

การจำลองการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปี่มในระบบปฐมภูมิ
ระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์



นายปัญญา แซ่ลี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

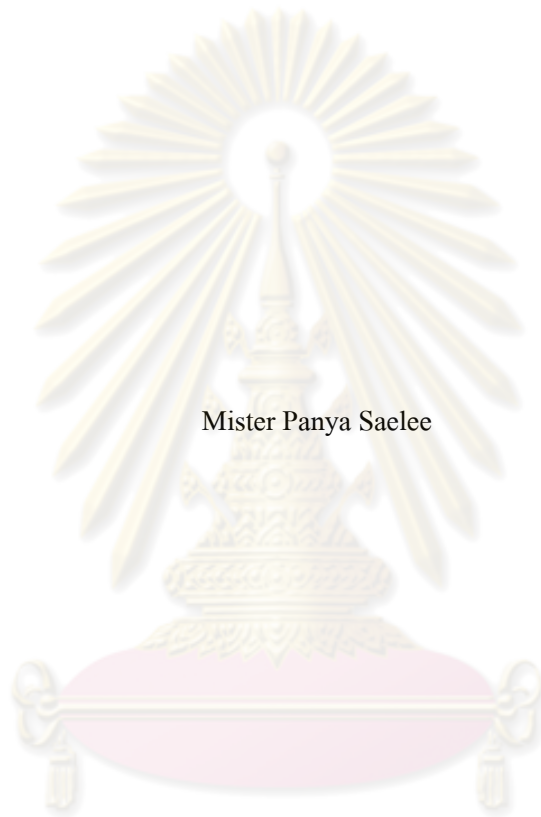
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF SINGLE PHASE FLOW CAUSED BY A PUMP IN THE PRIMARY
SYSTEM DURING A NUCLEAR REACTOR'S SHUT DOWN



Mister Panya Saelee

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปัมในระบบ
ปฐมภูมิระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

โดย

นายปัญญา แซ่ลี


สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

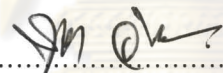
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณ โฆษิต

คณะกรรมการศาสตราจารย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทระโยธา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณ โฆษิต)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสติดิษฐ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)

ปัญหา แซ่ลี่ : การจำลองการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊มในระบบปฐมภูมิจาก
การหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์.(SIMULATION OF SINGLE PHASE FLOW CAUSED
BY A PUMP IN THE PRIMARY SYSTEM DURING A NUCLEAR REACTOR'S
SHUT DOWN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. สัตยชัย นิลสุวรรณ โษษิต, 84
หน้า.

โปรแกรมจำลองการไหลถูกพัฒนาเพื่อศึกษาระบบจำลองการไหลของน้ำสถานะเดียว ที่
อุณหภูมิคงที่ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้สมมติฐานว่าความร้อนในระบบไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ
การไหลในระบบ ซึ่งระบบจำลองเป็นแบบวงจรถัดมีจำนวนโหนดในระบบไม่เกิน 24 โหนด และ
ความยาวท่อรวมของระบบยาว 30 เมตร โดยมีความสูงของระบบ 5 เมตร ซึ่งความดันเริ่มต้นใน
ระบบมากที่สุดไม่เกิน 5 MPa. และน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่า 0.1 MPa. ซึ่งผลการคำนวณจากโปรแกรม
ชี้ให้เห็นว่า อัตราการไหลในระบบจะแปรผันกับความดันตั้งต้นในแต่ละโหนดและอัตราการไหล
ในระบบที่สภาวะคงตัวจะแปรผันกับกำลังของปั๊ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อนิติศ.....
ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

4970433521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : NUMERICAL / SIMULATION / SINGLE PHASE FORCED FLOW /
FORCED CONVECTION

PANYA SAELEE : SIMULATION OF SINGLE PHASE FLOW CAUSED BY A
PUMP IN THE PRIMARY SYSTEM DURING A NUCLEAR REACTOR'S SHUT
DOWN . THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SUNCHAI
NILSUWANKOSIT, Ph.D., 84 pp.

A computer program for flow simulation was developed to study the single phase water flow at temperature 35 °C . The heat in the system was assumed to not significantly affect the simulation. The number of nodes in the system was limited at 24. The system was a pipeline 30 meters long and 5 meters high. The initial pressure of the system was 0.1 Mpa. at the minimum and 5 MPa. at the maximum. According to the calculations, it was concluded that flow rate was varied by the initial pressure at each node and the steady flow rate was due to the pump power.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Nuclear Technology.....

Field of Study : Nuclear Technology.....

Academic Year : 2009.....

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโฆษิต ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุพิชชา จันทรโยธา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ เดโช ทองอร่าม อาจารย์กรรมการ และ อาจารย์ ดร. สชน วิจารย์วรรณลักษณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยอ่านและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ทำนุผู้วิจัยขอขอบพระคุณพระเจ้าผู้ทรงประทาน บิดา มารดา และพี่น้องที่ดียิ่งในการให้กำลังใจ และการสนับสนุนในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.8 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐมภูมิภายใต้เงื่อนไขก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	16
3.2 ขั้นตอนการนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเพื่อการคำนวณ.....	19

บทที่	หน้า
3.3 ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการคำนวณหาความดันและอุณหภูมิในแต่ละ โหนด.....	21
3.4 การพัฒนาปรับปรุงโปรแกรมเพื่อนำไปใช้งาน.....	23
3.5 การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐุมภุมิกาย ใต้เงื่อนไขหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	23
4 ผลการวิเคราะห์.....	24
4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะ เดียวในระบบปฐุมภุมิกายใต้เงื่อนไข ก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์.....	24
4.1.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 6 โหนด.....	24
4.1.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 24 โหนด.....	37
4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะ เดียวในระบบปฐุมภุมิกายใต้เงื่อนไข หลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์.....	44
4.2.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 6 โหนด.....	44
4.2.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 24 โหนด.....	57
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลการคำนวณโดย Cubic spline เทียบกับค่าจากตาราง Steam Table.....	13



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ระบบจำลองที่ทำการศึกษา.....	2
2.1	ปริมาตรจำลอง.....	7
3.1	ระบบจำลองกรณี 6 โหนดที่ใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ.....	20
3.2	รายละเอียดในเพิ่มข้อมูลเพื่อใช้คำนวณในกรณี 6 โหนด.....	22
3.3	แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม.....	22
4.1	ระบบจำลองกรณีมี 6 โหนดที่มีปั๊มในระบบ.....	24
4.2	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	25
4.3	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	26
4.4	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 2000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	27
4.5	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	28
4.6	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	29
4.7	กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	30
4.8	กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	31
4.9	กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 550 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	32
4.10	กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 2,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	33
4.11	กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด.....	34

บทที่ 1

บทนำ

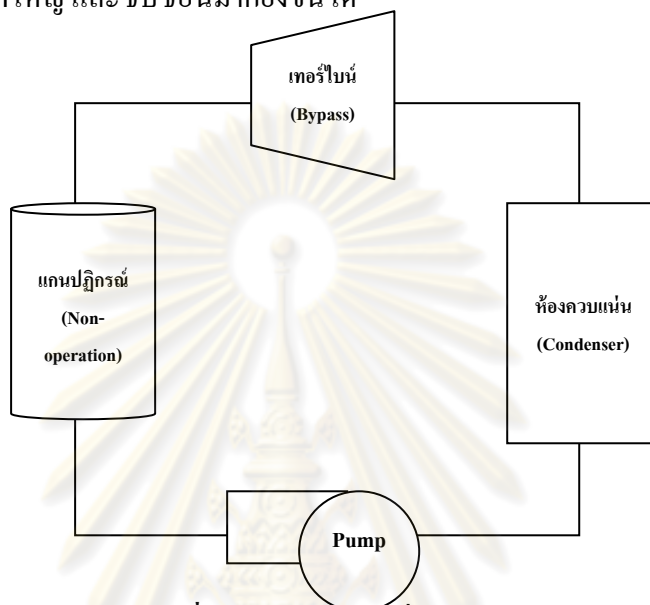
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เป็นทางเลือกหนึ่งที่เราไม่อาจมองข้ามไปได้ เนื่องจากพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในประเทศ อันได้แก่ พลังน้ำ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน มีจำกัด ประกอบกับพลังงานทดแทน เช่น แสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ ไม้โตเร็ว หรือชีวมวล ยังไม่อาจนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากต้นทุนการผลิตสูงและมีข้อจำกัดด้านแหล่งกำเนิดและพื้นที่ [1] ในขณะที่ความต้องการไฟฟ้ากลับมีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้โรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง และเนื่องจากโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ใช้พลังงานจากปฏิกิริยาฟิชชันในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานที่ปราศจากมลภาวะเป็นพิษทั้งหลายที่มีความใสสะอาด เมื่อเทียบกับพลังงานในรูปแบบอื่นๆ จึงไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางด้านสภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของโลกเราในขณะนี้อีกด้วย [2]

อย่างไรก็ตามพลังงานนิวเคลียร์ก็เป็นเรื่องที่มีความละเอียดอ่อน และเป็นสิ่งใหม่สำหรับประเทศไทยโดยเมื่อพิจารณาในขั้นต้นแล้ว อาจกล่าวได้ว่าต้องใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ทั้งยังมีปัญหาเนื่องจากประชาชนทั่วไปยังไม่ค่อยเข้าใจและยอมรับ โดยเฉพาะในเรื่องสถานที่ตั้ง โรงไฟฟ้า สถานที่ทิ้งกากเชื้อเพลิง และความรุนแรงของผลกระทบในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ [1] ซึ่งในกรณีของการเกิดอุบัตินั้นปัจจุบันมีการป้องกันอย่างดีมาก โดยในส่วนของเตาปฏิกรณ์จะมีระบบความปลอดภัยสูงถึงสามชั้น จึงยากที่จะมีรังสีรั่วไหลออกมา [3] แต่อย่างไรก็ตามการป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นมาเลยจะดีที่สุด และปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุก็คือ การทราบถึงระบบการไหลของของไหลในท่อในส่วนของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั่นเอง

การจำลองการไหลของของไหลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกับระบบขนาดใหญ่ไม่สามารถทำการทดลองในระบบจริงได้ การพิจารณาระบบจำลองจึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง รวมถึงลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบจริงได้เป็นอย่างดีอีกทางหนึ่ง ที่ผ่านมามีผู้ทำการศึกษาเรื่องนี้ในหลายๆ ด้าน เช่น มีการทำวิจัยเกี่ยวกับการวัดลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของการไหลแบบราบเรียบในท่อโค้ง [4] หรือ ต่อมาเริ่มมีการพัฒนามากขึ้นจึงเริ่มใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาใช้โดย Zienkiewicz และ Condina ได้ทำการวิจัยปรับปรุงวิธี ซีบีเอส (CBS ; Characteristic-Based Split algorithm) ให้สามารถนำไปใช้ทดสอบกับปัญหาหลายๆ แบบได้อาทิ เช่น ปัญหาการไหลความเร็วต่ำแบบหนืด ปัญหาการไหลความเร็วสูง

แบบอัดตัวได้ เป็นต้น [5] และ [6] ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาในอีกด้านหนึ่งคือจำลองแบบการไหลในท่อซึ่งจำลองจากระบบปฐมภูมิ (Primary System) อย่างง่าย ขณะที่ไม่มีการทำงานของแกนปฏิกรณ์ ในกรณีของไหลอยู่ในสถานะของเหลวโดยอยู่ในท่อระบบปิด และใช้ปั๊มในการขับเคลื่อนของเหลวภายในท่อคังรูปที่ 1 ซึ่งจะเป็นอีกองค์ความรู้หนึ่งต่อไป ในการที่จะได้นำไปใช้ในการจำลองระบบที่ใหญ่ และซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้



รูปภาพที่ 1.1 ระบบจำลองที่ทำการศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊มในระบบปฐมภูมิระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและคำนวณลักษณะการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊มในระบบปฐมภูมิระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
2. จำลองการไหลภายใต้เงื่อนไขก่อนเริ่มและหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยไม่พิจารณาความร้อนจากแกนปฏิกรณ์

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ของไหลที่ใช้ในการศึกษาคือ น้ำในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิเบื้องต้นคงที่ ที่ 35 องศาเซลเซียส
2. ความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ มีผลน้อยมากต่อการไหลของระบบ เมื่อเทียบกับผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากปั๊ม

3. ระบบจำลองมีความยาวท่อทั้งระบบรวม 30 เมตร ระบบมีความสูง 5 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกว้าง 0.03 เมตร โหนดหลังสุดก่อนถึงปั๊มมีปริมาตรคงที่ที่ 1 m^3 เป็นโหนดซึ่งจำลองถึงเก็บน้ำ โหนดอื่นๆมีปริมาตรเท่ากันซึ่งแปรตามจำนวนโหนด

4. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (C_d) มีค่าแปรผันตามความเร็วในระบบ

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. ระบบจำลองการไหลเป็นระบบปิด วงจรเดียว(one loop)
2. ระบบจำลองการไหลนี้ศึกษาของไหลที่สภาวะความดัน 0.1 MPa. ถึง 5 MPa.
3. โปรแกรมคำนวณนี้สามารถคำนวณในระบบจำลองไม่เกิน 24 โหนด

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข, การจำลอง, สถานะเดียวแบบพาสซีว, แรงเสียดทาน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการไหลสถานะเดียว ในระบบปฐภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และนำไปใช้ทดสอบแทนระบบจริงเพื่อลดค่าใช้จ่าย และความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบจริงได้

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องและวางแผนวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและโปรแกรมในการจำลองแบบการไหล
3. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อกรไหลของของไหล
4. สร้างโปรแกรมแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับคำนวณการไหลสถานะเดียวเนื่องจากแรงดันของปั๊ม
5. วิเคราะห์และปรับปรุงผลการคำนวณจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
6. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1. เสนอผลการวิจัยเรื่อง การคำนวณความดันในการจำลองการไหลสถานะเดียวแบบพาสซีว ในงานการประชุมสัมมนาวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ครั้งที่ 3 โดยผลการวิจัยที่นำเสนอคือ โปรแกรมจำลองการไหลที่ใช้กับระบบจำลองการไหลของน้ำสถานะเดียว ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส และความร้อนในระบบไม่มีผลต่อการไหลในระบบ ซึ่งระบบจำลองเป็นแบบ

