	2.68	7.45	14.56	24.04
	4	5	30	100	1.40	5.12	11.22	19.79
	4	5	30	120	1.31	4.93	10.96	19.43
64	4	5	45	40	2.82	6.40	12.55	20.98
	4	5	45	100	1.35	4.95	10.96	19.25
	4	5	45	120	1.27	4.82	10.65	18.82

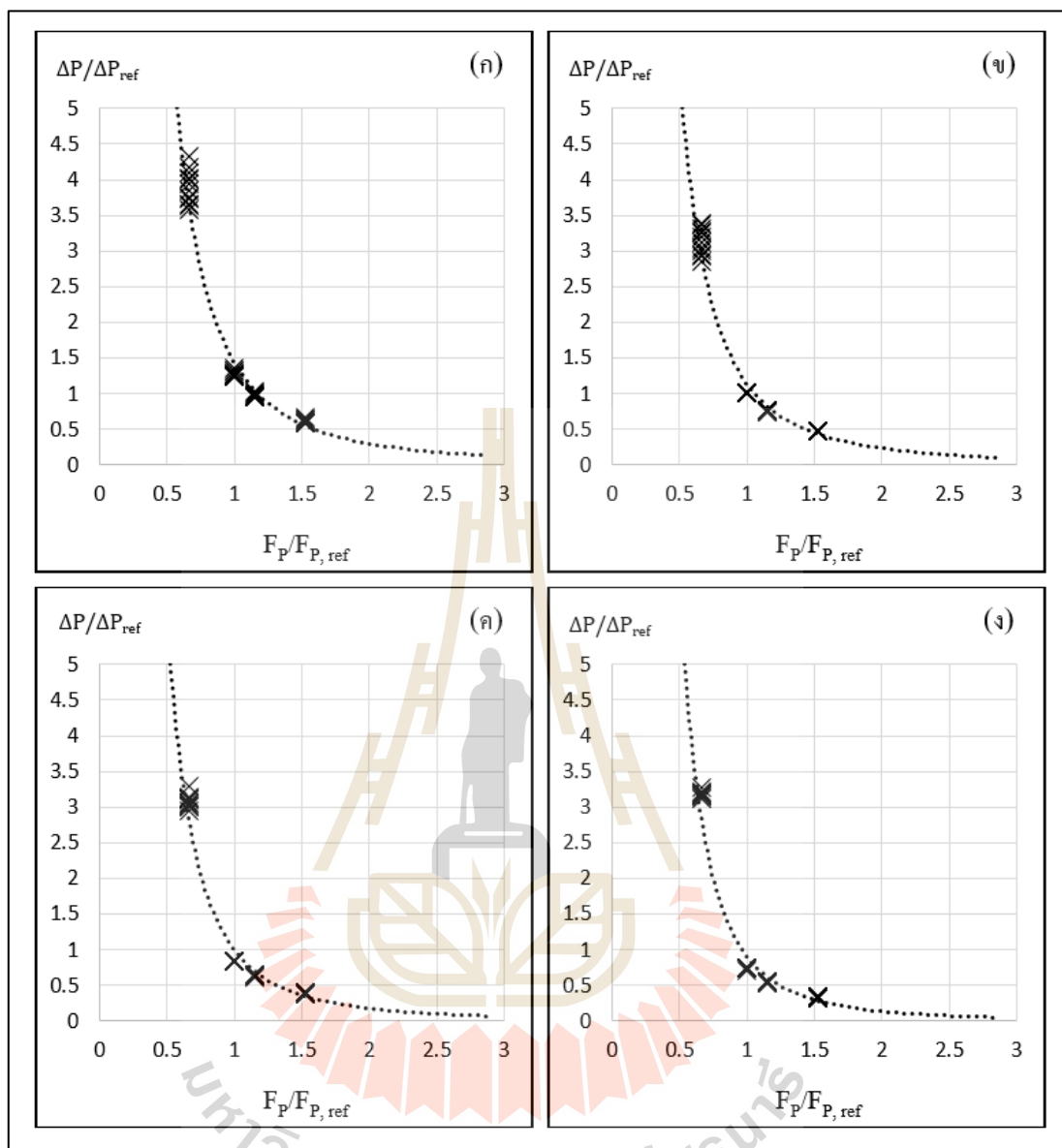
ภาคผนวก ข

ผลความดันตกพร้อมจากผลกระทบของขนาด crib แลกเปลี่ยนความร้อน

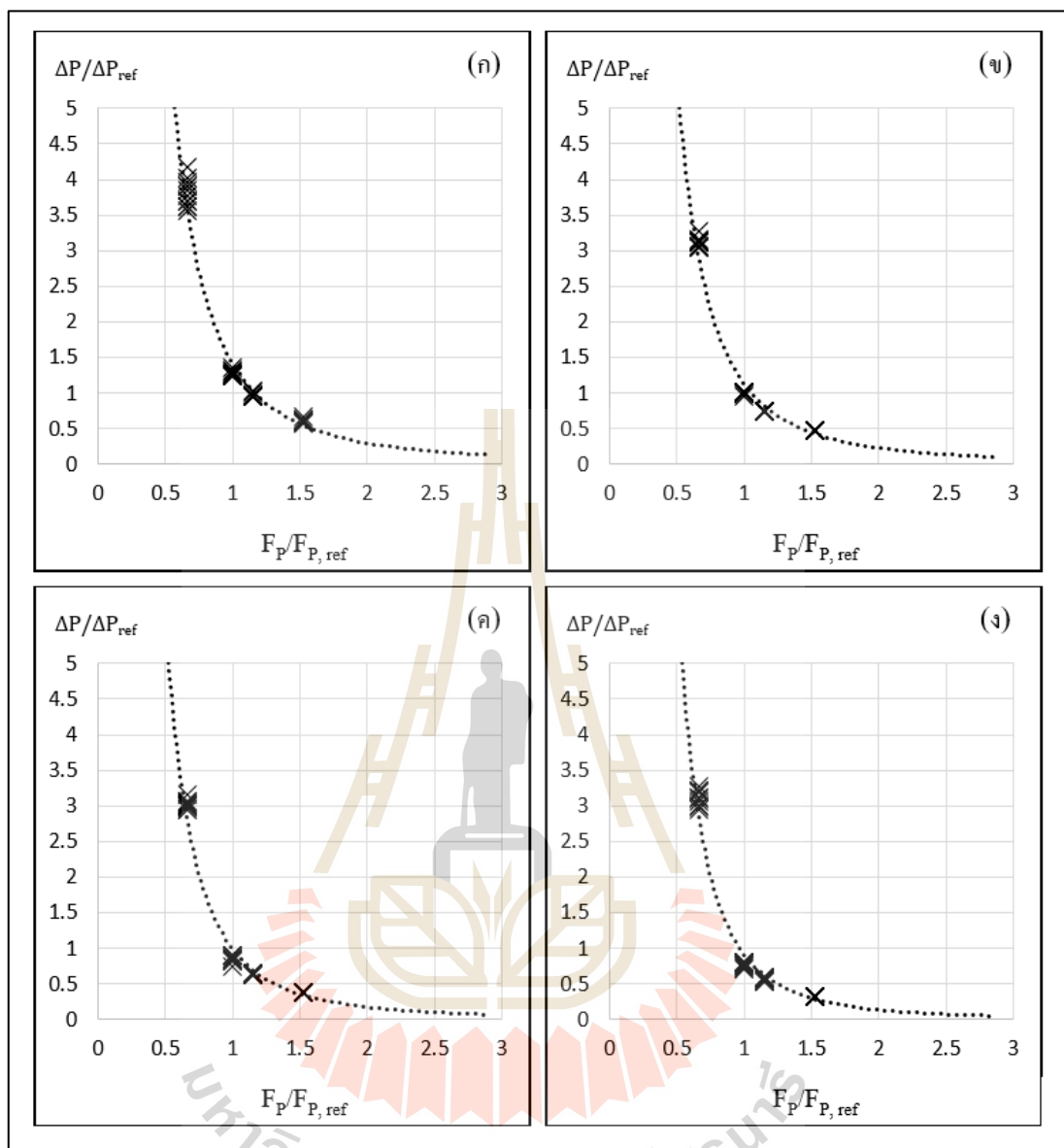
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



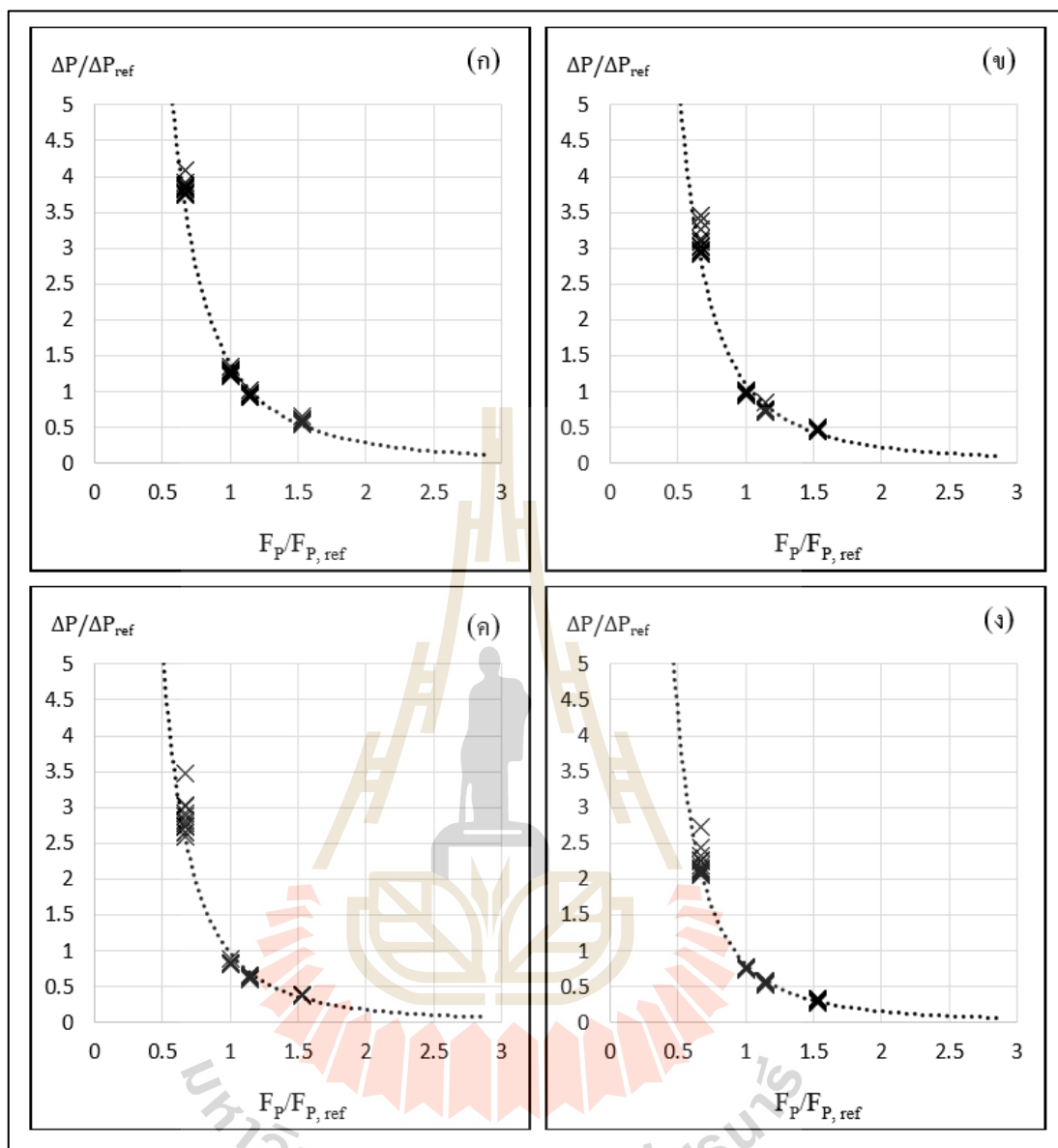
รูปที่ ข.1 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ ที่มุมเอียง 10 องศา
(ความสูงครีป (ก) 2 mm (ข) 3 mm (ค) 4 mm และ (ง) 5 mm)



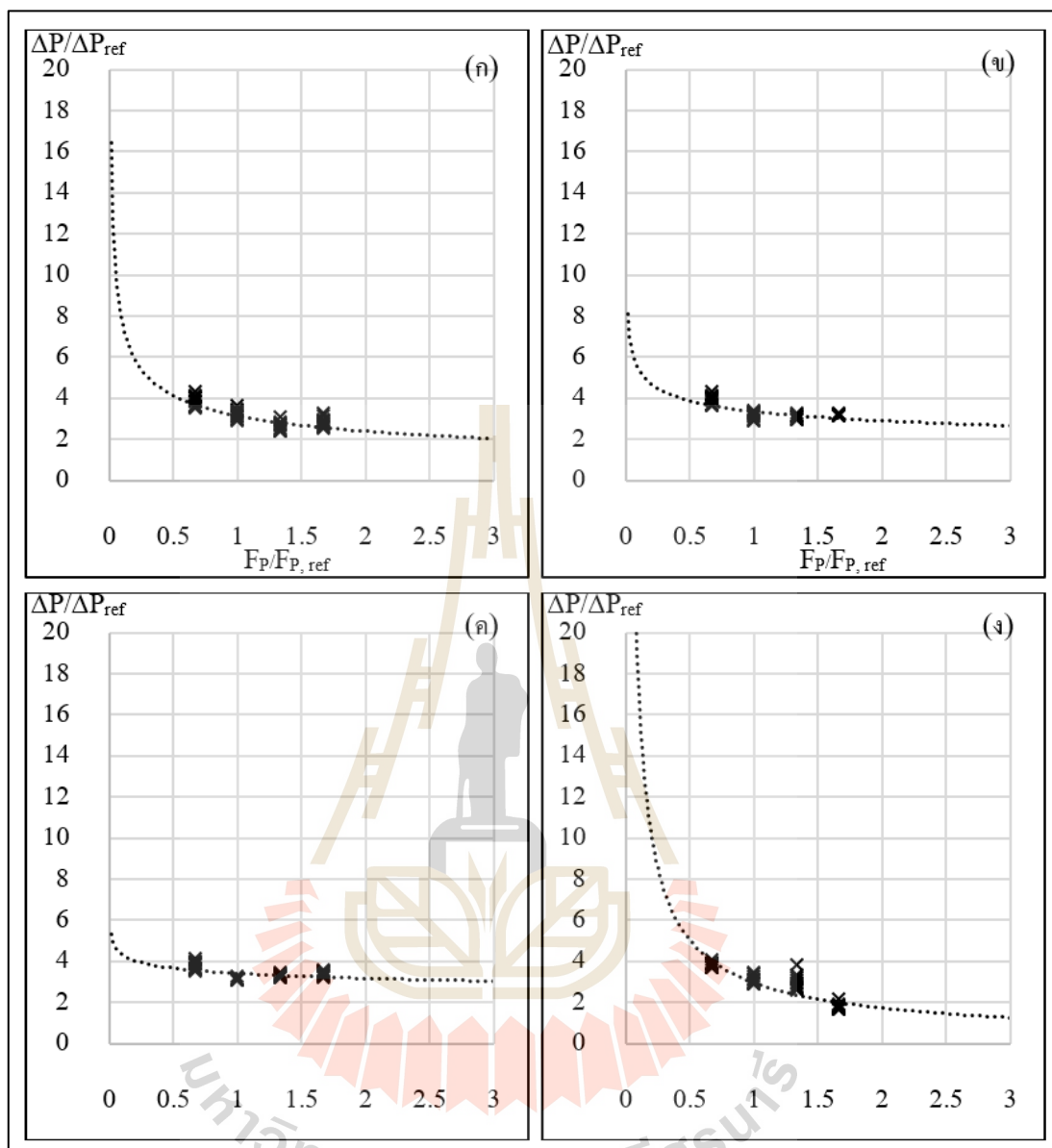
รูปที่ ข.2 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ ที่มุมเอียง 18.59 องศา
(ความสูงครีป (ก) 2 mm (ข) 3 mm (ค) 4 mm และ (ง) 5 mm)



รูปที่ ข.3 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ ที่มุมเอียง 30 องศา
(ความสูงกริป (ก) 2 mm (ข) 3 mm (ค) 4 mm และ (ง) 5 mm)

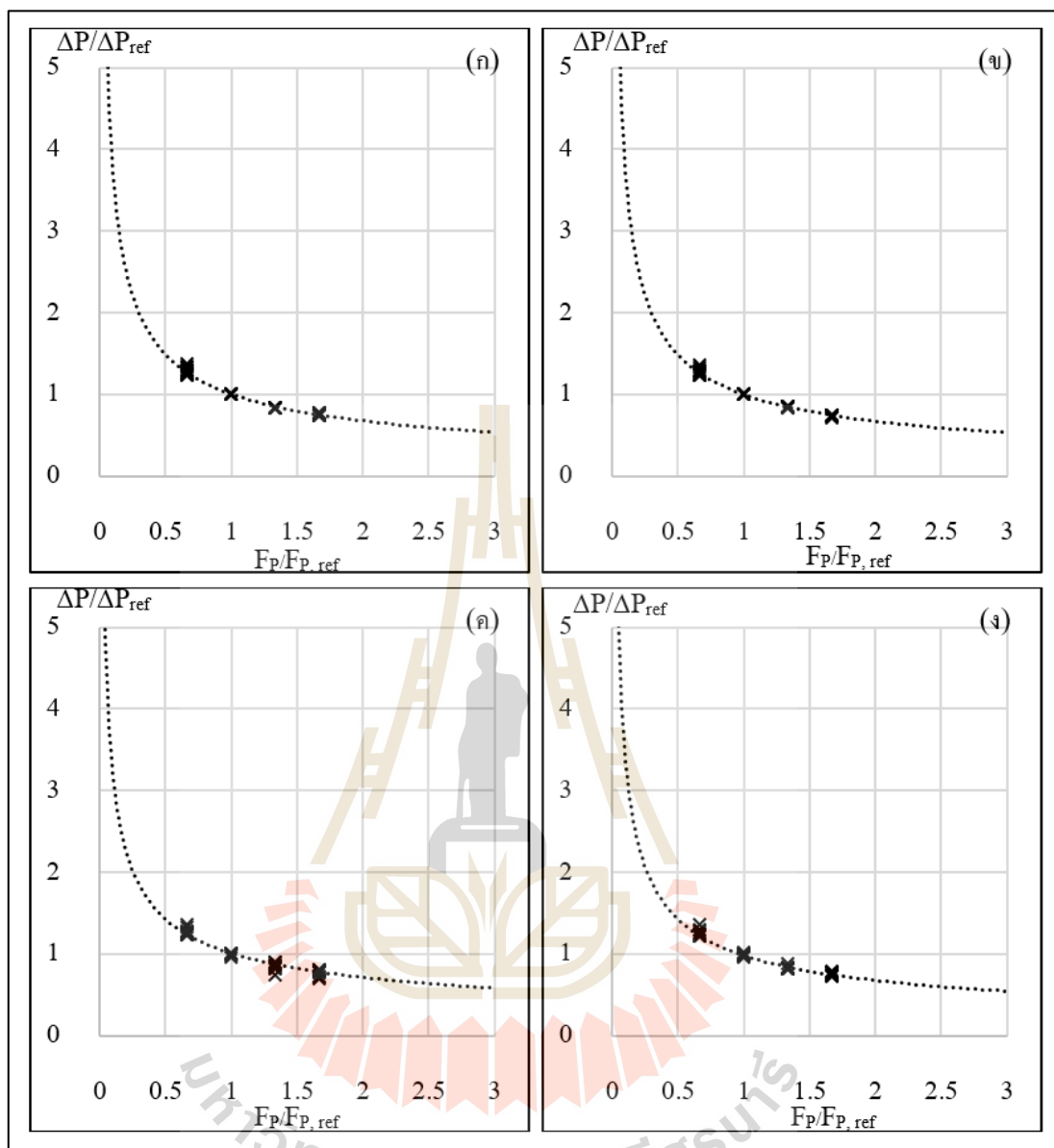


รูปที่ ข.4 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ ที่มุมเอียง 45 องศา
(ความสูงครีป (ก) 2 mm (ข) 3 mm (ค) 4 mm และ (ง) 5 mm)