วงจรมีจำนวนโหนดในระบบ ไม่เกิน 24 โหนด และความยาวท่อรวมของระบบยาว 30 เมตร โดยมีความสูงของระบบ 5 เมตร ซึ่งความดันเริ่มต้นในระบบมากที่สุดไม่เกิน 5 MPa. และน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่า 0.1 MPa. ผลที่ได้คือกำลังของปั๊มที่สามารถใช้ในการควบคุมการไหล จะแปรผันตรงกับความดันเริ่มต้นของระบบ

2. เสนอผลการวิจัยเรื่อง การคำนวณความเร็วในการจำลองการไหลสถานะเดียวแบบพาวังกับในงานการประชุมระดับกรมสมองการ สร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิจัย ทอมก. : วิถีวิจัยและการพัฒนาประเทศ ซึ่งผลงานวิจัยที่นำเสนอคือ โปรแกรมจำลองการไหลที่ได้พัฒนาเพื่อศึกษาระบบจำลองการไหลของน้ำสถานะเดียว ที่อุณหภูมิกองที่ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้สมมติฐานว่าความร้อนในระบบไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการไหลในระบบ ซึ่งระบบจำลองเป็นแบบวงจรมีจำนวนโหนดในระบบไม่เกิน 24 โหนด และความยาวท่อรวมของระบบยาว 30 เมตร โดยมีความสูงของระบบ 5 เมตร ซึ่งความดันเริ่มต้นในระบบมากที่สุดไม่เกิน 5 MPa. และน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่า 0.1 MPa. ซึ่งผลการคำนวณจากโปรแกรมชี้ให้เห็นว่า อัตราการไหลในระบบจะแปรผันกับกับความดันตั้งต้นในแต่ละโหนดและอัตราการไหลในระบบที่สภาวะคงตัวจะแปรผันตรงกับกำลังของปั๊ม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊ม ในระบบปฏุมภูมิตระหว่งการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอันดับแรก ที่เราต้องทราบถึงลักษณะการไหลของของไหลเป็นอย่างดี เพื่อจะทำการจำลองได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นสมการความต่อเนื่อง (Conservation of mass) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) และ สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานสำหรับของไหล จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษา

สมการพื้นฐานสำหรับของไหล

1. สมการความต่อเนื่องในระบบจุลภาค (Micro system) [7]

สมการความต่อเนื่องหรือสมการสมดุลของมวลของไหลขณะไหลไปบนทางไหลหนึ่ง พิจารณาภายใต้การไหลของของไหลใน 3 มิติ ได้ว่า

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{rate of} \\ \text{mass} \\ \text{accumulation} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{rate of} \\ \text{mass} \\ \text{in} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{rate of} \\ \text{mass} \\ \text{out} \end{array} \right\} \quad \dots (2.1)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}) \quad \dots (2.2)$$

โดยที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลในท่อ $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

v คือ ความเร็วของของไหล $\left(\frac{m}{s} \right)$

2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในระบบจุลภาค (Micro system) [7]

สมการสมดุลโมเมนตัมเมื่อพิจารณาภายใต้การไหลของของไหลใน 3 มิติ ได้ว่า

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{momentum} \\ \text{accumulation} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{momentum} \\ \text{in} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{momentum} \\ \text{out} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{sum of force} \\ \text{acting on} \\ \text{system} \end{array} \right\} \quad \dots (2.3)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{\nabla} \cdot \rho \bar{v} \bar{v}) - \bar{\nabla} p - \bar{F} + \rho \bar{g} \quad \dots (2.4)$$

โดยที่ $\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t}$ คือ อัตราการสะสมของโมเมนตัมภายในปริมาตรที่พิจารณา

F คือ ค่าแรงเสียดทานต่อปริมาตรของของเหลว $\left(\frac{N}{m^3} \right)$

p คือ ค่าความดัน $\left(\frac{N}{m^2} \right)$

g คือ ค่าความโน้มถ่วง $\left(\frac{m}{s^2} \right)$

3. สมการอนุรักษ์พลังงานในระบบจุลภาค (Micro system) [7]

สมการอนุรักษ์พลังงานเมื่อพิจารณาภายใต้การไหลของของไหลใน 3 มิติ สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right) = -(\bar{\nabla} \cdot [\rho \bar{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right)]) - \bar{\nabla} \cdot p \bar{v} - (\bar{\nabla} \cdot [\tau \cdot \bar{v}]) + \rho (\bar{v} \cdot \bar{g}) - (-\tau : \bar{\nabla} v) \quad \dots (2.5)$$

โดย $\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right)$ คือ อัตราการสะสมของพลังงานภายในปริมาตรที่พิจารณา

U คือ พลังงานภายในปริมาตรที่พิจารณา $\left(\frac{J}{kg} \right)$

τ คือ ค่าความเค้น $\left(\frac{kg}{m \cdot s^2} \right)$

อย่างไรก็ตามการแก๊สในระบบจลนศาสตร์มีความซับซ้อนเกินความจำเป็นในการใช้งาน ในการจำลองระบบขนาดใหญ่สมการที่ใช้ จึงถูกอินทิเกรตและ ดัดแปลงเป็นสมการระบบมหภาคโดยมีเงื่อนไขและสมมติฐานเบื้องต้นในการดัดแปลงสมการดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็น 1 มิติความเร็วในทิศทางอื่นๆ จะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์)
2. ความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ มีผลน้อยมากต่อการไหลของระบบ เมื่อเทียบกับผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากบีบ
3. ระบบจำลองเป็นวงจรมีความยาวท่อทั้งระบบรวม 30 เมตร ระบบมีความสูง 5 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกว้าง 0.03 เมตร โหนดหลังสุดก่อนถึงบีบมีปริมาตรคงที่ 1 m^3 เป็นโหนดซึ่งจำลองถึงเก็บน้ำ โหนดอื่นๆมีปริมาตรเท่ากันซึ่งแปรผกผันกับจำนวนโหนด เพื่อให้ปริมาตรรวมของระบบคงที่

ต่อไปเราจะทำการอินทิเกรตสมการในระบบจลนศาสตร์ตามเงื่อนไขดังกล่าว

1. สมการความต่อเนื่อง ในระบบมหภาค (Micro system) [7]

จากสมการ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v})$ อินทิเกรตเทียบปริมาตรทั้ง 2 ด้านของสมการจะได้

$$\int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \int -(\nabla \cdot \rho \vec{v}) dV \quad \dots (2.6)$$

โดยทฤษฎีบทของเกาส์จากการอินทิเกรตทั้งปริมาตร(V) จะแปลงเป็นการอินทิเกรตทั้งพื้นผิว (S) ดูจากรูปภาพที่ 2 จะได้สมการเป็น

$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot V) = \oint -\rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS \quad \dots (2.7)$$



รูปภาพที่ 2.1 ปริมาตรจำลอง

เนื่องจากพิจารณาการไหลใน 1 มิติ และความเร็วในทิศทางอื่นๆจะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก(เข้าใกล้ศูนย์) จึงได้สมการเป็น

$$\frac{d}{dt} m_{tot} = \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2 \quad \dots (2.8)$$

โดย $\frac{d}{dt} m_{tot}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลรวมของโหนด

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลเข้าสู่โหนด $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลออกจากโหนด $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\langle \bar{v}_1 \rangle$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่ไหลเข้าสู่โหนด $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\langle \bar{v}_2 \rangle$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่ไหลออกจากโหนด $\left(\frac{m}{s}\right)$

S_1 คือ พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลเข้าสู่โหนด (m^2)

S_2 คือ พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลออกจากโหนด (m^2)

V คือ ปริมาตรที่พิจารณา (m^3)

2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม ในระบบมหภาค (Micro system) [7]

จากสมการ $\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \bar{v} \bar{v}) - \nabla p - (\nabla \cdot \bar{\tau}) + \rho \bar{g}$ อินทิเกรตเทียบปริมาตร ทั้ง 2 ด้านของสมการ (2) จะได้

$$\int \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t} dV = \int [-(\nabla \cdot \rho \bar{v} \bar{v}) - \nabla p - (\nabla \cdot \bar{\tau}) + \rho \bar{g}] dV \quad \dots (2.9)$$

โดยทฤษฎีบทของเกาส์จากการอินทิเกรตทั้งปริมาตร(V) จะแปลงเป็นการอินทิเกรตทั้งพื้นผิว(S) แทนจะได้ว่า

$$\frac{d}{dt} P_{tot} = \oint -\rho \bar{v} \bar{v} \cdot \bar{n} dA + \oint -p \cdot \bar{n} dA + \oint -\bar{\tau} \cdot \bar{n} dA + \int \rho \bar{g} dV \quad \dots (2.10)$$

เนื่องจากพิจารณาการไหลใน 1 มิติ และความเร็วในทิศทางอื่นๆจะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) จะได้ว่า

$$\frac{d}{dt} P_{tot} = \rho_1 \langle \bar{v}_1^2 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2^2 \rangle S_2 + \{ p_1 S_1 - p_2 S_2 \} - \{ F \} + \{ m_{tot} g \} \quad \dots (2.11)$$

โดย $\frac{d}{dt} P_{tot}$ คือ อัตราการสะสมของโมเมนตัมของไหล

F คือ แรงเสียดทานของไหล $\left(\frac{N}{m^3} \right)$

p_1 คือ ความดันของของไหลที่ไหลเข้าสู่ไหล $\left(\frac{N}{m^2} \right)$

p_2 คือ ความดันของของไหลที่ไหลออกจากของไหล $\left(\frac{N}{m^2} \right)$

g คือ ค่าความโน้มถ่วง $\left(\frac{m}{s^2} \right)$

3. สมการอนุรักษ์พลังงาน ในระบบมหภาค (Macro system) [7]

จากสมการอนุรักษ์พลังงานในระบบจุลภาค

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right) = - (\nabla \cdot [\rho \bar{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right)]) - \nabla \cdot p \bar{v} - (\nabla \cdot [\tau \cdot \bar{v}]) + \rho (\bar{v} \cdot \bar{g}) - (-\tau : \nabla v) \quad \dots (2.12)$$

อินทิเกรตเทียบปริมาตรทั้ง 2 ด้านของสมการ (2) จะได้

$$\int \frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right) dV = \int [- (\nabla \cdot [\rho \bar{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right)]) - \nabla \cdot p \bar{v} - (\nabla \cdot [\tau \cdot \bar{v}]) + \rho (\bar{v} \cdot \bar{g}) - (-\tau : \nabla v)] dV \quad \dots (2.13)$$

โดยทฤษฎีบทของเกาส์จากการอินทิเกรตทั้งปริมาตร(V) จะแปลงเป็นการอินทิเกรตทั้งพื้นที่ผิว(A) แทนจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right) dV = \oint [- (\rho \bar{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + U \right)) - p \bar{v} - (\tau \cdot \bar{v}) - (-\tau : v)] \cdot \bar{n} dA + \int \rho (\bar{v} \cdot \bar{g}) dV \quad \dots (2.14)$$

เนื่องจากพิจารณาการไหลใน 1 มิติ และความเร็วในทิศทางอื่นๆจะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}U_{tot} = & \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle (U_1 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_1^2 \rangle) S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle (U_2 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_2^2 \rangle) S_2 \\ & + \{p_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2\} + C_d \{p_1 \langle \bar{v}_1^3 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2^3 \rangle S_2\} \\ & \dots (2.15) \end{aligned}$$

- โดย $\frac{d}{dt}U_{tot}$ คือ อัตราการสะสมของพลังงานของโหนด
 C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (m^2)
 U_1 คือ พลังงานของของไหลที่เข้าสู่โหนด ($\frac{J}{kg}$)
 U_2 คือ พลังงานของของไหลที่ออกจากโหนด ($\frac{J}{kg}$)

ในการแก้สมการทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องใช้สมการสถานะ (Equation of state) เพื่อใช้ระบุการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อุณหภูมิ และความดัน ในการจำลองนี้ โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ ในการระบุ ความสัมพันธ์ดังกล่าว

4. สมการสถานะ [8]

$$\rho_1 = \frac{\rho_0 E}{(1 + \beta (t_1 - t_0))(E - (p_1 - p_0))} \dots (2.16)$$

- โดยที่ ρ_0 คือความหนาแน่นของของไหลในช่วงเวลาเดิม ($\frac{kg}{m^3}$)
 ρ_1 คือความหนาแน่นของของไหลในช่วงเวลาใหม่ ($\frac{kg}{m^3}$)
 t_0 คือเวลาเดิม (s)
 t_1 คือเวลาใหม่ (s)
 p_0 คือความดันของของไหลในช่วงเวลาเดิม ($\frac{N}{m^2}$)
 p_1 คือความดันของของไหลในช่วงเวลาใหม่ ($\frac{N}{m^2}$)
 E คือ Bulk Modulus Fluid Elasticity some common Fluids
 ของน้ำ คือ 2.15×10^9 ($\frac{N}{m^2}$)
 β คือ Volumetric Temperature Coefficients
 ของน้ำ คือ 0.00021 ($\frac{1}{^\circ C}$)

นอกจากนี้เรายังจำเป็นต้องศึกษาถึงปั๊มที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหลในระบบ และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อ เพราะสองส่วนนี้มีความสำคัญต่อการไหลของของไหลในระบบอย่างมาก เราจึงศึกษาถึงสมการกำลังของปั๊มและ สมการแรงเสียดทาน โดยพิจารณาจากสมการดังนี้

5. สมการกำลังปั๊ม (Power of pump)

$$Power = \frac{P\Delta V}{\Delta t} \quad \dots (2.17)$$

โดย P คือ ความดัน $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
 V คือ ปริมาตร (m^3)
 t คือ เวลา (s)