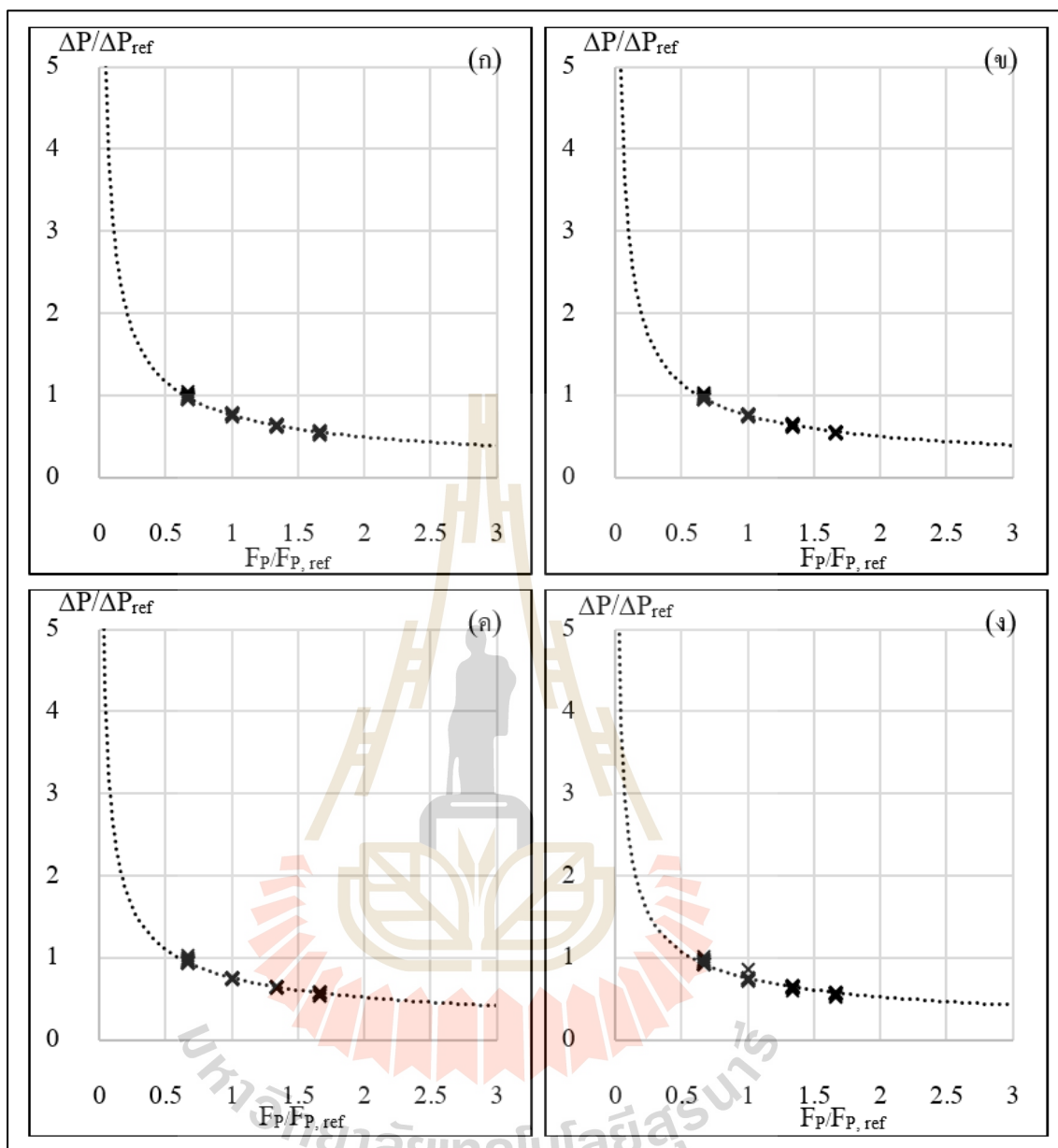
รูปที่ ข.5 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีปที่ระยะพิทซ์ 1.75 mm

(มุมเอียงครีป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)

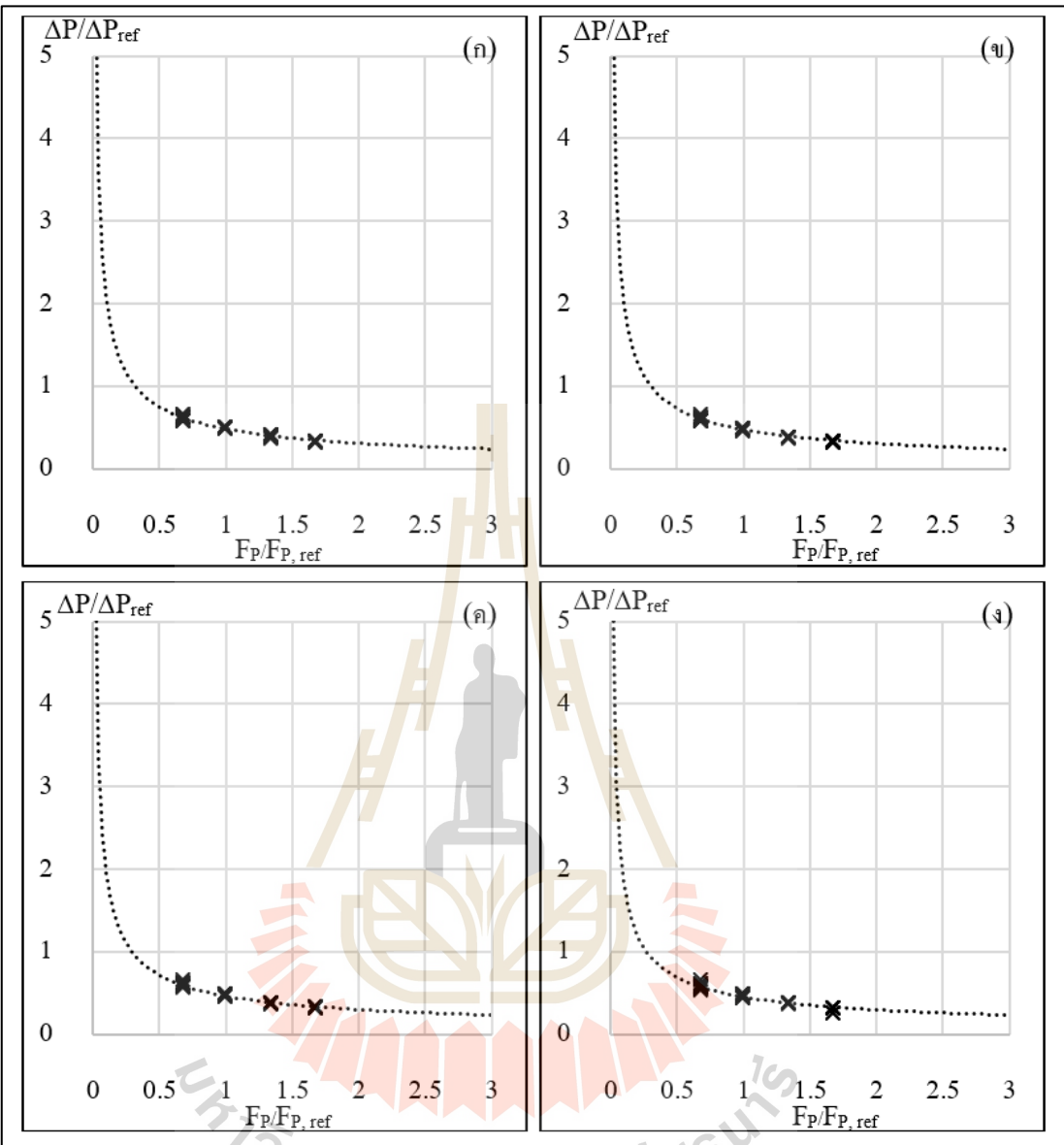


รูปที่ ข.6 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีปที่ระยะพิทซ์ 2.613 mm

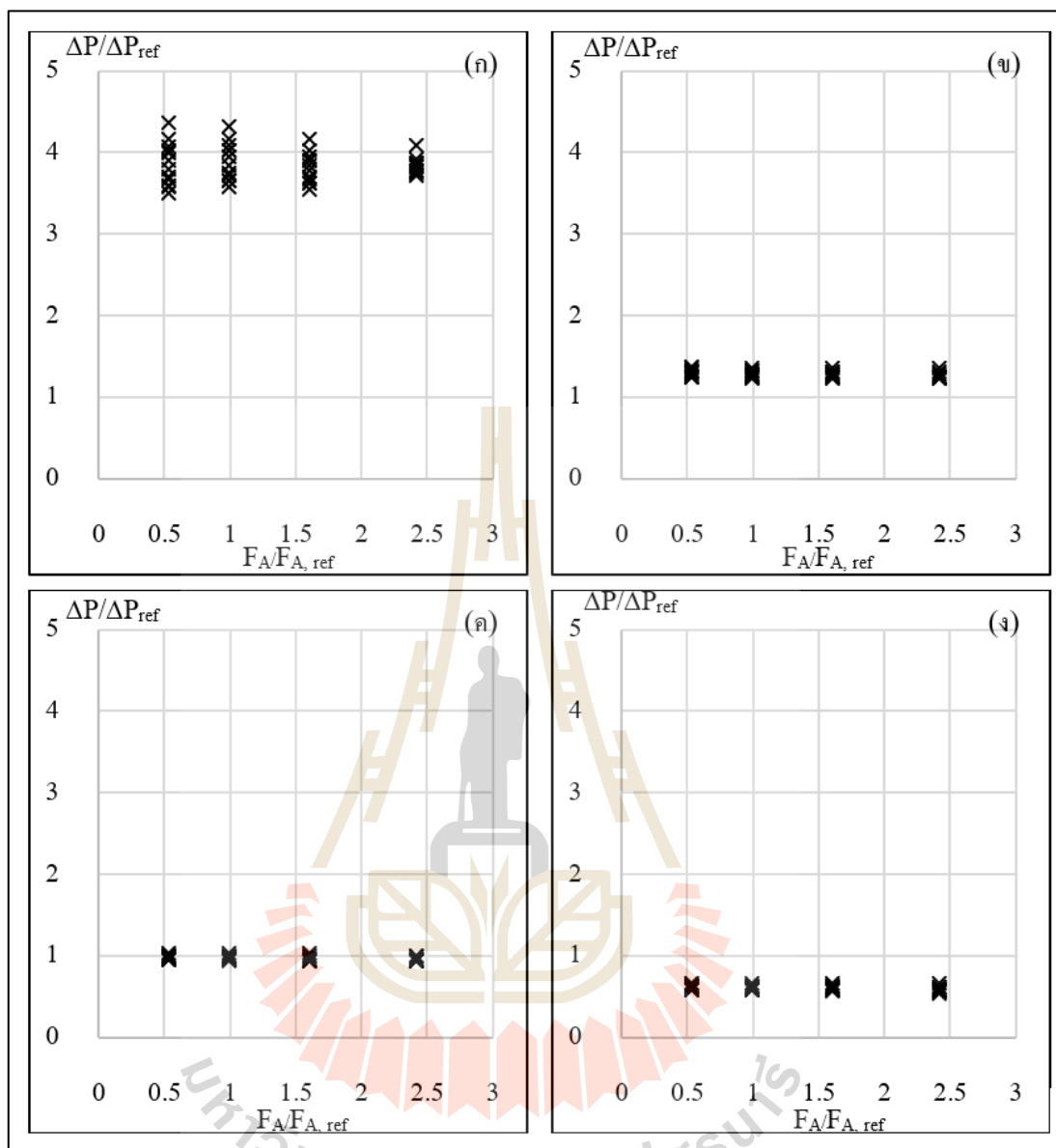
(มุมเอียงครีป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)



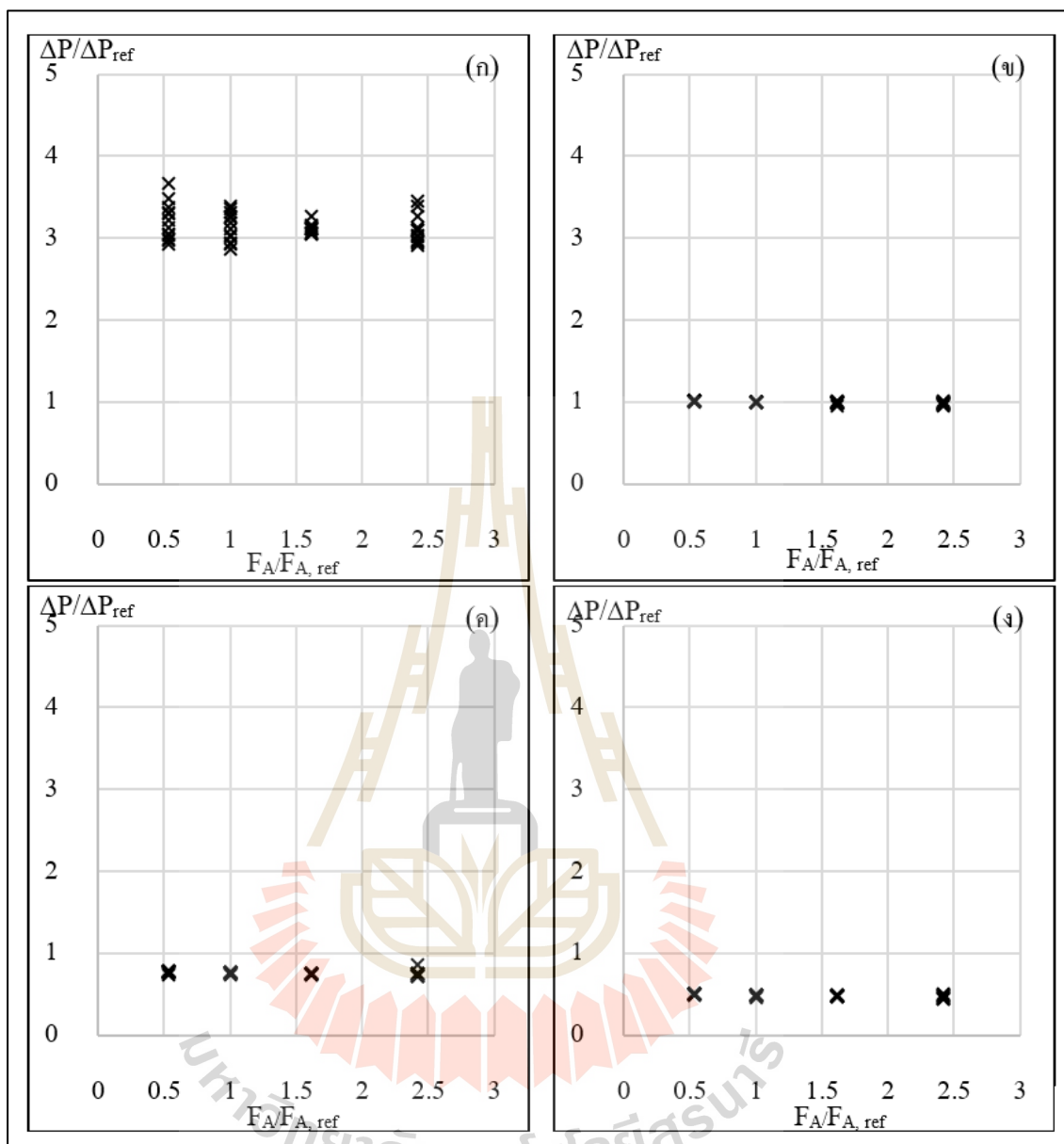
รูปที่ ข.7 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีปที่ระยะพิทซ์ 3 mm
(มุมเอียงครีป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)



รูปที่ ข.8 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีปที่ระยะพิทซ์ 4 mm
(มุมเอียงครีป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)

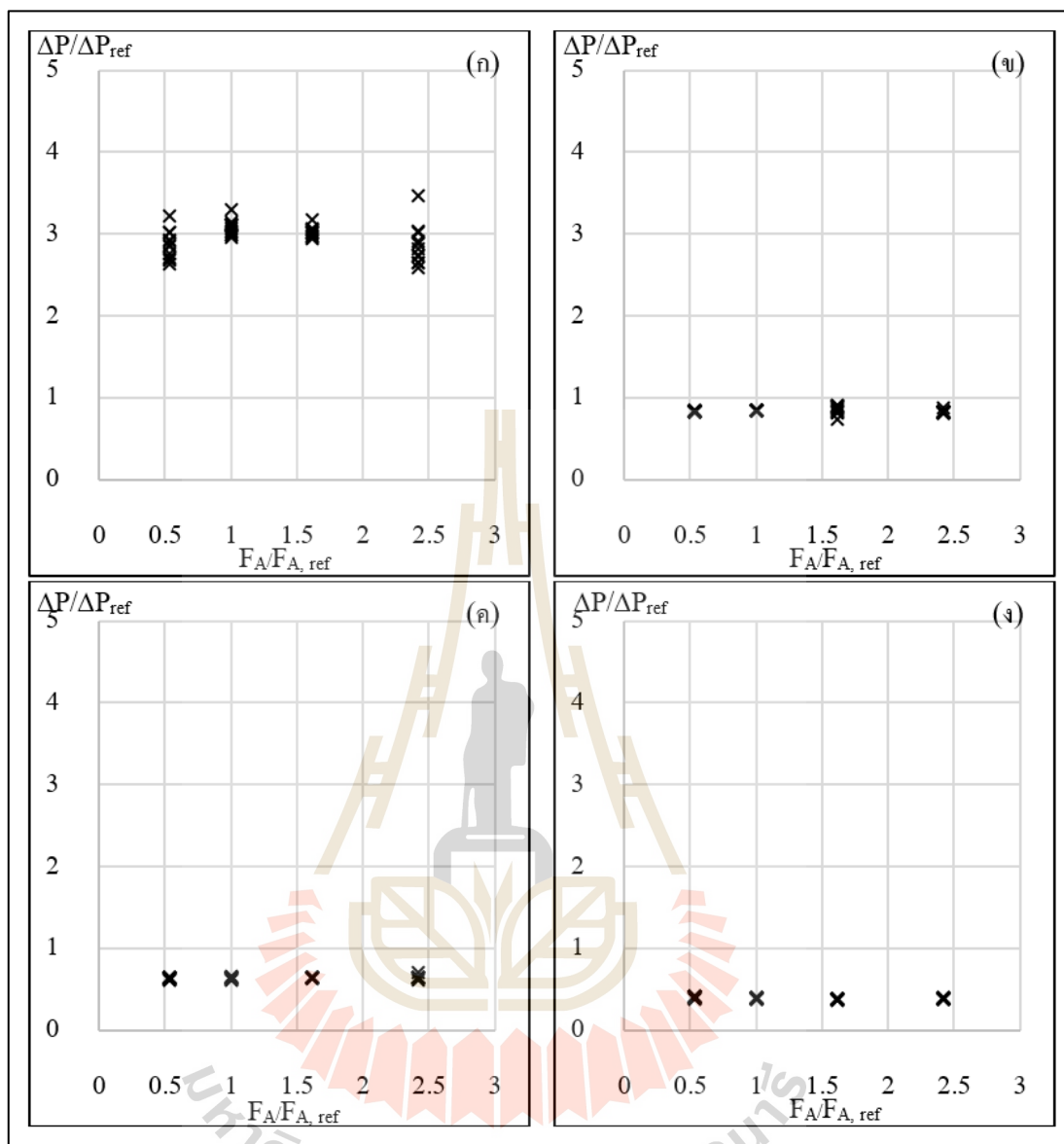


รูปที่ ข.9 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงกริปที่ระยะพิทซ์ 2 mm
(มมเอียงกริป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)



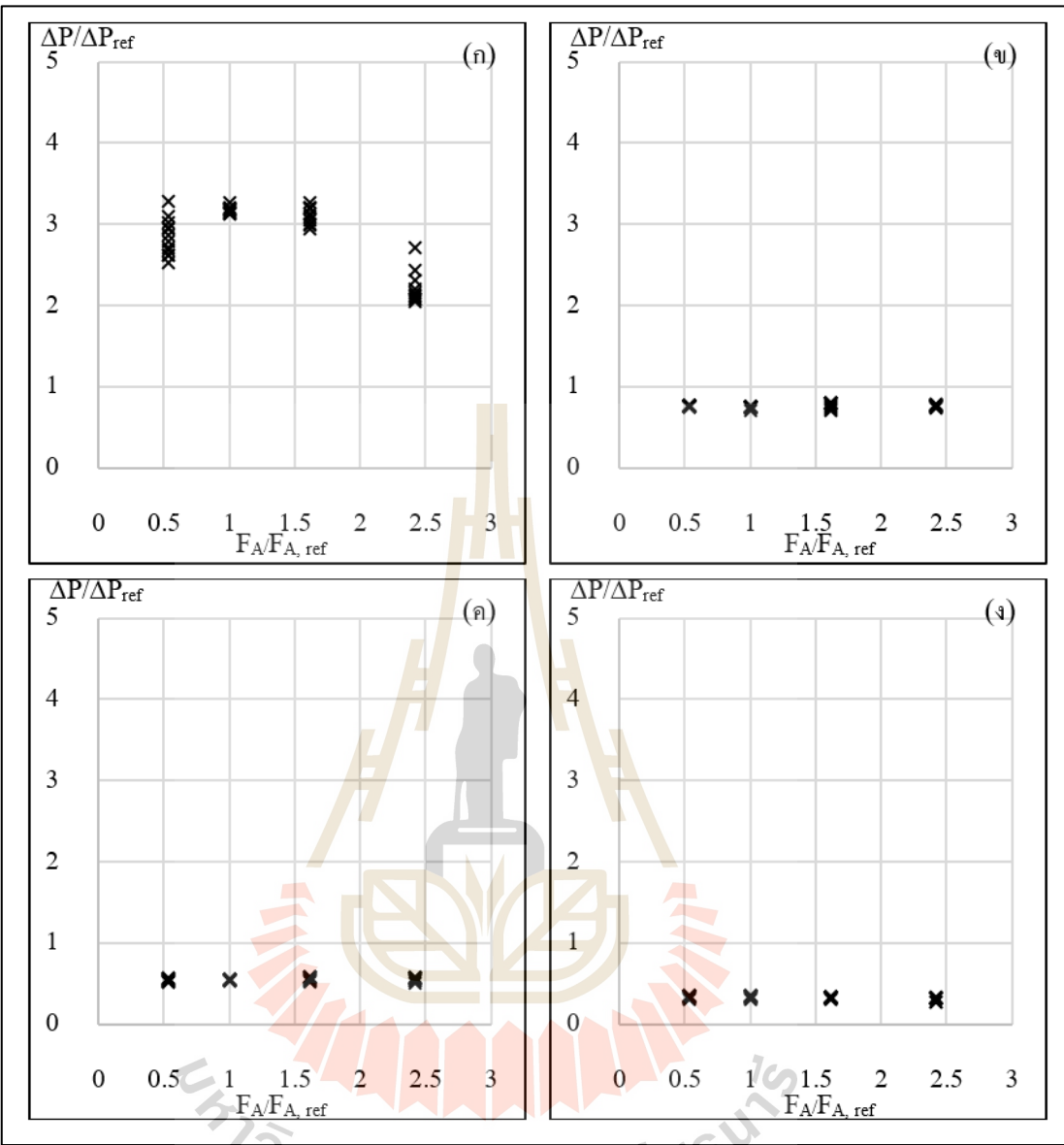
รูปที่ ข.10 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีบริบที่ระยะพิทช์ 3 mm

(มุมเอียงครีบริบ (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)



รูปที่ ข.11 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงกริบที่ระยะพิทซ์ 4 mm

(มมเอียงกริบ (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)



รูปที่ ข.12 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนความสูงครีปที่ระยะพิทซ์ 5 mm
 (มุมเอียงครีป (ก) 10 องศา (ข) 18.59 องศา (ค) 30 องศา และ (ง) 45 องศา)