6. สมการแรงเสียดทาน (Drag coefficient) [9]

เนื่องจากการศึกษาสมการแรงเสียดทานเราต้องทราบถึง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วย แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นแปรผันกับ สภาพการไหลในระบบ จึงต้องพิจารณาจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์(Reynolds number) ตามสมการดังนี้

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{u_m D}{\nu} \quad \dots (2.18)$$

โดย u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล $\left(\frac{m}{s}\right)$
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$
 ν คือ ความหนืดจลน์ของของไหล $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

ซึ่งสภาพการไหลของของไหล โดยใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เป็นเกณฑ์แบ่ง ออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หมายถึง การไหลที่มีลักษณะการไหลเป็นชั้นๆ อย่างราบเรียบ จะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 2,000
- 2) การไหลแบบปั่นป่วน(turbulent flow) หมายถึง การไหลที่มีสภาพปั่นป่วนลักษณะแบบสุ่ม (random) จะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 2 ,000 อย่างไรก็ตามตัวเลขนี้ยังขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวท่อและเงื่อนไขอื่นๆ อีก

ทั้งนี้เมื่อเราทราบสภาวะการไหลแล้วเราจึงจะสามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากความสัมพันธ์ดังนี้ [7]

$$\begin{aligned}
 C_d &= 0 && \text{เมื่อ} && \text{Re} = 0 \\
 C_d &= \frac{16.0}{\text{Re}} \cdot (2\pi RL) && \text{เมื่อ} && \text{Re} < 2100 \\
 C_d &= \frac{0.07991}{\text{Re}^{0.25}} \cdot (2\pi RL) && \text{เมื่อ} && 2100 \leq \text{Re} < 10^5 \\
 C_d &= 0.0044 \cdot (2\pi RL) && \text{เมื่อ} && \text{Re} \geq 10^5
 \end{aligned}$$

... (2.19)

โดย L คือ ความยาวของท่อ (m)
 R คือ รัศมีของท่อ (m)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาลักษณะการไหลแบบต่างๆ อย่างมากมาย โดย Agrawal [4] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวัดลักษณะการกระจายตัว ของความเร็วของการไหลแบบราบเรียบในท่อโค้ง โดยให้การไหลที่ปากทางเข้าท่อโค้งมีลักษณะการกระจายตัวของความเร็วแบบ (Uniform Flow) พบว่าเมื่อการไหลเริ่มต้นเข้ามาในท่อโค้ง จะเกิดการปรับตัวและพัฒนาเป็นลักษณะการไหลแบบ (Vortex) โดยของไหลที่บริเวณกลางท่อจะเคลื่อนที่จากผนังท่อโค้งด้านในไปที่ผนังท่อโค้งด้านนอก ส่วนของไหลที่บริเวณผนังท่อจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามคือจากผนังท่อโค้งด้านนอกไปที่ผนังท่อโค้งด้านใน โดยมีตำแหน่งของการไหลที่มีความเร็วตามแนวแกนสูงสุดเลื่อนจากจุดศูนย์กลางไปที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก

นอกจากนี้ เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนกร [10] ได้ทำวิจัยศึกษาการไหลแบบหมุนในท่อตรง พบว่า สำหรับการไหลแบบหมุนวนที่สมมาตรตามแนวแกน สามารถแบ่งลักษณะการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลได้อย่างสังเขปเป็น 3 บริเวณคือ 1) บริเวณที่ความดันสถิตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2) บริเวณถัดไปที่มีอัตราการลดลงของความดันสถิตช้าลงและประมาณเป็นเชิงเส้น และ 3) บริเวณที่มีการกระจายความดันสถิตเป็นเชิงเส้นแบบสภาวะ(Fully Developed Flow)

โดยมีสัมประสิทธิ์การสูญเสียในรูปของ Minor Loss แปรผันตามกำลังสองของค่า Swirl Number ส่วนในท่อโค้ง 90 องศาพบว่าในช่วงท่อโค้ง ($\alpha = 1 : 3.1$) แรงสู่ศูนย์กลางการไหลจากความโค้งท่อ มีผลเด่นชัดต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยในทุกกรณีจะมีค่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้ง ด้านนอกมากกว่าบริเวณผนังท่อโค้งด้านใน

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาในการศึกษาลักษณะการไหลแบบต่างๆ พบว่าขั้นตอนวิธีในการศึกษาต้องใช้เวลานาน ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความซับซ้อน การทดลองศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อมาได้มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยโดย Zienkiewicz และ Condina [6] นำเสนอระเบียบวิธีการแยกด้วยคุณลักษณะ (CBS ; Characteristic-Based-Split algorithm) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าวิธีซีบีเอสในการจัดการกับพจน์เนื่องจากการพา โดยย้ายพิกัดอ้างอิงไปอยู่บนแกนคุณลักษณะซึ่งเป็นแกนที่เคลื่อนที่ไปกับอนุภาคของของไหล เป็นผลให้สามารถรวมพจน์ของอนุพันธ์ย่อยเนื่องจากเวลาเข้ากับพจน์เนื่องจากการพา จากนั้นจึงทำการประมาณค่าความเร็วและความดันกลับมาอยู่บนแกนอ้างอิงตามเดิม นอกจากนี้วิธีซีบีเอสยังได้ประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณแบบแยกส่วนกันในการหาผลลัพธ์ของตัวแปรตั้งต้น วิธีการดังกล่าวลดการสิ้นของผลลัพธ์เนื่องจากการพา และสามารถเลือกใช้อันดับของฟังก์ชันการประมาณภายในสำหรับความเร็วและความดันที่เท่ากันได้ ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นและการคำนวณในลักษณะก้าวไปกับเวลาช่วยลดเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์ลงได้อย่างมาก ซึ่งภายหลัง Zienkiewicz และ Condina ได้ปรับปรุงวิธีซีบีเอสให้สามารถนำไปใช้ทดสอบกับปัญหาหลายๆแบบได้อาทิ เช่น ปัญหาการไหลความเร็วต่ำแบบหนืด ปัญหาการไหลความเร็วสูงแบบอัดตัวได้ ปัญหาการไหลของน้ำตื้น และปัญหาการไหลตัวกลางพูนเป็นต้น

ต่อมา พัชรี ชีระเอก [11] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบหนืดแต่ไม่มีการอัดตัวภายใต้สถานะอยู่ตัวในสองมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้วิธีการแยกด้วยคุณลักษณะ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการไหลได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากระบบสมการอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้นกับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อเพื่อหาผลลัพธ์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกันได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องกับปัญหาอย่างง่ายที่มีผลเฉลยแม่นยำตรง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องยิ่งขึ้นและลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลง จึงได้ประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติเข้ากับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคนิคดังกล่าวจะใช้ระเบียบวิธีเอลิเมนต์ขนาดเล็กในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์สูงและใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ต่ำ

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในการใช้จำลองระบบต่างๆ เพื่อนำมาสร้างเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ระบบโดย ปฎิคม แซ่หลี [12] ได้ทำการวิจัยศึกษา ระบบโครงข่ายการไหลของท่อทั่วไปซึ่งมีของไหลรูปเดียวในสภาวะคงที่ โดยพิจารณาการต่อกันของปมในระบบ อาจเป็นการต่อกันระหว่างท่อ หรือต่อกับอุปกรณ์ที่เป็นปั๊มหรือเครื่องอัดอากาศ การแก้ไขปัญหาระบบการไหล ทำโดยกำหนดสมการสมดุลของมวลที่ปมทุกๆ ปมในระบบโครงข่าย โดยพิจารณาให้อยู่ในรูปสมการของความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของของไหล โดยปริมาตรกับความดัน โดยทั่วไประบบสมการดังกล่าว จะหาคำตอบได้ยากเนื่องจากไม่ใช่สมการเชิงเส้นต้องใช้วิธีการพิเศษ เพื่อให้ได้ผลถูกต้องตามที่ต้องการ วิธีหนึ่งที่น่าสนใจใช้แก้สมการของระบบคือ เทคนิคการปฏิบัติซ้ำของ นิวตัน-ราฟสัน เทคนิควิธีนี้จะใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์และสมการทางพีชคณิตจัดการแก้ไขระบบสมการใหม่ ให้อยู่ในรูปสมการเมตริก ซึ่งการจัดเรียงตัวสัมประสิทธิ์ของสมการจะอยู่ในรูปแถบทะแยงมุมในเมตริกจัตุรัส โดยวิธีการ นิวตัน-ราฟสัน จะกระทำซ้ำจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเหมาะสมตามที่กำหนด

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊มในระบบปฐมภูมิระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ผ่านมาจึงได้ศึกษาสมบัติของของไหลที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยการสร้างโปรแกรมเพื่อค้นหาค่าความหนาแน่นของของไหลซึ่งแปรตามความดันและอุณหภูมิ จึงได้มีการนำความรู้เรื่องการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้วิธีการประมาณค่าตัวเลขในช่วงด้วยเส้นโค้ง (Cubic spline) [13] มาประมาณค่าตัวเลข จากตารางความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น ความดัน และ อุณหภูมิ ของน้ำที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 0 – 50 องศาเซลเซียส และความดันที่ 1 บาร์ โดยผลการประมาณค่าด้วยวิธีเส้นโค้ง ได้ผลดังตารางดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ผลการคำนวณโดย Cubic spline เทียบกับค่าจากตาราง Steam Table [14]

ค่าจากการคำนวณโดย Cubic spline		ค่าจริงจากตาราง	ความคลาดเคลื่อนจาก การคำนวณโดย Cubic spline เมื่อเทียบกับค่า จากตาราง โดยคิดเป็น เปอร์เซ็นต์
Pressure = 1 bar		Pressure = 1 bar	
Temperature	Density	Density	
0	999.82	999.82	0%
5	999.9023	999.99	0.00877%
10	999.74	999.74	0%
15	999.1544	999.14	0.001441%
20	998.23	998.23	0%
25	997.0778	997.06	0.001785%
30	995.65	995.65	0%
35	993.9333	994.03	0.009728%
40	992.21	992.21	0%
45	990.5691	990.21	0.036265%
50	988.03	988.03	0%

ซึ่งถ้าต้องการให้การประมาณค่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมากๆ เราสามารถแบ่งช่วงข้อมูล (fix curve) ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น จะทำให้การประมาณค่าตัวเลขมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการความถูกต้องของการประมาณค่า ว่าต้องการมากน้อยขนาดไหนเพราะจะมีผลต่อการทำงานของโปรแกรม นั่นคือถ้าต้องการความถูกต้องมากก็ต้องแบ่งช่วงให้ละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณของโปรแกรมมากขึ้นและอีกปัญหาหนึ่งที่พบคือ ต้องทำการแบ่งช่วงข้อมูลของความดันด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้นในการประมาณค่า ผู้วิจัยจึงได้เปลี่ยนแนวทางวิจัยใหม่ โดยใช้สมการสถานะในการคำนวณความหนาแน่นของน้ำ แทนวิธีการแบ่งช่วงข้อมูลบนเส้นโค้ง ซึ่งจะได้นำเสนอต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการทำงานเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ 1) การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐุมภูมิกายใต้เงื่อนไขก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และ 2) การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐุมภูมิกายใต้เงื่อนไขหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3.1 การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐุมภูมิกายใต้เงื่อนไขก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลจำเป็นต้องคำนวณหา ความหนาแน่น ความเร็ว และพลังงานในระบบ แล้วจึงคำนวณหา อุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยพิจารณาจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ที่ได้อินทิเกรตตัดแปลงสมการเป็นแบบมหภาค (สมการที่ 2.8, 2.11, และ 2.15) ทั้งนี้การคำนวณหาค่าความหนาแน่น ความเร็ว และพลังงานในระบบต้องคำนวณหาเป็นช่วงเวลา (Time step) เพื่อจะได้นำไปคำนวณหา อุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาได้ ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการ 2.8, 2.11, และ 2.15 ดังนี้

จากสมการ $\frac{d}{dt} m_{tot} = \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2$ แปลงให้อยู่ในรูปการคำนวณเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นในแต่ละช่วงเวลาจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \rho V}{\Delta t} &= \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2 \\ \rho_{new} &= \rho_{old} + [\rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2] \cdot \frac{\Delta t}{V} \end{aligned} \quad \dots (3.1)$$

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดท่อ (S) เท่ากันโดยตลอดจึงได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho_{new} &= \rho_{old} + [\rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle] \cdot \frac{\Delta t}{V} \cdot S \\ &= \rho_{old} + [\rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle] \cdot \frac{\Delta t}{L} \end{aligned} \quad \dots (3.2)$$

โดย ρ_{new} คือ ความหนาแน่นของของไหลในช่วงเวลาใหม่ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

ρ_{old} คือ ความหนาแน่นของของไหลในช่วงเวลาเดิม $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

L คือ ความยาวท่อในช่วงที่พิจารณา (m)

Δt คือ ช่วงเวลาในการพิจารณา (s)

จากสมการ $\frac{d}{dt} P_{tot} = \rho_1 \langle \bar{v}_1^2 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2^2 \rangle S_2 + \{ p_1 S_1 - p_2 S_2 \} - \{ F \} + \{ m_{tot} g \}$
 แปลงให้อยู่ในรูปการคำนวณเพื่อหาค่าความเร็ว โดยเราจะคำนวณหาค่าอัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ (Mass flux) ในแต่ละช่วงเวลาแทน จะได้

$$\Delta m v = \left[\rho_1 \langle \bar{v}_1^2 \rangle S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2^2 \rangle S_2 + \{ p_1 S_1 - p_2 S_2 \} - \{ F \} + \{ m_{tot} g \} \right] \cdot \Delta t$$