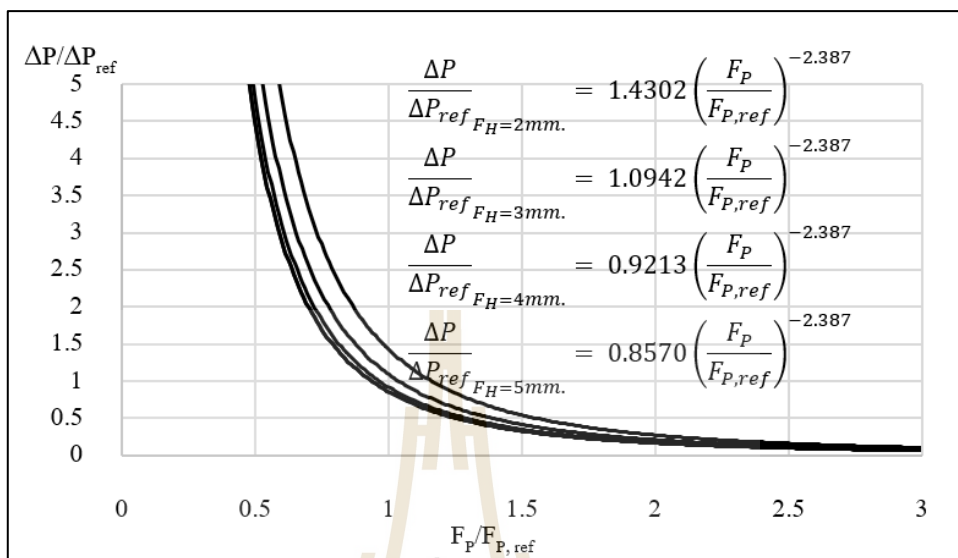


ภาคผนวก ค

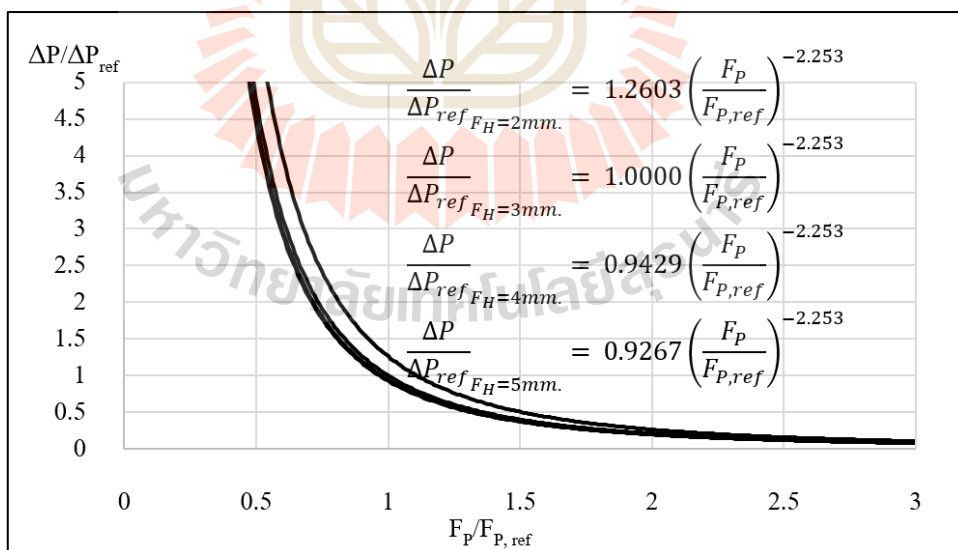
ความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมกับขนาดครีบบดแลกเปลี่ยนความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

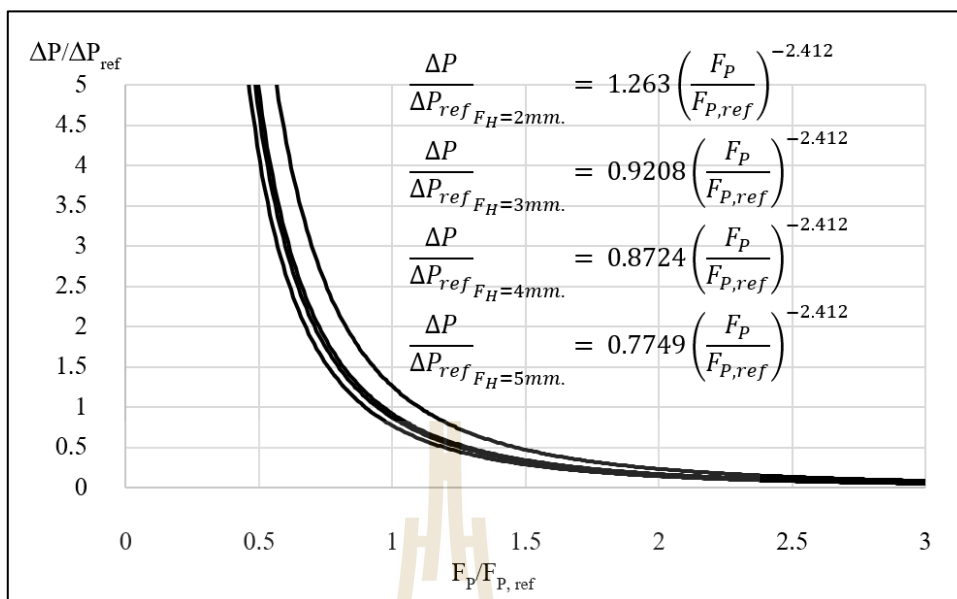
จากภาคผนวก ข. รูปที่ ข.1-ข.4 เมื่อนำกราฟในแต่ละรูปรวมไว้ด้วยกันจะได้ดังรูปที่ ค.1-4



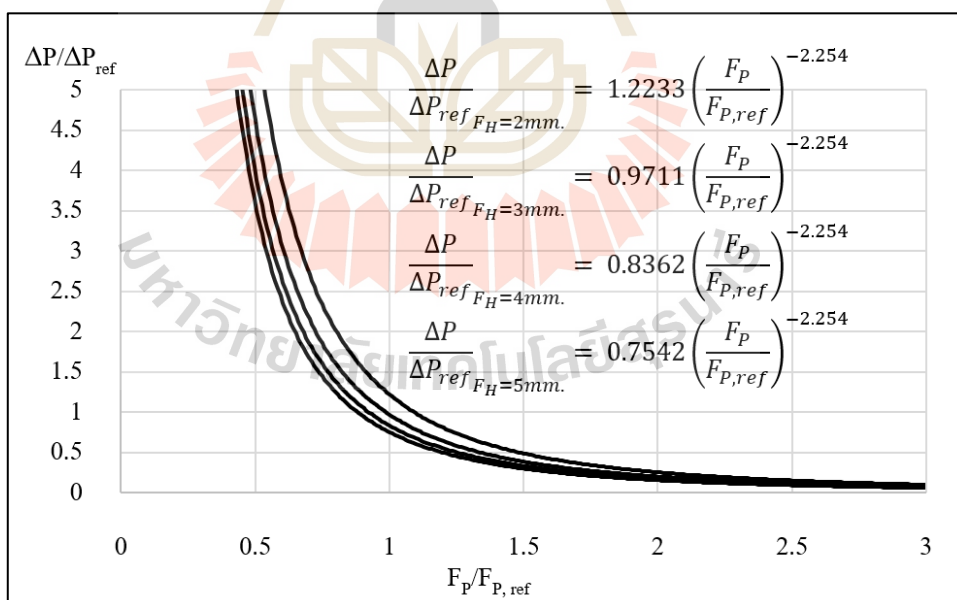
รูปที่ ค.1 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงกริบ 10 องศา (ความสูงกริบ 2, 3, 4, และ 5 mm เรียงจากบนลงล่าง)



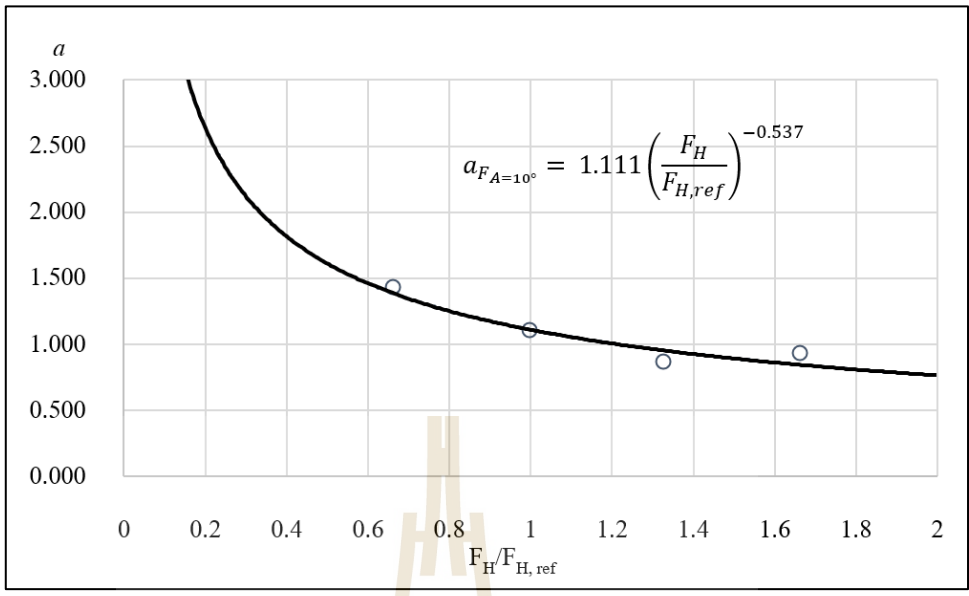
รูปที่ ค.2 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงกริบ 18.59 องศา (ความสูงกริบ 2, 3, 4, และ 5 mm เรียงจากบนลงล่าง)



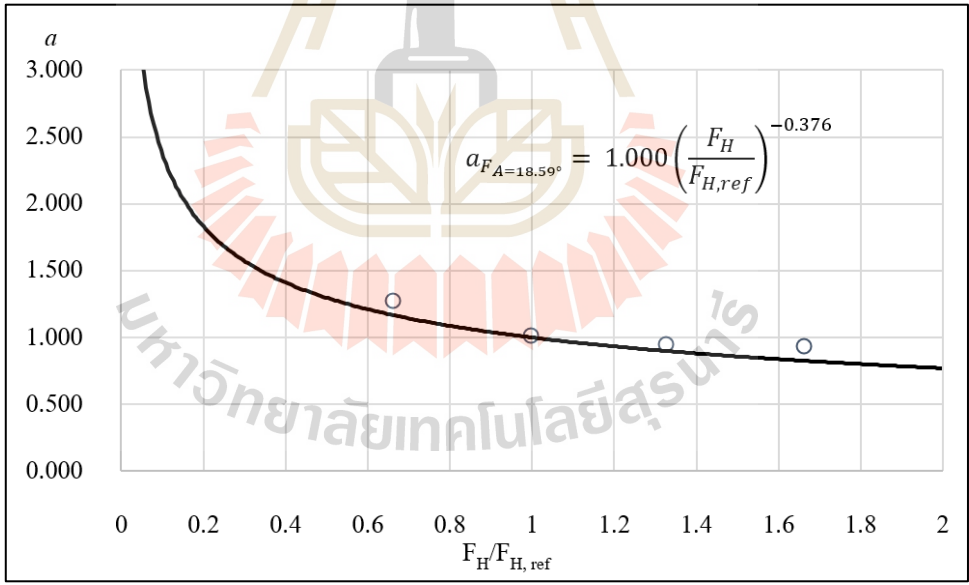
รูปที่ ก.3 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครึ่ง 30 องศา
(ความสูงครึ่ง 2, 3, 4, และ 5 mm เรียงจากบนลงล่าง)



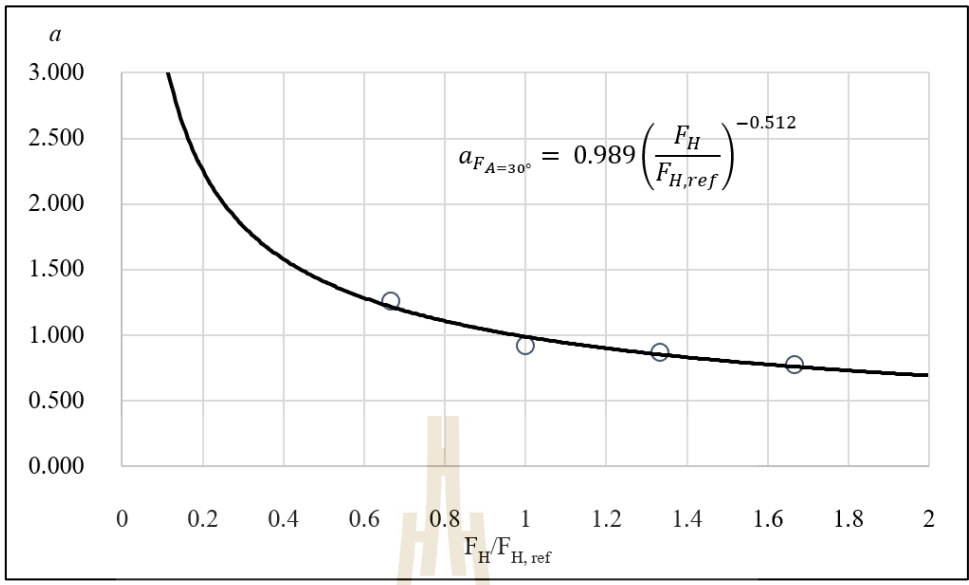
รูปที่ ก.4 สัดส่วนความดันตกคร่อมกับสัดส่วนระยะพิทซ์ที่มุมเอียงครึ่ง 45 องศา
(ความสูงครึ่ง 2, 3, 4, และ 5 mm เรียงจากบนลงล่าง)



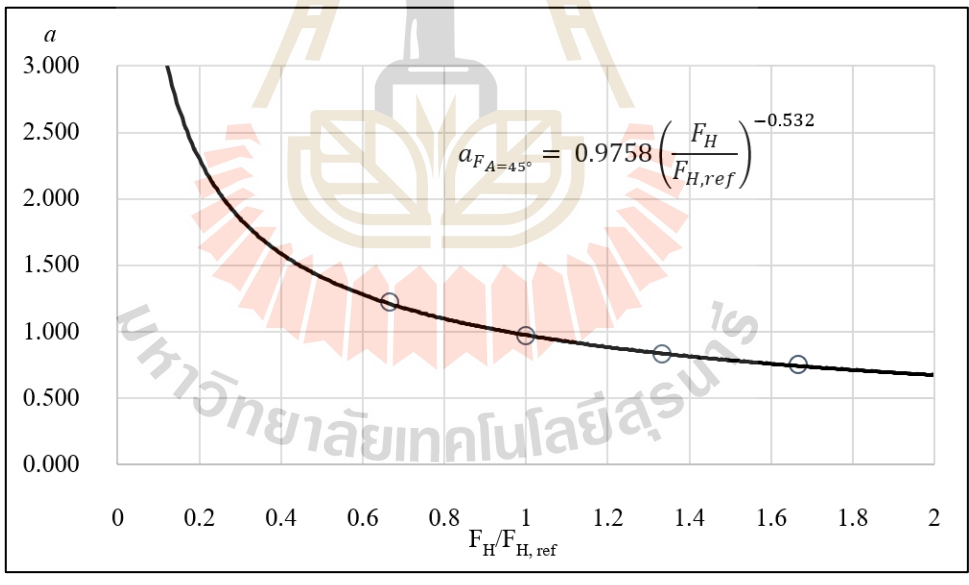
รูปที่ ค.5 สัมประสิทธิ์ α กับสัดส่วนความสูงกริบ ที่มุมเอียงกริบ 10 องศา



รูปที่ ค.6 สัมประสิทธิ์ α กับสัดส่วนความสูงกริบ ที่มุมเอียงกริบ 18.59 องศา



รูปที่ ค.7 สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงครีป ที่มุมเอียงครีป 30 องศา



รูปที่ ค.8 สัมประสิทธิ์ a กับสัดส่วนความสูงครีป ที่มุมเอียงครีป 45 องศา

ภาคผนวก ง

ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
1	1.75	2	10	40	37.56	27.76	26.09	98.74	77.04	21.98	185.37	147.84	20.25	297.23	240.14	19.20
	1.75	2	10	100	17.18	12.88	25.05	58.59	48.77	16.77	124.20	107.67	13.31	214.47	189.59	11.60
	1.75	2	10	120	15.56	12.25	21.30	54.95	47.81	12.99	118.49	106.68	9.97	206.40	188.87	8.49
2	1.75	2	18.59	40	37.23	26.22	29.57	98.59	73.45	25.50	185.82	141.70	23.75	298.63	230.95	22.66
	1.75	2	18.59	100	17.29	14.25	17.55	59.35	50.46	14.97	126.32	108.62	14.01	218.46	188.74	13.61
	1.75	2	18.59	120	15.70	10.26	34.62	55.84	42.80	23.36	120.71	97.60	19.15	210.28	174.67	16.93
3	1.75	2	30	40	35.91	26.37	26.57	95.16	73.18	23.09	179.72	140.43	21.86	289.59	228.12	21.23
	1.75	2	30	100	16.78	12.23	27.12	58.16	46.32	20.34	124.55	102.28	17.88	216.25	180.10	16.72
	1.75	2	30	120	15.30	11.63	23.97	54.99	45.41	17.42	119.51	101.34	15.21	209.14	179.41	14.21
4	1.75	2	45	40	35.27	25.36	28.11	92.53	70.37	23.95	175.67	135.03	23.14	284.59	219.34	22.93
	1.75	2	45	100	16.68	11.76	29.51	58.95	44.54	24.44	127.68	98.35	22.98	223.20	173.17	22.42
	1.75	2	45	120	15.48	11.19	27.71	56.77	43.67	23.08	124.61	97.44	21.80	219.45	172.51	21.39
5	1.75	3	10	40	31.62	22.79	27.91	82.19	63.25	23.05	153.60	121.36	20.99	246.00	197.14	19.86
	1.75	3	10	100	14.20	10.57	25.55	48.33	40.03	17.17	102.86	88.39	14.07	178.24	155.64	12.68
	1.75	3	10	120	12.83	10.05	21.65	45.45	39.25	13.66	98.51	87.58	11.10	172.38	155.05	10.06

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
6	1.75	3	18.59	40	29.27	21.55	26.40	79.53	60.36	24.11	150.28	116.43	22.52	241.95	189.78	21.56
	1.75	3	18.59	100	13.99	11.71	16.28	48.00	41.46	13.61	102.17	89.26	12.64	175.76	155.09	11.76
	1.75	3	18.59	120	12.71	8.43	33.65	45.17	35.17	22.15	97.04	80.20	17.36	168.14	143.53	14.64
7	1.75	3	30	40	28.25	21.70	23.18	74.07	60.21	18.71	141.44	115.54	18.31	230.77	187.68	18.67
	1.75	3	30	100	13.54	10.06	25.65	47.97	38.11	20.54	103.97	84.15	19.06	181.91	148.18	18.55
	1.75	3	30	120	12.59	9.57	23.94	46.22	37.36	19.16	101.57	83.38	17.91	178.93	147.61	17.50
8	1.75	3	45	40	29.83	20.90	29.95	77.15	57.99	24.83	153.82	111.28	27.66	231.58	180.77	21.94
	1.75	3	45	100	13.35	9.69	27.43	46.78	36.71	21.53	100.76	81.05	19.56	175.49	142.71	18.68
	1.75	3	45	120	12.32	9.22	25.16	44.84	35.99	19.74	97.92	80.30	17.99	171.59	142.17	17.15
9	1.75	4	10	40	27.81	19.81	28.76	71.54	54.98	23.15	132.86	105.51	20.59	211.96	171.39	19.14
	1.75	4	10	100	13.04	9.19	29.51	44.12	34.80	21.11	91.37	76.84	15.90	161.87	135.31	16.41
	1.75	4	10	120	11.64	8.74	24.90	41.04	34.12	16.86	88.64	76.14	14.11	154.63	134.79	12.83
10	1.75	4	18.59	40	28.42	18.74	34.04	74.24	52.51	29.27	141.45	101.29	28.39	230.77	165.10	28.46
	1.75	4	18.59	100	13.42	10.19	24.07	47.37	36.07	23.85	102.45	77.65	24.21	178.97	134.92	24.61
	1.75	4	18.59	120	12.34	7.34	40.53	45.15	30.59	32.24	98.99	69.77	29.52	174.04	124.86	28.26

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
11	1.75	4	30	40	27.36	18.89	30.94	72.52	52.43	27.70	137.42	100.61	26.79	224.11	163.42	27.08
	1.75	4	30	100	13.13	8.76	33.28	46.44	33.19	28.55	100.81	73.27	27.31	176.40	129.02	26.86
	1.75	4	30	120	12.19	8.33	31.63	44.81	32.53	27.40	98.49	72.60	26.29	173.26	128.53	25.82
12	1.75	4	45	40	29.93	18.22	39.13	71.76	50.56	29.55	131.27	97.01	26.10	206.38	157.58	23.64
	1.75	4	45	100	13.02	8.45	35.13	43.57	32.00	26.55	92.15	70.66	23.32	158.63	124.41	21.57
	1.75	4	45	120	11.64	8.04	30.94	40.78	31.37	23.07	87.61	70.01	20.10	151.98	123.94	18.45
13	1.75	5	10	40	28.35	17.78	37.30	73.38	49.33	32.78	137.07	94.65	30.95	219.51	153.75	29.96
	1.75	5	10	100	12.67	8.24	34.93	42.95	31.22	27.31	90.82	68.94	24.10	156.43	121.38	22.40
	1.75	5	10	120	11.44	7.84	31.45	40.21	30.61	23.87	86.39	68.30	20.94	148.44	120.92	18.54
14	1.75	5	18.59	40	28.22	16.82	40.39	74.00	47.13	36.32	143.07	90.92	36.45	236.06	148.18	37.23
	1.75	5	18.59	100	13.78	9.15	33.63	49.34	32.38	34.38	107.41	69.69	35.12	188.25	121.10	35.67
	1.75	5	18.59	120	12.78	6.59	48.46	47.27	27.46	41.91	104.15	62.62	39.87	183.48	112.07	38.92
15	1.75	5	30	40	28.24	16.97	39.90	75.49	47.09	37.62	145.49	90.36	37.89	236.79	146.79	38.01
	1.75	5	30	100	13.86	7.87	43.20	48.23	29.81	38.20	103.21	65.81	36.23	178.54	115.89	35.09
	1.75	5	30	120	12.78	7.49	41.41	46.02	29.22	36.49	99.55	65.21	34.50	173.29	115.45	33.38