ต่อไปทำการแปลงพจน์ที่อยู่ในรูปของ มวล และความเร็วให้อยู่ในรูปของ ρv จะได้เป็น

$$(\rho_{new} v_{new} - \rho_{old} v_{old}) \cdot V = \left[\begin{array}{l} \left\{ \frac{(\rho_1 v_1)^2}{\rho_1} S_1 - \frac{(\rho_2 v_2)^2}{\rho_2} S_2 \right\} + \{ p_1 S_1 - p_2 S_2 \} + \{ \rho V g \} \\ - C_d \cdot \left\{ \frac{(\rho_1 v_1)^2}{\rho_1} S_1 - \frac{(\rho_2 v_2)^2}{\rho_2} S_2 \right\} \end{array} \right] \cdot \Delta t \quad \dots (3.3)$$

ให้ $mflx = \rho v$ จะได้สมการใหม่เป็น

$$mflx_{new} - mflx_{old} = \left[\begin{array}{l} \left\{ \frac{(mflx_1)^2}{\rho_1} - \frac{(mflx_2)^2}{\rho_2} \right\} S + \{ p_1 - p_2 \} S + \{ \rho_1 - \rho_2 \} g V \\ - C_d \cdot \left\{ \frac{(mflx_1)^2}{\rho_1} - \frac{(mflx_2)^2}{\rho_2} \right\} S \end{array} \right] \cdot \frac{\Delta t}{V}$$

$$mflx_{new} = mflx_{old} + \Delta t \cdot \left[\begin{array}{l} \left\{ \frac{(mflx_1)^2}{\rho_1} - \frac{(mflx_2)^2}{\rho_2} \right\} / L + \{ p_1 - p_2 \} / L \\ + \{ \rho_1 - \rho_2 \} g - C_d \cdot \left\{ \frac{(mflx_1)^2}{\rho_1} - \frac{(mflx_2)^2}{\rho_2} \right\} / L \end{array} \right] \quad \dots (3.4)$$

โดย $mflx_{new}$ คือ อัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัดท่อในช่วงเวลาใหม่ $\left(\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right)$

$mflx_{old}$ คือ อัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัดท่อในช่วงเวลาเดิม $\left(\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right)$

นอกจากนี้สมการ 3.4 ที่ได้จะถูกดัดแปลงสมการเพื่อให้ใช้ในการกำหนดกำลังของปั๊ม ในการขับเคลื่อนของไหลในระบบโดยพิจารณาจากสมการ 2.17 คือ

$$Power = \frac{P \Delta V}{\Delta t}$$

แปลงให้อยู่ในรูปการคำนวณกำลังของปั๊มจะได้เป็น

$$Power = \frac{P \cdot S \cdot mflx}{\rho} \quad \dots (3.5)$$

เพื่อให้นำไปใช้กับสมการ 3.4 จะแปลงสมการเป็นดังนี้

$$mflx_{new} = \frac{Power \cdot \rho_{old}}{S \cdot P_{old}} \quad \dots (3.6)$$

โดยสมการนี้จะแทนค่า $Power, \rho_{old}, S$ and P_{old} เพื่อคำนวณหาค่า $mflx_{new}$ สุดท้ายจากสมการ 2.15 คือ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} U_{tot} = & \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle (U_1 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_1^2 \rangle) S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle (U_2 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_2^2 \rangle) S_2 \\ & + \{ p_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2 \} + C_d \{ p_1 \langle \bar{v}_1^3 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2^3 \rangle S_2 \} \end{aligned}$$

แปลงให้อยู่ในรูปการคำนวณเพื่อหาพลังงานในระบบ ในแต่ละช่วงเวลาจะได้

$$\Delta(U + \frac{1}{2} v^2) \cdot \rho V = \left[\begin{aligned} & \rho_1 \langle \bar{v}_1 \rangle (U_1 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_1^2 \rangle) S_1 - \rho_2 \langle \bar{v}_2 \rangle (U_2 + \frac{1}{2} \langle \bar{v}_2^2 \rangle) S_2 \\ & + \{ p_1 \langle \bar{v}_1 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2 \rangle S_2 \} \\ & + C_d \{ p_1 \langle \bar{v}_1^3 \rangle S_1 - p_2 \langle \bar{v}_2^3 \rangle S_2 \} \end{aligned} \right] \cdot \Delta t \quad \dots (3.7)$$

ต่อไปทำการแปลงพจน์ที่อยู่ในรูปของ มวล และความเร็วให้อยู่ในรูปของ $mflx$ จะได้เป็น

$$\Delta \left[\left(U + \frac{mflx^2}{2\rho^2} \right) \cdot \rho \right] = \left[\begin{aligned} & \{ mflx_1 (U_1 + \frac{mflx_1^2}{2\rho_1^2}) - mflx_2 (U_2 + \frac{mflx_2^2}{2\rho_2^2}) \} \\ & + \left\{ p_1 \frac{mflx_1}{\rho_1} - p_2 \frac{mflx_2}{\rho_2} \right\} \\ & + C_d \left\{ p_1 \frac{mflx_1^3}{\rho_1^3} - p_2 \frac{mflx_2^3}{\rho_2^3} \right\} \end{aligned} \right] \cdot \frac{\Delta t \cdot S}{V}$$

$$U_{new} \cdot \rho_{new} + \frac{mflx_{new}^2}{2\rho_{new}} = U_{old} \cdot \rho_{old} + \frac{mflx_{old}^2}{2\rho_{old}} + \left[\begin{array}{l} \left\{ mflx_1 \left(U_1 + \frac{mflx_1^2}{2\rho_1^2} \right) - mflx_2 \left(U_2 + \frac{mflx_2^2}{2\rho_2^2} \right) \right\} \\ + \left\{ p_1 \frac{mflx_1}{\rho_1} - p_2 \frac{mflx_2}{\rho_2} \right\} \\ + C_d \left\{ p_1 \frac{mflx_1^3}{\rho_1^3} - p_2 \frac{mflx_2^3}{\rho_2^3} \right\} \end{array} \right] \cdot \frac{\Delta t}{L}$$

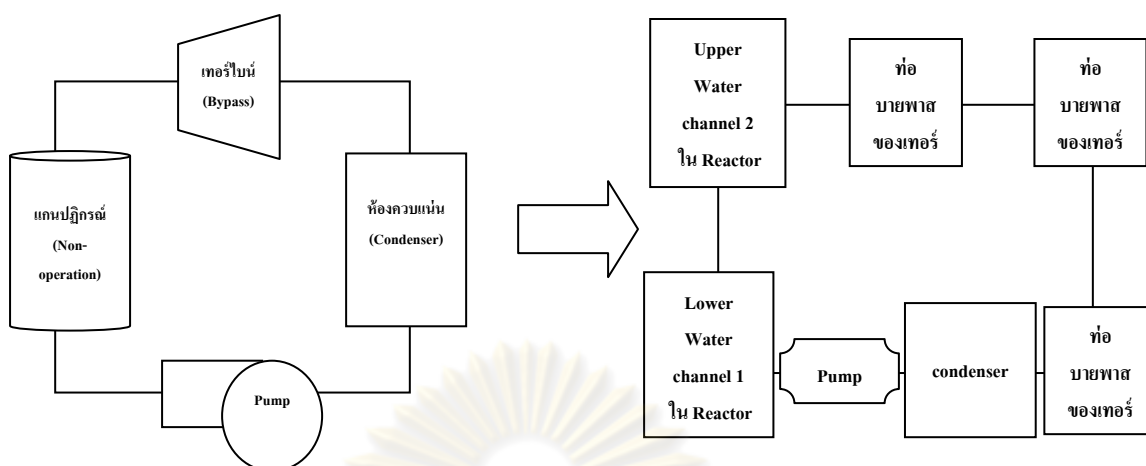
$$U_{new} = \left[\begin{array}{l} -\frac{mflx_{new}^2}{2\rho_{new}} + U_{old} \cdot \rho_{old} + \frac{mflx_{old}^2}{2\rho_{old}} \\ \left\{ mflx_1 \left(U_1 + \frac{mflx_1^2}{2\rho_1^2} \right) - mflx_2 \left(U_2 + \frac{mflx_2^2}{2\rho_2^2} \right) \right\} \\ + \left\{ p_1 \frac{mflx_1}{\rho_1} - p_2 \frac{mflx_2}{\rho_2} \right\} \\ + C_d \left\{ p_1 \frac{mflx_1^3}{\rho_1^3} - p_2 \frac{mflx_2^3}{\rho_2^3} \right\} \end{array} \right] \cdot \frac{\Delta t}{L} / \rho_{new} \quad \dots (3.8)$$

โดย U_{new} คือ พลังงานภายในระบบในช่วงเวลาใหม่ $\left(\frac{J}{kg} \right)$
 U_{old} คือ พลังงานภายในระบบในช่วงเวลาเดิม $\left(\frac{J}{kg} \right)$

โดยจะนำสมการ 3.2, 3.4, 3.6 และ 3.8 ที่ได้ นำมาจำลองเป็นโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น อัตราการไหลของมวล และพลังงานในระบบในแต่ละช่วงเวลา แล้วจึงใช้สมการสถานะ 2.16 เพื่อระบุความดัน และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา

3.2 ขั้นตอนการนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเพื่อการคำนวณ

3.2.1 นำข้อมูลที่จะนำไปใช้คำนวณบันทึกลงในโปรแกรม Notepad โดยจัดเรียงข้อมูลประเภทเดียวกันให้อยู่ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวอย่างเช่น ในการคำนวณหาความดันและอัตราการไหลในระบบจำลองกรณี 6 โหนด โดยมีรายละเอียดดังรูปภาพที่ 3.1



รูปภาพที่ 3.1 ระบบจำลองกรณี 6 โหนดที่ใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ

ข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณจะมี ปริมาตรแต่ละโหนด ความดันตั้งต้น อุณหภูมิ ระยะห่างแต่ละโหนด และค่าความโน้มถ่วงในการระบุตำแหน่งของแต่ละ โหนด โดยจะทำการบันทึกข้อมูลลงโปรแกรม Notepad ได้ดังรูปภาพที่ 3.2

0.0042	100000	35.0	5.0	0.0
0.0042	100000	35.0	10.0	-9.8
0.0042	100000	35.0	15.0	0.0
0.0042	100000	35.0	20.0	9.8
0.0042	100000	35.0	25.0	0.0
1.00	100000	35.0	30.0	0.0

รูปภาพที่ 3.2 รายละเอียดในแฟ้มข้อมูลเพื่อใช้คำนวณในกรณี 6 โหนด

โดยข้อมูลในคอลัมที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะเป็นดังนี้คือ ปริมาตรของโหนด ความดันตั้งต้น อุณหภูมิ ระยะห่างแต่ละโหนด และค่าความโน้มถ่วงในการระบุตำแหน่งของแต่ละ โหนด ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลในแต่ละแถวจะเป็นข้อมูลของโหนดที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

3.2.2 บันทึกไฟล์ข้อมูลลงในไฟล์เดอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อการเรียกใช้งานจากโปรแกรม

3.2.3 ใช้คำสั่งการเรียกข้อมูลจากนอกโปรแกรมมาคำนวณในโปรแกรม

3.3 ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการคำนวณหาความดันและอุณหภูมิในแต่ละโหนด

3.3.1 พิจารณาขนาดของขอบเขตของระบบ โดยกำหนดให้ความยาวของท่อในระบบยาวรวมทั้งสิ้น 30 m. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกว้าง 3 cm. และจำนวนโหนดทั้งหมดในระบบมี 6 โหนด โดยโหนดหลังสุดก่อนถึงปั๊มมีปริมาตรคงที่ที่ 1 m^3 เพราะเป็นโหนดที่จำลองถังเก็บน้ำ ส่วนโหนดอื่นๆ มีปริมาตรเท่ากันซึ่งแปรผกผันกับจำนวนโหนด เพื่อให้ปริมาตรรวมของระบบคงที่ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.1

3.3.2 อ่านข้อมูลนำเข้าซึ่งประกอบด้วย

- คุณสมบัติของของไหล ได้แก่ ความดัน และอุณหภูมิ
- ข้อมูลของทุกโหนด ได้แก่ ระยะห่างระหว่างโหนด ปริมาตรของโหนด และ ค่าแรงโน้มถ่วงของแต่ละโหนด
- กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรม ได้แก่ กำลังปั๊ม จำนวนโหนด ค่า Time step และ ค่ารัศมีของท่อ

3.3.3 คำนวณหาค่าความหนาแน่นในแต่ละโหนดจากสมการ 3.1

3.3.4 คำนวณหาค่า Mass flux ในแต่ละโหนดจากสมการ 3.2.1 และ 3.2.2

3.3.5 คำนวณหาค่าพลังงานในแต่ละโหนดจากสมการ 3.3

3.3.6 คำนวณหาค่าความดันในแต่ละโหนดจากสมการ 2.7

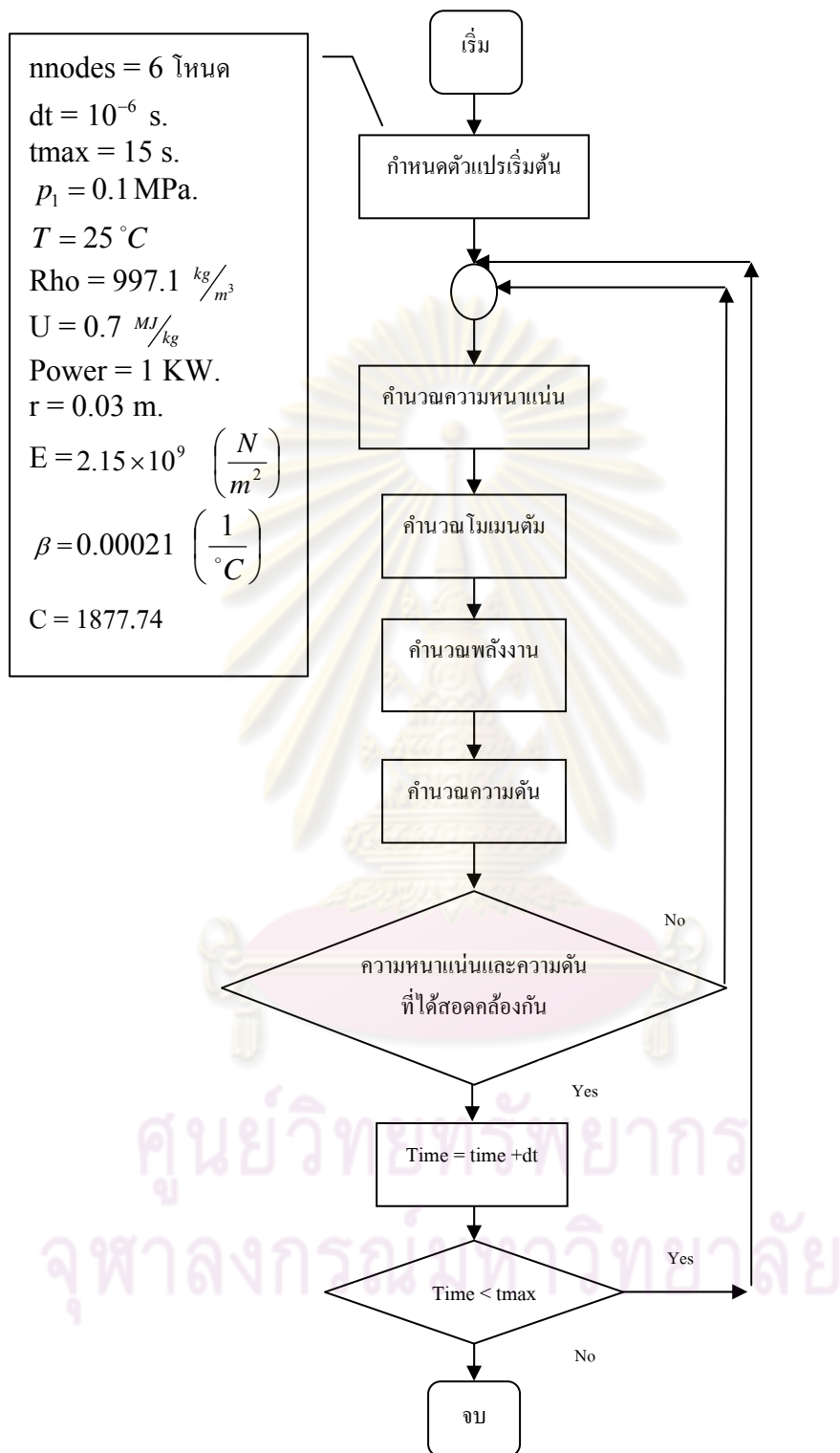
3.3.7 ตรวจสอบความสอดคล้องของความหนาแน่นกับความดันโดยพิจารณาจากค่าความ

คลาดเคลื่อนจากความดันโดยใช้เงื่อนไขคือ $\left| \frac{P_{new} - P_{old}}{P_{old}} \right| \leq 10^{-4}$ ถ้ามีค่าความคลาดเคลื่อน

เกินเงื่อนไขที่กำหนดให้ย้อนกลับไปทำข้อ 3.3.3 - 3.3.7

3.3.8 ทำการปรับค่า Time step แล้วคำนวณค่าต่างๆ ในรอบเวลาใหม่

ในลำดับขั้นตอนที่ 3.3.1 ถึง 3.3.8 จะทำการแสดงดังในรูปภาพที่ 3.3 เพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น



รูปภาพที่ 3.3 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม

3.4 การพัฒนาปรับปรุงโปรแกรมเพื่อนำไปใช้งาน

3.4.1 ทำการบันทึกค่าต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ และ อัตราการไหลของแต่ละโหนด

3.4.2 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อพิจารณาความถูกต้องของการคำนวณจากโปรแกรม ถ้าไม่ถูกต้อง ทำการตรวจเช็คตัวโปรแกรม หรือ สมการที่ใช้คำนวณในโปรแกรมใหม่อีกรอบ

3.4.3 ทำการศึกษาในกรณีต่างๆของระบบมากขึ้น เพื่อตรวจเช็คความถูกต้องและพิจารณาถึงขอบเขตความสามารถของโปรแกรมที่ทำการจำลองขึ้นมา

3.5 การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐมภูมิภายใต้เงื่อนไขหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ในการคำนวณภายใต้เงื่อนไขนี้ การคำนวณลักษณะการไหลของของไหล จำเป็นต้องคำนวณหา ความหนาแน่น ความเร็วและพลังงานในระบบ แล้วจึงคำนวณหา อุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยพิจารณาจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ที่ได้อินทิเกรตตัดแปลงสมการเป็นแบบมหภาค เช่นเดียวกับกรณีของการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐมภูมิภายใต้เงื่อนไข ก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยจะใช้สมการที่ได้จากกรณีนี้คือ สมการ 3.2 3.4 และ 3.8 แต่สมการ 3.6 จะไม่ใช่ เพราะภายใต้เงื่อนไขนี้ ป้อนจะไม่มีผลต่อการไหลของของไหลในระบบ

ส่วนขั้นตอน การนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเพื่อการคำนวณ การคำนวณหาค่าของความดันกับอุณหภูมิ และการพัฒนาปรับปรุงโปรแกรมทำเช่นเดียวกับกรณีของการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐมภูมิภายใต้เงื่อนไข ก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

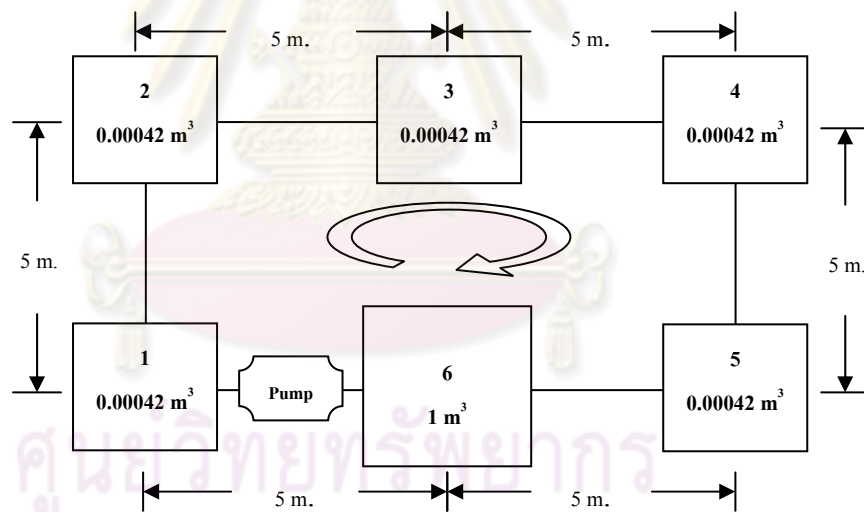
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมในบทนี้ จะนำข้อมูลมาสร้างเป็นกราฟเพื่อจะได้พิจารณาว่าโปรแกรมคำนวณได้ถูกต้องหรือไม่ โดยจะอ้างอิงกับข้อมูลตั้งต้นที่ได้นำเข้าสู่โปรแกรมในการคำนวณ แล้วเปรียบเทียบกับลักษณะกราฟที่ได้ ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลจากการคำนวณของโปรแกรมมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง

4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐมภูมิภายใต้เงื่อนไข ก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

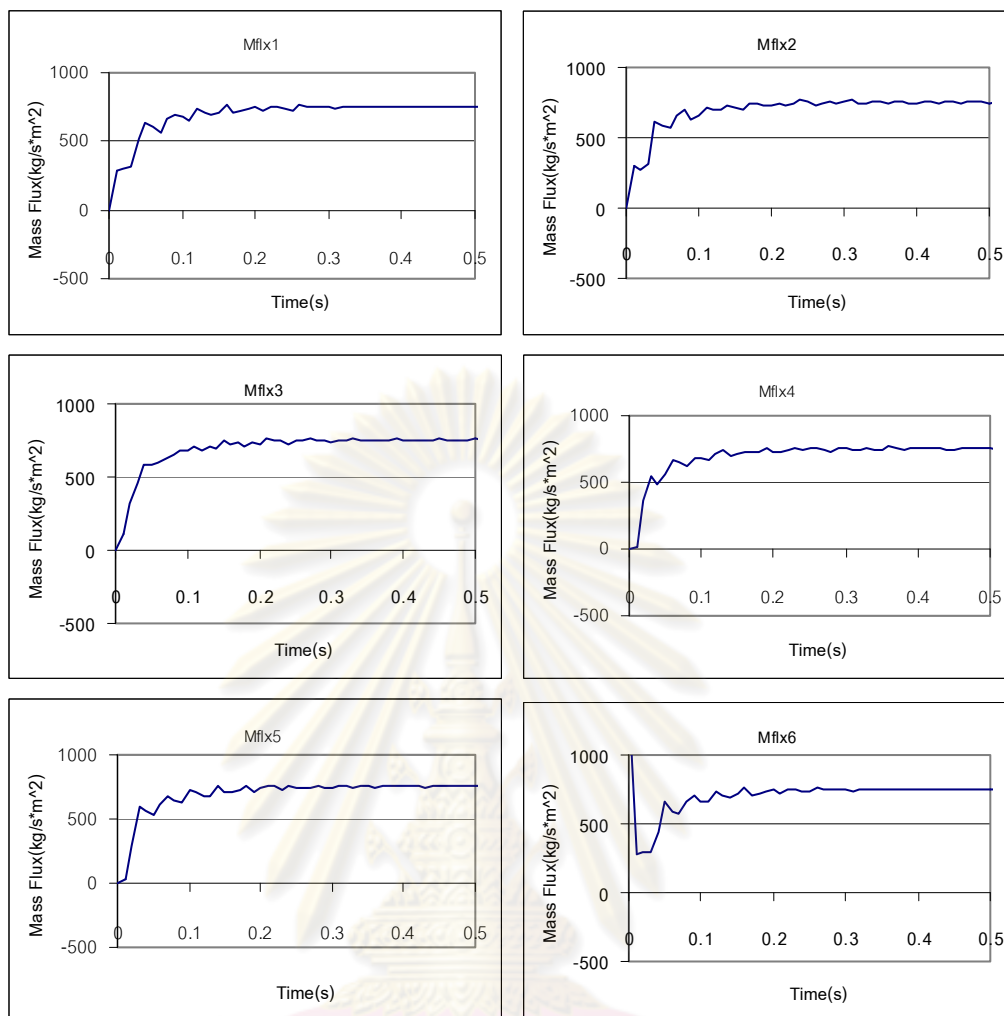
4.1.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 6 โหนด



รูปภาพที่ 4.1 ระบบจำลองกรณีมี 6 โหนดที่มีปั๊มในระบบ

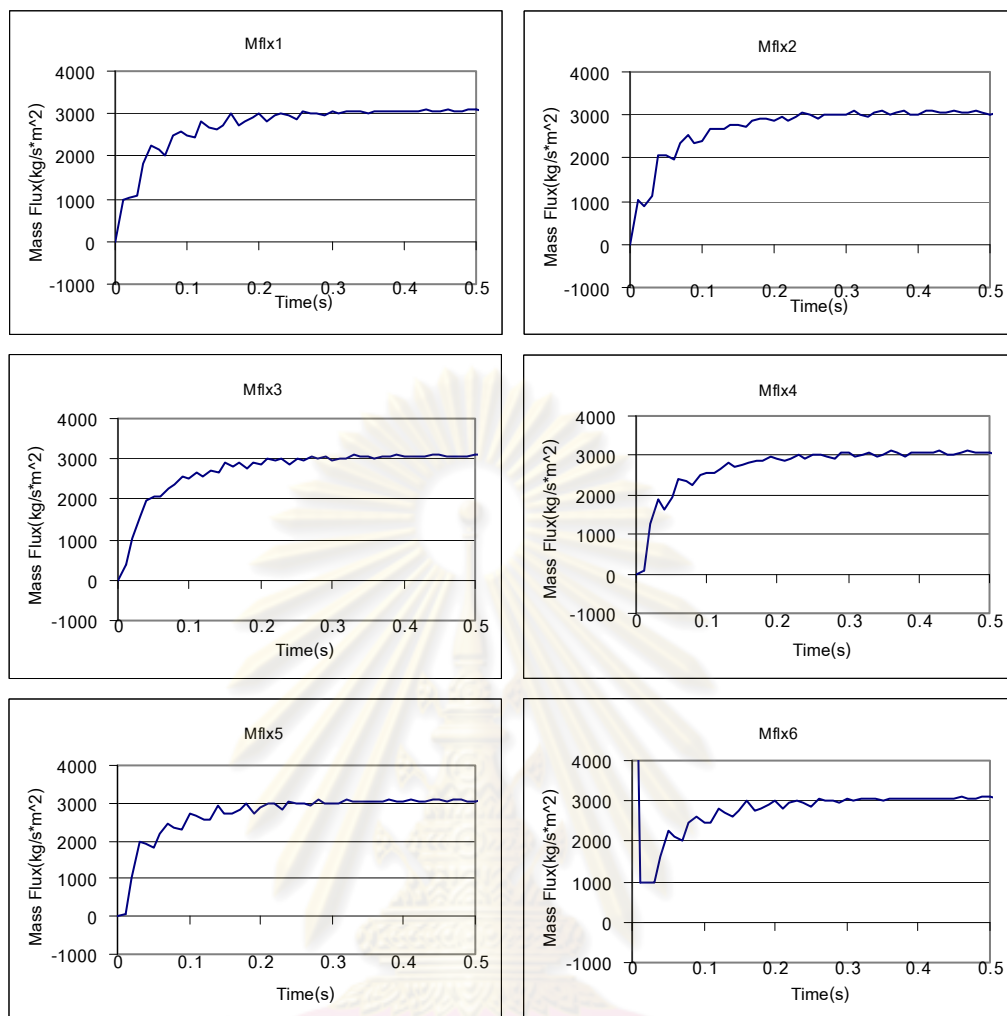
ก) ผลการทดสอบทางด้านอัตราการไหลในระบบ

ซึ่งผลการทดสอบนี้จะพิจารณาถึงอัตราการไหลในระบบ โดยการจำลองจะเริ่มจากของไหลหยุดนิ่ง และพิจารณาการเริ่มทำงานของปั๊ม ณ เวลา $t = 0$ และจะดำเนินการไปกระทั่งอัตราการไหลมีค่าคงที่ ผลการทดสอบโปรแกรมเมื่อความดันตั้งต้นคงที่ที่ 0.1 MPa . เป็นดังแสดงในรูปภาพที่ 4.2, 4.3, และ 4.4