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
16	1.75	5	45	40	23.45	16.38	30.17	57.52	45.45	20.99	105.22	87.21	17.11	167.54	141.67	15.44
	1.75	5	45	100	9.66	7.60	21.40	33.31	28.77	13.64	71.57	63.52	11.25	124.52	111.85	10.18
	1.75	5	45	120	8.76	7.23	17.52	31.60	28.20	10.74	68.84	62.94	8.57	120.42	111.42	7.47
17	2.613	2	10	40	11.85	10.78	9.07	31.72	29.91	5.71	60.00	57.39	4.34	96.67	93.23	3.55
	2.613	2	10	100	5.60	5.00	10.77	19.56	18.93	3.19	42.37	41.80	1.34	74.35	73.61	1.00
	2.613	2	10	120	5.11	4.75	7.04	18.65	18.56	0.50	41.15	41.42	0.65	72.85	73.32	0.65
18	2.613	2	18.59	40	11.73	10.25	12.57	31.34	28.72	8.35	59.32	55.41	6.59	95.58	90.32	5.50
	2.613	2	18.59	100	5.54	5.57	0.62	19.37	19.73	1.88	42.06	42.48	1.01	73.93	73.81	0.16
	2.613	2	18.59	120	5.06	4.01	20.67	18.51	16.74	9.57	40.92	38.17	6.72	72.56	68.31	5.86
19	2.613	2	30	40	11.67	10.41	10.73	31.12	28.90	7.13	58.81	55.45	5.71	94.77	90.08	4.95
	2.613	2	30	100	5.49	4.83	12.09	19.32	18.29	5.32	42.09	40.39	4.04	74.13	71.12	4.06
	2.613	2	30	120	5.03	4.59	8.65	18.51	17.93	3.12	41.03	40.02	2.47	72.79	70.85	2.67
20	2.613	2	45	40	11.69	10.14	13.25	30.94	28.14	9.05	58.27	54.00	7.32	93.67	87.72	6.35
	2.613	2	45	100	5.43	4.70	13.32	19.04	17.81	6.42	41.47	39.33	5.16	73.03	69.26	5.17
	2.613	2	45	120	4.96	4.47	9.77	18.24	17.46	4.25	40.44	38.97	3.62	71.42	68.99	3.39

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
21	2.613	3	10	40	8.68	8.85	1.92	23.79	24.55	3.21	45.73	47.12	3.04	74.63	76.54	2.55
	2.613	3	10	100	4.34	4.10	5.46	15.56	15.54	0.08	34.11	34.32	0.61	60.26	60.42	0.28
	2.613	3	10	120	4.01	3.90	2.76	14.98	15.24	1.71	33.37	34.00	1.89	59.39	60.19	1.36
22	2.613	3	18.59	40	8.63	8.43	2.36	23.65	23.60	0.21	45.45	45.53	0.18	74.17	74.22	0.07
	2.613	3	18.59	100	4.31	4.58	6.19	15.45	16.22	4.98	33.86	34.91	3.10	59.75	60.65	1.51
	2.613	3	18.59	120	3.99	3.30	17.29	14.87	13.75	7.53	33.08	31.36	5.20	58.79	56.13	4.52
23	2.613	3	30	40	8.70	8.57	1.47	23.78	23.78	0.02	45.61	45.62	0.03	74.30	74.11	0.25
	2.613	3	30	100	4.10	3.97	3.07	15.24	15.05	1.26	33.71	33.23	1.43	59.72	58.51	2.02
	2.613	3	30	120	3.99	3.78	5.17	14.79	14.75	0.27	32.71	32.92	0.65	57.91	58.29	0.65
24	2.613	3	45	40	8.73	8.36	4.24	23.37	23.19	0.75	45.21	44.51	1.57	74.03	72.30	2.35
	2.613	3	45	100	4.08	3.88	4.96	15.01	14.68	2.18	33.17	32.42	2.29	58.76	57.08	2.86
	2.613	3	45	120	3.96	3.69	6.99	14.57	14.39	1.22	32.18	32.12	0.21	56.98	56.86	0.22
25	2.613	4	10	40	7.19	7.69	7.04	19.59	21.35	8.94	37.73	40.96	8.55	61.71	66.54	7.83
	2.613	4	10	100	3.59	3.57	0.70	12.89	13.51	4.86	28.30	29.83	5.41	50.08	52.53	4.90
	2.613	4	10	120	3.32	3.39	2.07	12.43	13.25	6.61	27.74	29.56	6.57	49.38	52.33	5.97

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
26	2.613	4	18.59	40	7.31	7.33	0.25	19.95	20.53	2.95	38.40	39.61	3.16	62.76	64.56	2.88
	2.613	4	18.59	100	3.65	3.98	9.13	13.08	14.11	7.85	28.59	30.37	6.20	50.34	52.76	4.82
	2.613	4	18.59	120	3.38	2.87	15.09	12.57	11.96	4.82	27.87	27.28	2.09	49.35	48.83	1.05
27	2.613	4	30	40	6.42	7.46	16.30	21.18	20.70	2.26	40.96	39.73	3.01	66.34	64.53	2.73
	2.613	4	30	100	3.88	3.46	10.87	13.40	13.10	2.21	28.56	28.93	1.30	49.23	50.95	3.50
	2.613	4	30	120	3.57	3.29	7.82	12.75	12.85	0.74	27.44	28.67	4.46	47.75	50.75	6.30
28	2.613	4	45	40	7.57	7.29	3.70	19.30	20.22	4.79	37.75	38.80	2.78	61.40	63.03	2.65
	2.613	4	45	100	3.56	3.38	5.07	12.72	12.80	0.59	27.85	28.26	1.47	48.98	49.76	1.58
	2.613	4	45	120	3.29	3.21	2.41	12.24	12.55	2.50	27.09	28.00	3.36	47.86	49.57	3.58
29	2.613	5	10	40	6.63	6.90	4.05	17.86	19.15	7.19	34.27	36.75	7.21	56.01	59.69	6.57
	2.613	5	10	100	3.26	3.20	1.79	11.74	12.12	3.23	25.86	26.76	3.47	45.83	47.12	2.83
	2.613	5	10	120	3.02	3.04	0.75	11.35	11.88	4.70	25.38	26.52	4.46	45.21	46.95	3.84
30	2.613	5	18.59	40	6.51	6.58	1.06	17.62	18.43	4.62	33.85	35.55	5.04	55.36	57.95	4.69
	2.613	5	18.59	100	3.07	3.58	16.45	11.46	12.66	10.47	25.39	27.26	7.33	44.90	47.36	5.47
	2.613	5	18.59	120	2.99	2.58	13.73	11.12	10.74	3.47	24.63	24.49	0.58	43.55	43.83	0.63

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
31	2.613	5	30	40	6.09	6.70	9.96	16.98	18.60	9.52	33.66	35.68	6.00	56.28	57.96	3.00
	2.613	5	30	100	3.30	3.11	5.86	12.23	11.77	3.78	26.99	25.99	3.73	47.63	45.76	3.92
	2.613	5	30	120	3.11	2.96	5.08	11.85	11.54	2.63	26.37	25.75	2.35	46.75	45.59	2.48
32	2.613	5	45	40	6.69	6.55	2.03	18.20	18.18	0.11	35.19	34.88	0.89	57.57	56.66	1.58
	2.613	5	45	100	3.33	3.04	8.83	11.76	11.51	2.13	25.50	25.40	0.36	44.67	44.73	0.15
	2.613	5	45	120	3.06	2.89	5.55	11.23	11.28	0.46	24.71	25.17	1.85	43.55	44.56	2.32
33	3	2	10	40	8.97	7.78	13.26	24.03	21.59	10.17	45.46	41.43	8.86	73.30	67.30	8.19
	3	2	10	100	4.25	3.61	15.09	14.88	13.67	8.13	32.36	30.17	6.76	56.90	53.13	6.63
	3	2	10	120	3.88	3.43	11.61	14.23	13.40	5.87	31.50	29.90	5.11	55.80	52.93	5.15
34	3	2	18.59	40	8.89	7.42	16.56	23.81	20.79	12.70	45.03	40.10	10.94	72.60	65.36	9.98
	3	2	18.59	100	4.21	4.03	4.13	14.75	14.28	3.17	32.13	30.74	4.32	56.56	53.41	5.56
	3	2	18.59	120	3.85	2.90	24.46	14.13	12.11	14.27	31.32	27.62	11.81	55.52	49.43	10.97
35	3	2	30	40	8.85	7.56	14.57	23.55	20.98	10.89	44.46	40.26	9.44	71.67	65.40	8.75
	3	2	30	100	4.15	3.51	15.57	14.60	13.28	9.03	31.87	29.32	8.00	56.22	51.64	8.15
	3	2	30	120	3.80	3.34	12.22	14.01	13.02	7.05	31.12	29.06	6.64	55.28	51.44	6.95

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
36	3	2	45	40	8.80	7.40	15.91	23.34	20.52	12.07	43.91	39.38	10.30	70.53	63.97	9.30
	3	2	45	100	4.08	3.43	16.01	14.30	12.99	9.17	31.23	28.68	8.15	55.11	50.51	8.35
	3	2	45	120	3.73	3.26	12.44	13.73	12.74	7.21	30.52	28.42	6.89	54.30	50.31	7.34
37	3	3	10	40	6.46	6.39	1.16	17.37	17.72	2.06	34.76	34.01	2.15	56.90	55.24	2.91
	3	3	10	100	3.31	2.96	10.57	11.96	11.22	6.16	26.33	24.77	5.93	46.61	43.62	6.43
	3	3	10	120	3.07	2.82	8.29	11.55	11.00	4.81	25.81	24.54	4.93	45.99	43.45	5.52
38	3	3	18.59	40	6.40	6.10	4.73	17.78	17.08	3.92	34.32	32.95	3.99	56.13	53.71	4.32
	3	3	18.59	100	3.27	3.31	1.47	11.78	11.73	0.36	25.91	25.26	2.50	45.84	43.89	4.25
	3	3	18.59	120	3.03	2.39	21.19	11.37	9.95	12.49	25.39	22.70	10.61	45.19	40.62	10.12
39	3	3	30	40	6.36	6.22	2.12	17.58	17.26	1.78	33.89	33.13	2.25	55.36	53.81	2.79
	3	3	30	100	3.22	2.89	10.42	11.59	10.93	5.74	25.22	24.13	4.32	44.99	42.48	5.56
	3	3	30	120	2.98	2.74	8.04	11.18	10.71	4.19	24.91	23.91	4.05	44.29	42.32	4.44
40	3	3	45	40	7.39	6.10	17.51	17.85	16.91	5.26	33.69	32.46	3.67	54.18	52.72	2.68
	3	3	45	100	3.22	2.83	12.23	11.59	10.71	7.65	25.46	23.64	7.14	44.99	41.62	7.47
	3	3	45	120	2.88	2.69	6.79	10.67	10.50	1.59	23.68	23.42	1.08	42.08	41.47	1.47