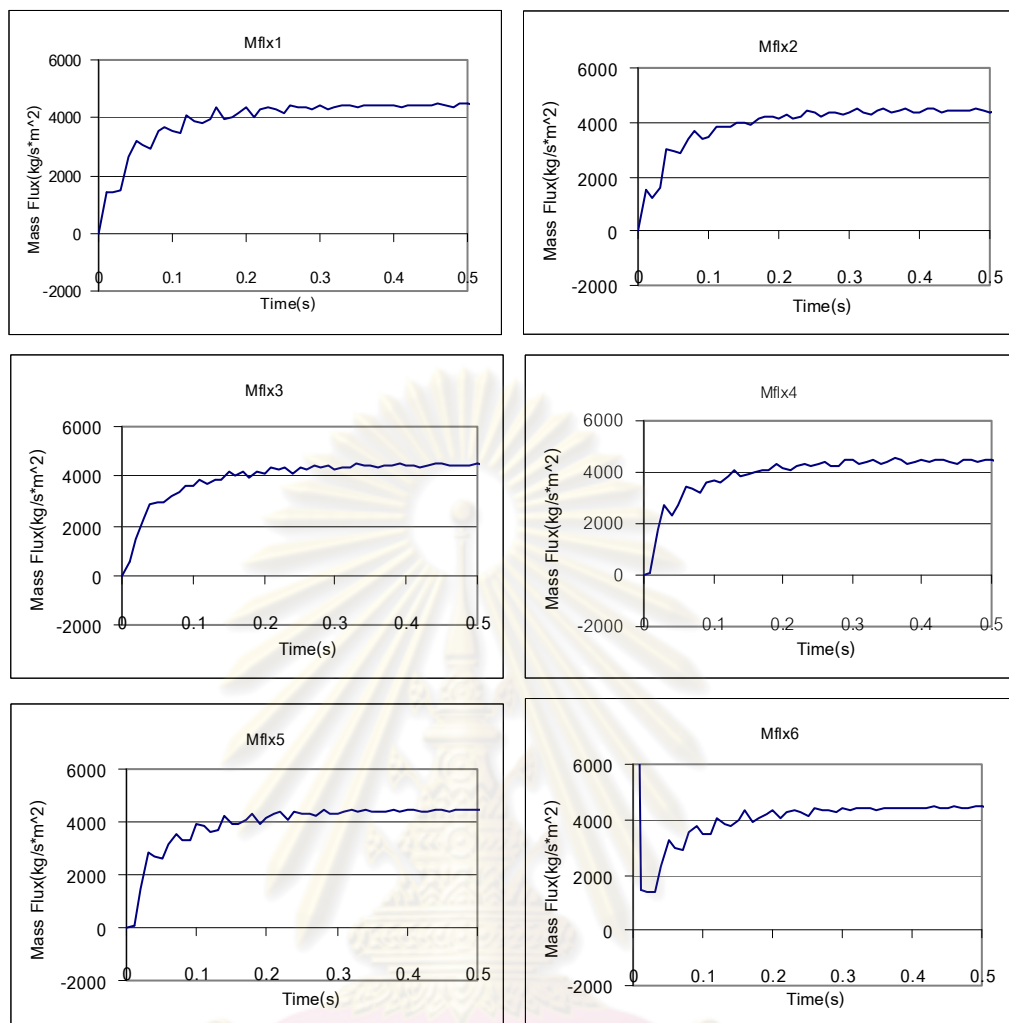
รูปภาพที่ 4.2 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับเวลา กรณีปั๊มมีกำลัง 100 W. จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงเวลาที่ 0 – 0.2 วินาทีแรกมีการเพิ่มของค่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดจาก 0 – $700 \frac{kg}{s \cdot m^2}$ อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการไหลของแต่ละโหนดเริ่มคงที่ แต่โหนดที่ 6 จะมีอัตราการไหลลดลงอย่างมากในช่วงเวลา 0 – 0.05 วินาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการไหลจึงค่อยเพิ่มขึ้น จนถึงช่วงเวลา 0.2 วินาที อัตราการไหลจึงเริ่มคงที่เหมือนโหนดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราการไหลที่โหนด 6 คือภาพจำลองของปั๊มที่อยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีอัตราการไหลเริ่มต้นตามกำลังของปั๊มที่กำหนด และเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหลจึงเริ่มลดลง เพราะอัตราการไหลจากโหนด 6 เริ่มถ่ายเทไปที่โหนด 1 จนอัตราการไหลวนครบรอบแล้วจึงทำให้อัตราการไหลที่โหนด 6 กลับมาเพิ่มเหมือนโหนดอื่นๆ แล้วจึงเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวอัตราการไหลจึงเริ่มคงที่



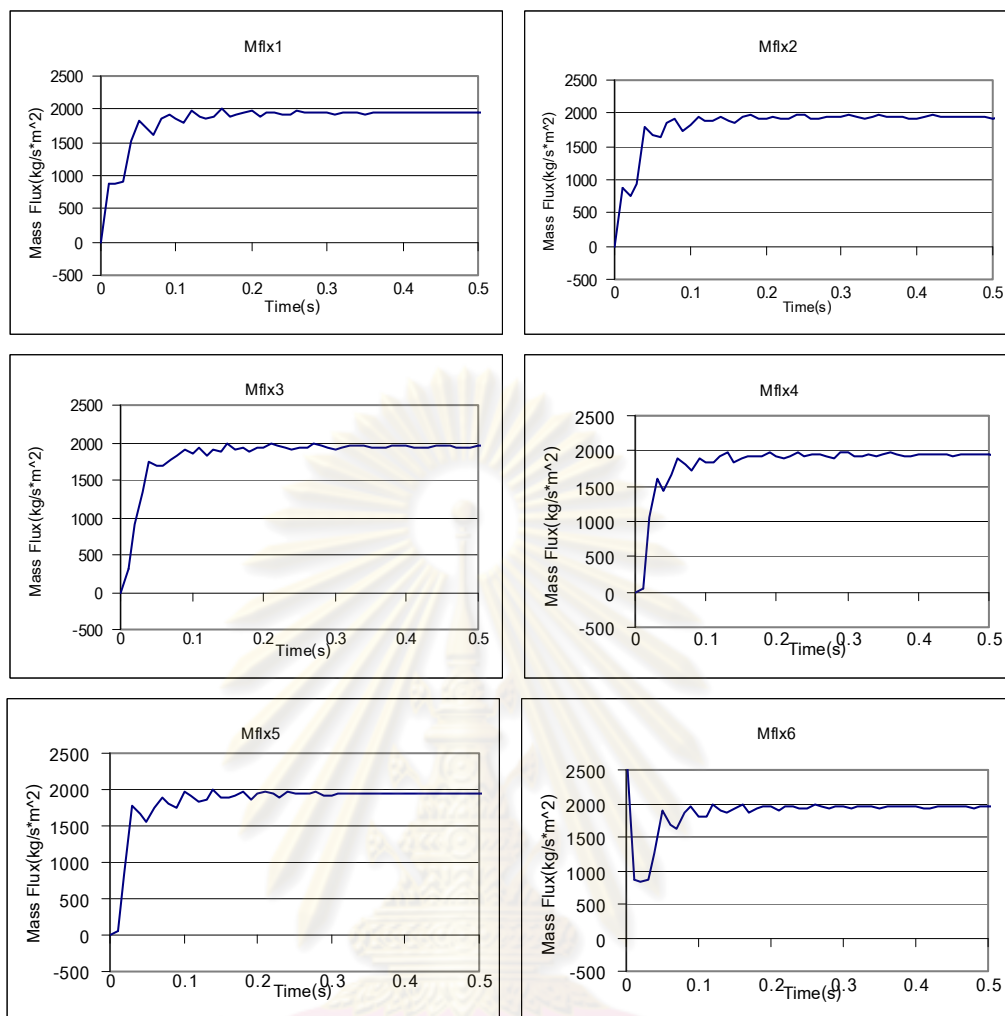
รูปภาพที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.3 กรณีปั๊มมีกำลัง 1,000 W. ยังพบว่ากราฟมีลักษณะเดิมโดยขนาดการเพิ่มของอัตราการไหลในแต่ละโหนดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มกำลังของปั๊ม แต่หลังจากเวลา 0.3 วินาทีอัตราการไหลในแต่ละโหนดยังไม่คงที่ โดยยังมีการแกว่งอยู่เทียบ กับกรณีปั๊มขนาด 100 W. จะพบว่าระยะเวลาที่อัตราการไหลเริ่มคงที่ ในกรณีปั๊มขนาด 1,000 W. จะนานกว่าทั้งนี้อาจเนื่องจากอัตราการไหลที่เร็วมากในช่วงตั้งต้นของปั๊ม ในกรณีปั๊มขนาด 1,000 W. เพื่อเป็นการเปรียบเทียบจึงทดลองเพิ่มกำลังของปั๊มเป็น 2,000 W. เพื่อพิจารณาว่ากำลังของปั๊มมีผลต่อความเสถียรของอัตราการไหลในระบบหรือไม่ ผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.4



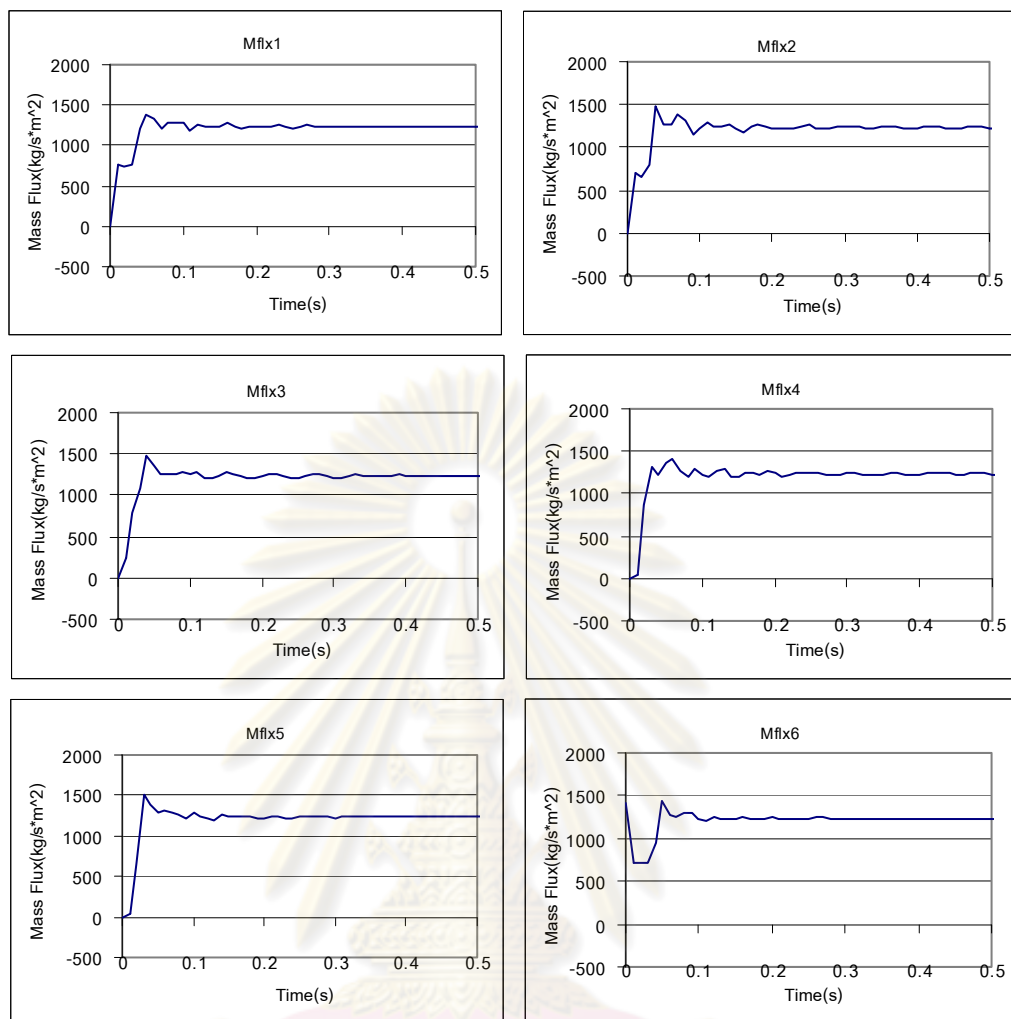
รูปภาพที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 2,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากกราฟในรูปภาพที่ 4.4 เห็นได้ว่าอัตราการไหลตั้งต้นเพิ่มมากขึ้นอย่างมากและเป็นผลให้ระยะเวลาคงตัวยาวนานขึ้นทั้งนี้ขนาดการแกว่งของอัตราการไหลในแต่ละโหนดยังเพิ่มมากขึ้นกว่ากราฟในรูปภาพที่ 4.3 เพื่อการทดสอบผลของความดันตั้งต้นในระบบต่ออัตราการไหล จึงปรับให้กำลังของปั๊มคงที่ที่ 1,000 W. แล้วปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้นผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.5, 4.6, และ 4.7



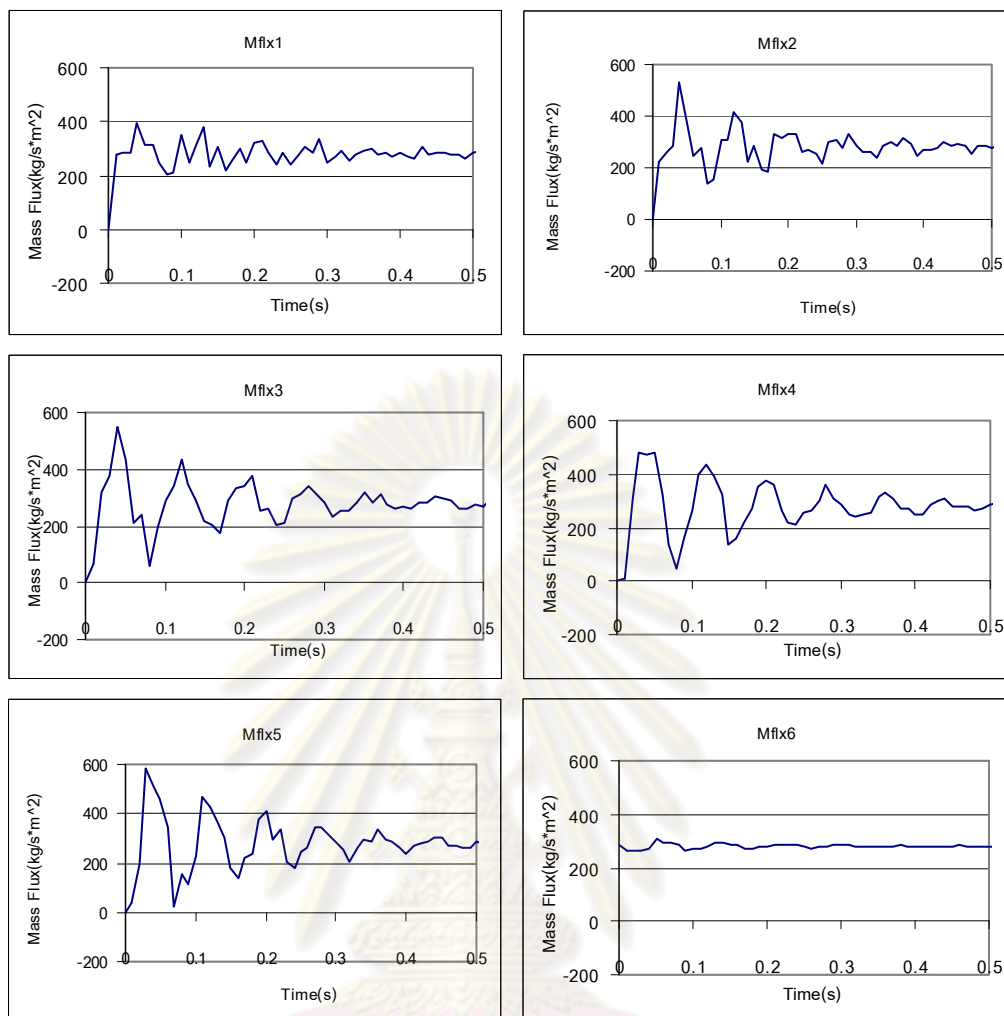
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปภาพที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบ โปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มเท่ากับ 1,000 W แต่จะมีการปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้นซึ่งความดันแต่ละโหนดเริ่มที่ 0.5 MPa. พบว่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 0 - 0.1 วินาทีแรก ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังของปั๊ม ที่ไปเพิ่มอัตราการไหลในแต่ละโหนด และหลังจากช่วงเวลา 0.2 วินาที อัตราการไหลในแต่ละโหนดเริ่มคงที่ ส่วนโหนดที่ 6 ลักษณะกราฟยังคงสอดคล้องกับกราฟในรูปภาพที่ 4.2 มีเพียงอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากกำลังของปั๊ม



รูปภาพที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปภาพที่ 4.6 ความดันตั้งต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. พบว่าในช่วงเวลาที่ 0.05 – 0.1 วินาที เห็นความแตกต่างจากกราฟในรูปภาพที่ 4.5 อย่างชัดเจนคือ อัตราการไหลในแต่ละโหนด จะมีการปรับลดลงและมีค่าสูงสุดต่ำกว่ากรณีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ และอัตราการไหลในแต่ละโหนดหลังจากเริ่มคงที่ก็มีค่าลดลงด้วยเมื่อเทียบกับกรณีความดันตั้งต้น 0.5 MPa.

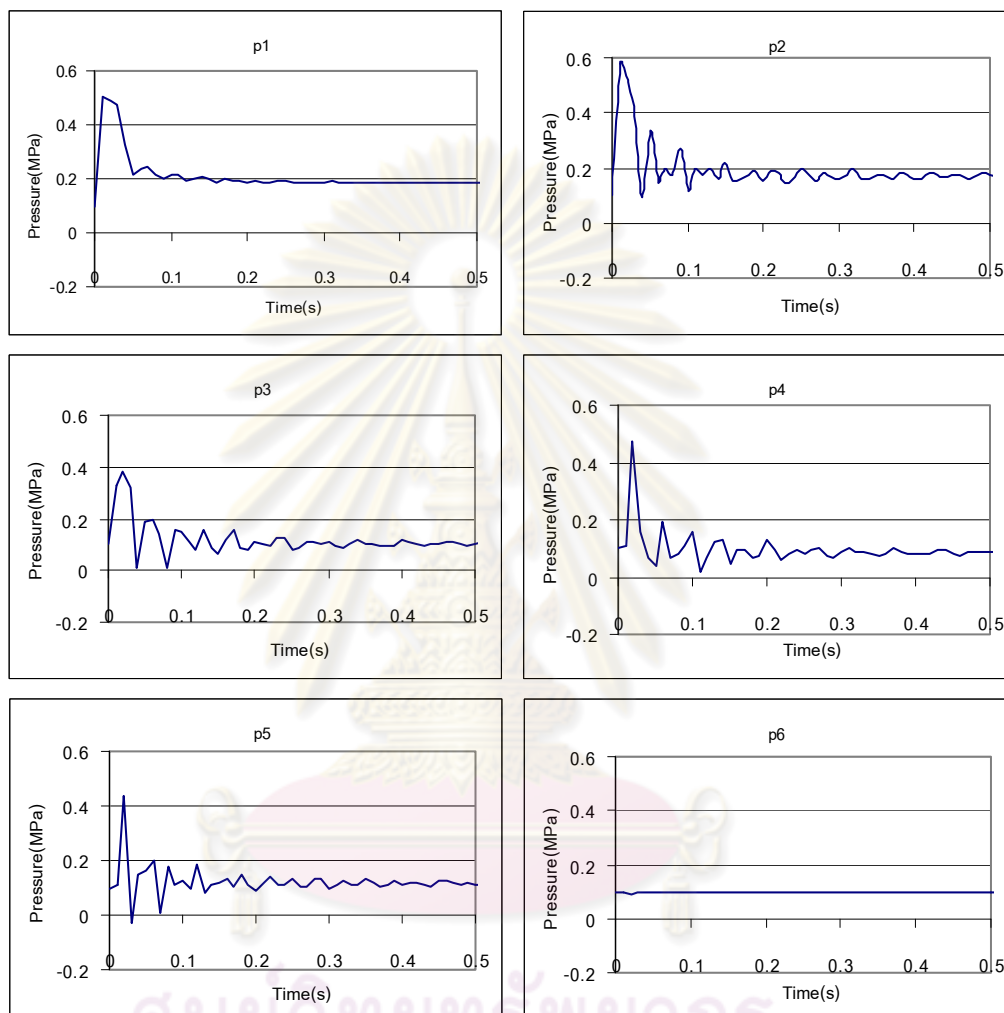


รูปภาพที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

กราฟในรูปภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อความดันตั้งต้นในระบบเพิ่มสูงขึ้น กำลังของปั๊มจะมีผลต่ออัตราการไหลในแต่ละโหนดลดลง โดยในช่วงเวลาหลังจาก 0.1 วินาที ยังมีการแกว่งของอัตราการไหลในแต่ละโหนดอยู่มาก แต่โหนดที่ 6 อัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลา 0 – 0.1 วินาทีแรก หลังจากนั้นเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรที่โหนด 6 มีขนาดใหญ่และความดันตั้งต้นสูงมาก กำลังของปั๊มจึงส่งผลต่ออัตราการไหลของโหนดนี้น้อยมาก จึงทำให้ไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ข) ผลการทดสอบทางด้านความดันในระบบ

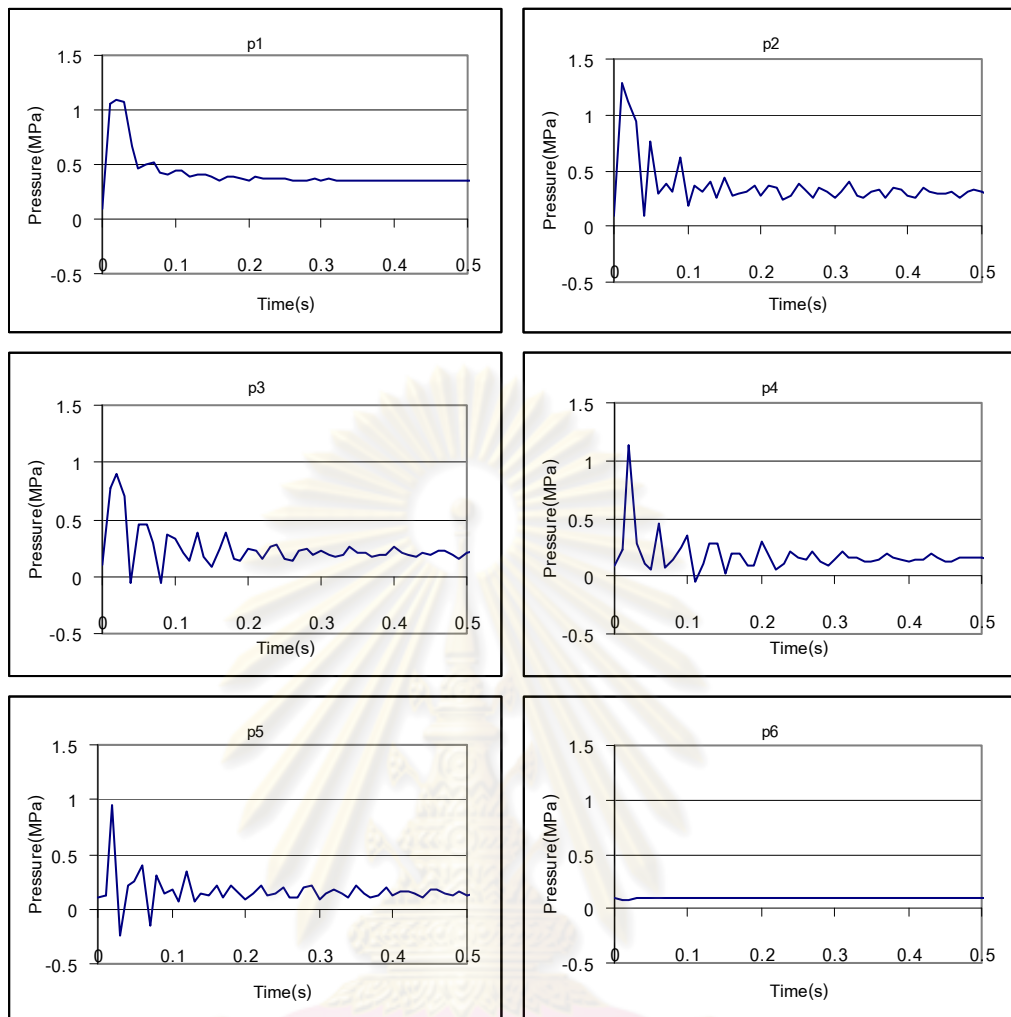
ซึ่งผลการทดสอบนี้จะพิจารณาถึงความดันในระบบ โดยการจำลองจะเริ่มจากของไหลหยุดนิ่ง และพิจารณาการเริ่มทำงานของปั๊ม ณ เวลา $t = 0$ และจะดำเนินการไปกระทั่งความดันมีค่าคงที่



รูปภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa.

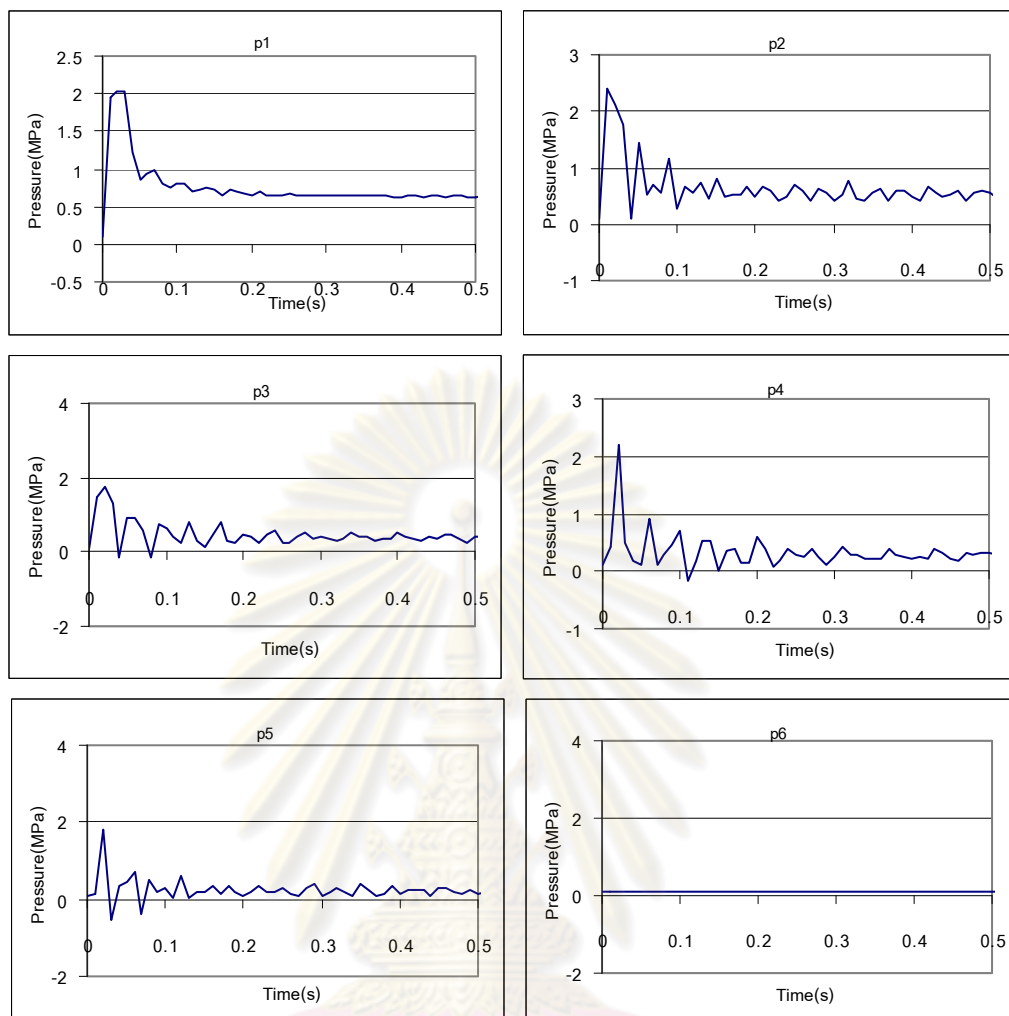
กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลา จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงเวลาที่ 0 – 0.2 วินาทีแรก ระบบมีการแกว่งของค่าความดันอยู่ในช่วง 0 – 0.5 MPa. และหลังจากนั้นความดันของแต่ละโหนดเริ่มคงที่ แต่ความดันที่โหนด 4 จะมีค่าน้อยกว่าที่โหนด 5 ทั้งนี้เนื่องจากกำลังของปั๊มน้อยเกินไป ลักษณะเช่นนี้ทำให้การไหลไม่คงที่ เมื่อเพิ่มกำลังของปั๊มเป็น 550 W. จะได้ผลตามรูปที่ 4.9 ดังนี้