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
41	3	4	10	40	5.25	5.55	5.86	14.62	15.41	5.37	28.37	29.57	4.20	46.59	48.03	3.08
	3	4	10	100	2.70	2.58	4.72	9.84	9.75	0.87	21.69	21.53	0.72	38.50	37.92	1.52
	3	4	10	120	2.51	2.45	2.44	9.52	9.56	0.40	21.34	21.34	0.00	38.05	37.77	0.73
42	3	4	18.59	40	5.28	5.30	0.41	14.66	14.86	1.34	28.51	28.66	0.55	46.93	46.72	0.45
	3	4	18.59	100	2.74	2.88	5.38	9.95	10.21	2.63	21.94	21.97	0.13	38.85	38.18	1.73
	3	4	18.59	120	2.55	2.08	18.52	9.63	8.66	10.08	21.52	19.74	8.26	38.33	35.33	7.80
43	3	4	30	40	5.45	5.42	0.56	15.06	15.03	0.20	29.22	28.84	1.28	47.97	46.85	2.32
	3	4	30	100	2.79	2.51	10.05	10.04	9.51	5.20	21.87	21.01	3.96	38.38	36.99	3.62
	3	4	30	120	2.59	2.39	7.75	9.63	9.33	3.09	21.24	20.81	1.99	37.43	36.85	1.55
44	3	4	45	40	5.63	5.31	5.67	14.30	14.75	3.10	28.27	28.29	0.09	46.97	45.96	2.15
	3	4	45	100	2.77	2.46	11.11	10.03	9.33	6.94	21.91	20.61	5.93	38.50	36.29	5.75
	3	4	45	120	2.61	2.34	10.30	9.72	9.15	5.90	21.50	20.42	5.05	38.03	36.15	4.95
45	3	5	10	40	4.42	4.98	12.69	12.23	13.82	13.00	23.80	26.52	11.42	39.27	43.09	9.73
	3	5	10	100	2.29	2.31	0.71	8.44	8.75	3.64	18.77	19.32	2.91	33.38	34.02	1.89
	3	5	10	120	2.15	2.20	2.26	8.22	8.58	4.29	18.50	19.14	3.47	33.03	33.89	2.58

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
46	3	5	18.59	40	4.62	4.76	3.13	12.61	13.34	5.76	24.77	25.73	3.88	40.08	41.94	4.62
	3	5	18.59	100	2.34	2.59	10.75	8.50	9.16	7.81	18.79	19.72	4.97	33.15	34.27	3.38
	3	5	18.59	120	2.18	1.86	14.37	8.23	7.77	5.52	18.37	17.72	3.51	32.67	31.72	2.92
47	3	5	30	40	4.66	4.87	4.33	12.33	13.50	9.50	24.30	25.91	6.63	40.45	42.08	4.05
	3	5	30	100	2.37	2.26	4.75	8.81	8.55	3.04	19.50	18.87	3.22	34.46	33.23	3.58
	3	5	30	120	2.23	2.15	3.93	8.55	8.38	2.04	19.08	18.70	2.04	33.82	33.10	2.14
48	3	5	45	40	4.66	4.78	2.54	12.28	13.26	7.92	24.70	25.44	2.98	41.52	41.32	0.49
	3	5	45	100	2.44	2.22	9.12	8.87	8.39	5.39	19.36	18.53	4.31	33.93	32.62	3.87
	3	5	45	120	2.29	2.11	7.90	8.52	8.23	3.43	18.77	18.36	2.20	33.06	32.50	1.70
49	4	2	10	40	5.78	3.95	31.77	15.41	10.95	28.94	28.99	21.01	27.52	46.57	34.13	26.72
	4	2	10	100	2.70	1.83	32.15	9.36	6.93	25.99	20.32	15.30	24.68	35.70	26.94	24.54
	4	2	10	120	2.46	1.74	29.12	8.94	6.79	24.00	19.76	15.16	23.28	34.90	26.84	23.09
50	4	2	18.59	40	5.75	3.78	34.19	15.30	10.60	30.75	26.77	20.44	23.62	46.19	33.32	27.87
	4	2	18.59	100	2.67	2.06	23.09	9.27	7.28	21.44	20.10	15.67	22.02	35.32	27.23	22.91
	4	2	18.59	120	2.43	1.48	39.12	8.84	6.17	30.18	19.55	14.08	27.97	34.54	25.20	27.04

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
51	4	2	30	40	5.68	3.88	31.71	15.05	10.77	28.44	28.20	20.67	26.70	45.21	33.57	25.74
	4	2	30	100	2.61	1.80	31.16	9.04	6.82	24.62	19.60	15.05	23.19	34.40	26.51	22.95
	4	2	30	120	2.38	1.71	27.94	8.63	6.68	22.52	19.04	14.92	21.66	33.61	26.41	21.44
52	4	2	45	40	5.61	3.83	31.70	14.73	10.63	27.81	27.49	20.40	25.79	43.91	33.14	24.52
	4	2	45	100	2.54	1.78	29.95	8.72	6.73	22.83	18.85	14.86	21.16	33.03	26.17	20.77
	4	2	45	120	2.30	1.69	26.45	8.30	6.60	20.53	18.27	14.72	19.42	32.24	26.07	19.14
53	4	3	10	40	4.22	3.24	23.22	11.74	8.99	23.46	22.69	17.25	23.98	37.15	28.02	24.59
	4	3	10	100	2.16	1.50	30.55	7.75	5.69	26.54	16.98	12.56	26.02	29.99	22.12	26.24
	4	3	10	120	2.00	1.43	28.63	7.46	5.58	25.23	16.60	12.45	25.05	29.55	22.03	25.43
54	4	3	18.59	40	4.01	3.11	22.40	11.25	8.71	22.61	21.85	16.80	23.13	35.83	27.38	23.60
	4	3	18.59	100	2.09	1.69	19.01	7.51	5.98	20.36	16.49	12.88	21.92	29.11	22.37	23.15
	4	3	18.59	120	1.93	1.22	37.04	7.24	5.07	29.95	16.13	11.57	28.28	28.63	20.71	27.69
55	4	3	30	40	4.12	3.19	22.48	11.42	8.86	22.38	22.02	17.01	22.78	35.98	27.62	23.22
	4	3	30	100	2.09	1.48	29.19	7.42	5.61	24.38	16.14	12.39	23.28	28.35	21.81	23.06
	4	3	30	120	1.92	1.41	26.81	7.10	5.50	22.60	15.69	12.27	21.80	27.45	21.73	20.86

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
56	4	3	45	40	4.29	3.16	26.41	11.49	8.76	23.76	22.07	16.81	23.80	35.93	27.31	23.97
	4	3	45	100	2.07	1.46	29.30	7.22	5.55	23.14	15.46	12.25	20.76	26.81	21.56	19.56
	4	3	45	120	1.91	1.39	27.23	6.89	5.44	21.04	14.95	12.13	18.85	26.09	21.48	17.67
57	4	4	10	40	3.23	2.82	12.80	9.16	7.81	14.65	17.92	14.99	16.35	29.56	24.36	17.60
	4	4	10	100	1.72	1.31	24.25	6.26	4.95	21.02	13.81	10.92	20.91	24.46	19.23	21.39
	4	4	10	120	1.60	1.24	22.60	6.06	4.85	19.97	13.55	10.82	20.15	24.14	19.16	20.64
58	4	4	18.59	40	3.25	2.70	16.92	9.04	7.58	16.17	17.52	14.61	16.57	28.76	23.82	17.17
	4	4	18.59	100	1.68	1.47	12.33	6.09	5.20	14.51	13.43	11.20	16.61	23.82	19.46	18.28
	4	4	18.59	120	1.56	1.06	32.15	5.89	4.41	25.13	13.18	10.07	23.64	23.46	18.01	23.22
59	4	4	30	40	3.15	2.78	11.66	8.83	7.72	12.58	17.21	14.81	13.95	28.33	24.05	15.11
	4	4	30	100	1.65	1.29	21.68	5.99	4.88	18.46	13.16	10.78	18.02	23.22	18.99	18.23
	4	4	30	120	1.54	1.23	20.17	5.78	4.79	17.12	12.86	10.69	16.89	22.83	18.92	17.13
60	4	4	45	40	3.28	2.75	16.14	9.12	7.64	16.26	17.70	14.66	17.18	29.03	23.81	17.98
	4	4	45	100	1.69	1.28	24.47	6.04	4.84	20.00	13.11	10.68	18.58	22.80	18.80	17.54
	4	4	45	120	1.57	1.21	22.49	5.75	4.74	17.58	12.61	10.58	16.12	22.17	18.73	15.53

ตารางที่ ง.1 ความคลาดเคลื่อนของสหสัมพันธ์และการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

กรณี ที่	F _p (mm)	F _H (mm)	F _A (degree)	T (°C)	Q = 5 (L/min)			Q = 10 (L/min)			Q = 15 (L/min)			Q = 20 (L/min)		
					SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR	SIM (kPa)	COR (kPa)	%ERR
61	4	5	10	40	2.69	2.53	6.00	7.52	7.01	6.77	14.79	13.45	9.02	24.50	21.85	10.81
	4	5	10	100	1.43	1.17	18.23	5.23	4.44	15.18	11.80	9.80	16.98	20.98	17.25	17.79
	4	5	10	120	1.35	1.11	17.21	5.17	4.35	15.87	11.63	9.71	16.51	20.75	17.18	17.18
62	4	5	18.59	40	2.65	2.43	8.39	7.46	6.80	8.83	14.66	13.12	10.54	24.34	21.38	12.16
	4	5	18.59	100	1.42	1.32	7.35	5.24	4.67	10.94	11.63	10.05	13.54	20.64	17.47	15.34
	4	5	18.59	120	1.34	0.95	28.85	5.10	3.96	22.31	11.43	9.03	20.95	20.35	16.17	20.57
63	4	5	30	40	2.68	2.50	6.95	7.45	6.93	7.00	14.56	13.30	8.66	24.04	21.60	10.14
	4	5	30	100	1.40	1.16	17.50	5.12	4.39	14.28	11.22	9.69	13.71	19.79	17.06	13.81
	4	5	30	120	1.31	1.10	15.93	4.93	4.30	12.80	10.96	9.60	12.39	19.43	16.99	12.55
64	4	5	45	40	2.82	2.47	12.37	6.40	6.87	7.27	12.55	13.18	4.97	20.98	21.41	2.05
	4	5	45	100	1.35	1.15	14.72	4.95	4.35	12.18	10.96	9.60	12.41	19.25	16.90	12.21
	4	5	45	120	1.27	1.09	13.71	4.82	4.26	11.54	10.65	9.51	10.73	18.82	16.84	10.53

หมายเหตุ SIM = ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์, COR = สหสัมพันธ์ (สมการที่ 4.10) และ %ERR = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ประวัติผู้เขียน

นายจยศ เทียนคำ เกิดเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พุทธศักราช 2532 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลวัดเพลง จังหวัดราชบุรี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียน โสภณศิริราษฎร์ จังหวัดราชบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอากาศยาน) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพุทธศักราช 2554 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพุทธศักราช 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก และในขณะที่ศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาพื้นฐานวิศวกรรมเครื่องกล ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และเขียนแบบวิศวกรรม