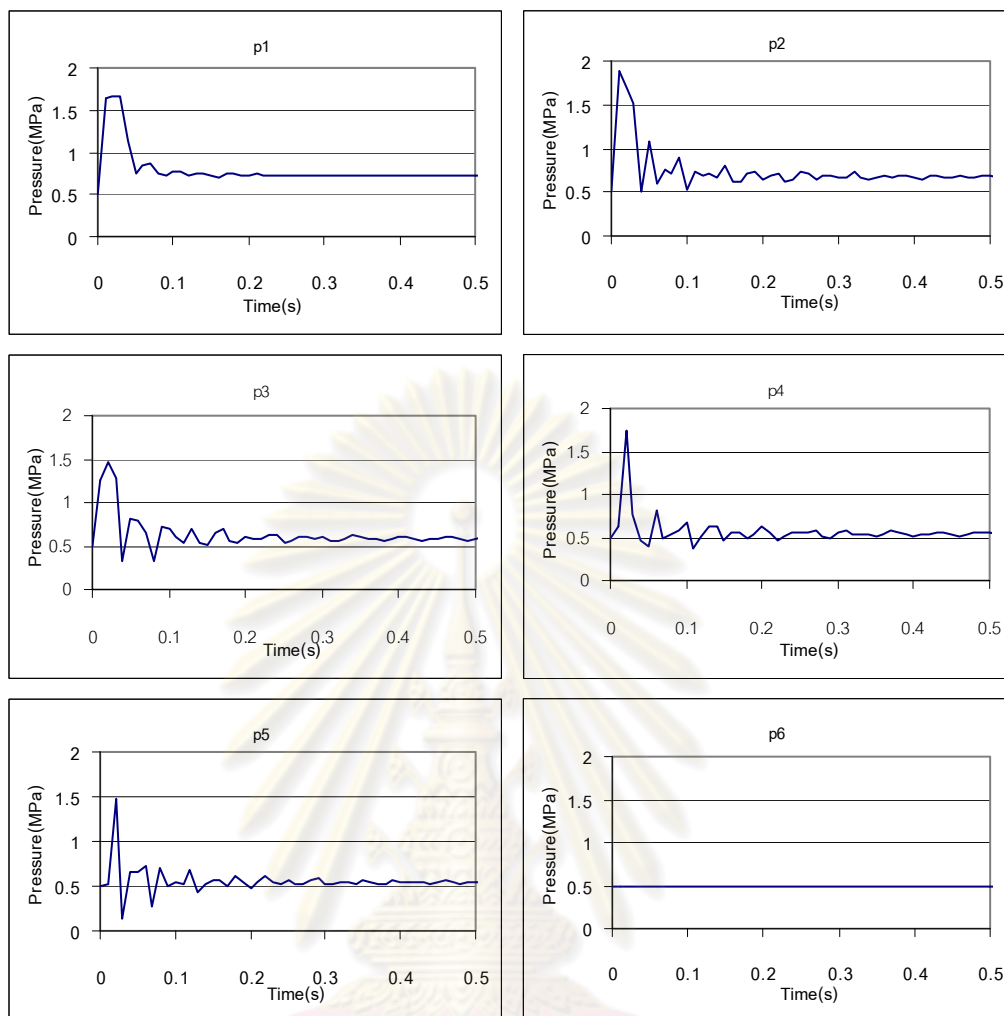
รูปภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 550 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.9 จะพบว่าขนาดการแกว่งของค่าความดันในแต่ละโหนดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก การเพิ่มกำลังของปั๊ม แต่หลังจากเวลา 0.2 วินาที ความดันในแต่ละโหนดเริ่มคงที่ ทั้งนี้จะพบว่าความดันที่โหนด 4 มีค่ามากกว่าที่โหนด 5 ซึ่งแสดงว่ากำลังของปั๊มมากพอที่จะควบคุมการไหลทั้งหมดของระบบได้



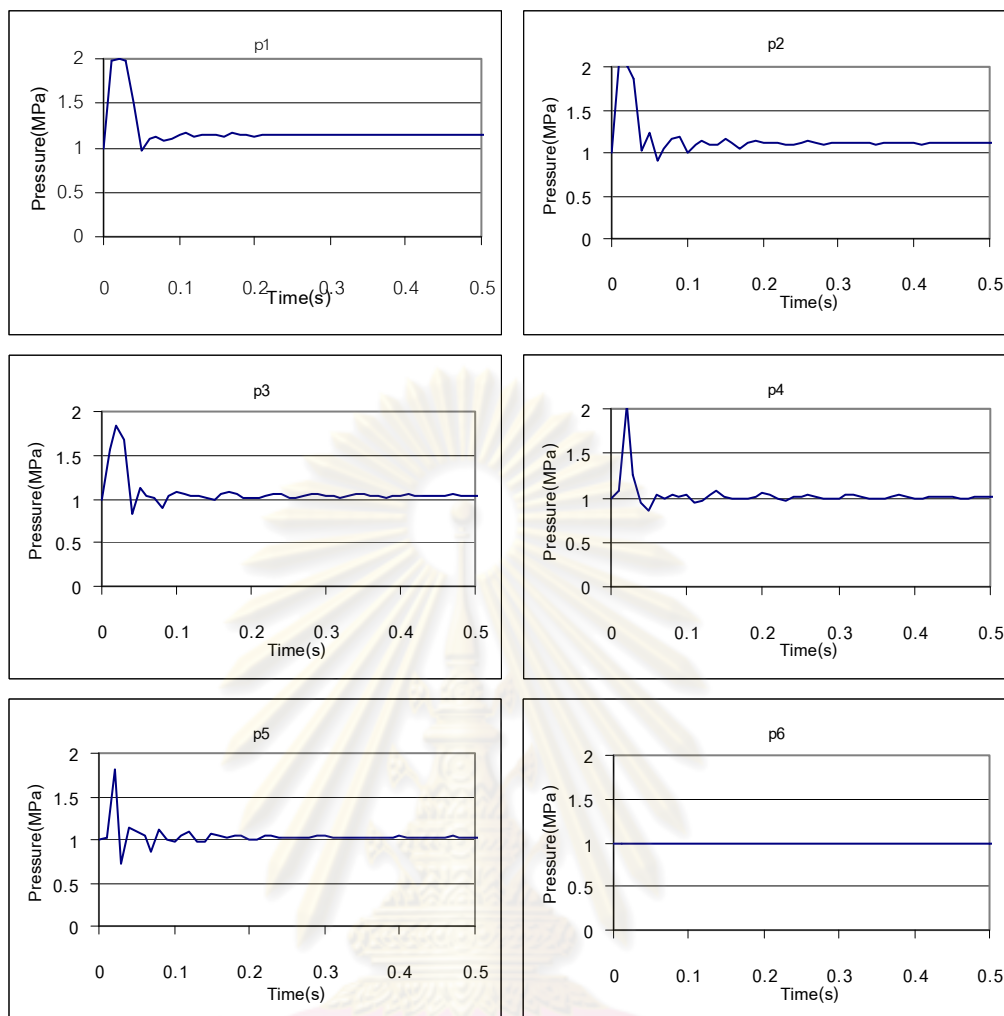
รูปภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 2,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปภาพที่ 4.10 แสดงค่าความดันที่โหนด 1 เมื่อทำการเพิ่มกำลังของปั๊มเป็น 2,000 W. ผลที่ได้แสดงว่ากำลังของปั๊ม มีผลต่อการไหลในระบบอย่างชัดเจน ในกรณีนี้ค่าความดันสูงสุดเพิ่มขึ้นถึง 2.5 MPa. อย่างรวดเร็วในโหนดที่ 1 ในช่วงเริ่มต้นของการไหลก่อนจะลดระดับสู่ค่าคงที่ที่ 0.5 MPa. ทั้งนี้ขนาดการแกว่งของค่าความดันในช่วงแรก และค่าความดันในช่วงคงที่ จะปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นตามกำลังของปั๊มที่ใช้ ซึ่งกำลังที่เพิ่มขึ้นของปั๊มยังทำให้การควบคุมการไหลโดยปั๊มกระทำได้ดีขึ้น โดยพิจารณาได้จากโหนด 4 จะมีค่าสูงกว่าที่โหนด 5 อย่างชัดเจน



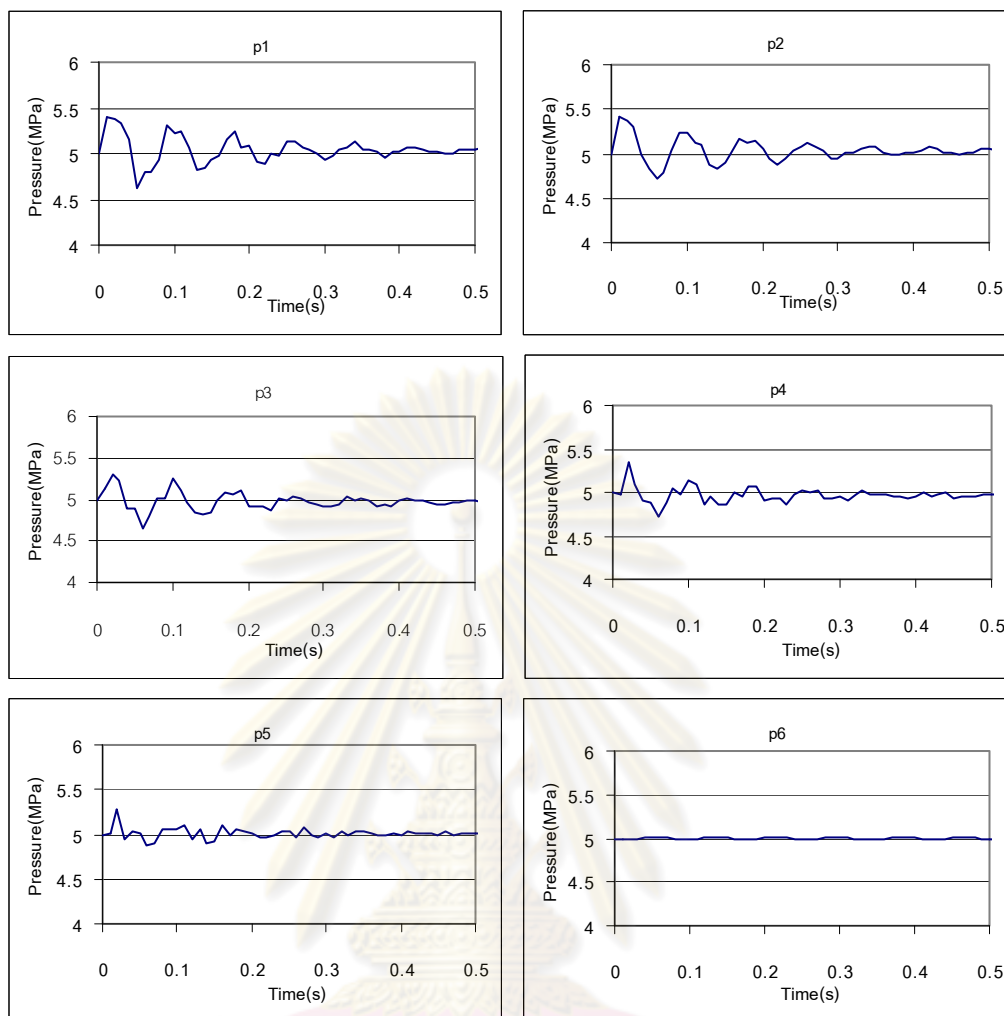
รูปภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปภาพที่ 4.11 เป็นกราฟแสดง ผลการทดสอบ โปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มเท่ากับ 1,000 W แต่จะมีการปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้น ซึ่งในกราฟนี้ปรับความดันแต่ละโหนด โดยเริ่มที่ 0.5 MPa. พบว่าความดันแต่ละโหนดเพิ่มขึ้นอย่างมากแล้วก็ลดลงในช่วง 0 - 0.05 วินาทีแรก ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังของปั๊ม ที่ไปเพิ่มความดันในแต่ละโหนด อย่างไรก็ตาม การแกว่งของความดันยังมีอยู่ในช่วง 0.05 - 0.2 วินาทีต่อมา แต่ช่วงเวลาหลังจากนี้ไป ความดันในแต่ละโหนดเริ่มคงที่ โดยมีความดันเพิ่มขึ้นจากความดันเริ่มต้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งโหนดแรกจะเพิ่มมากที่สุด และโหนดสุดท้ายเพิ่มน้อยสุด



รูปภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

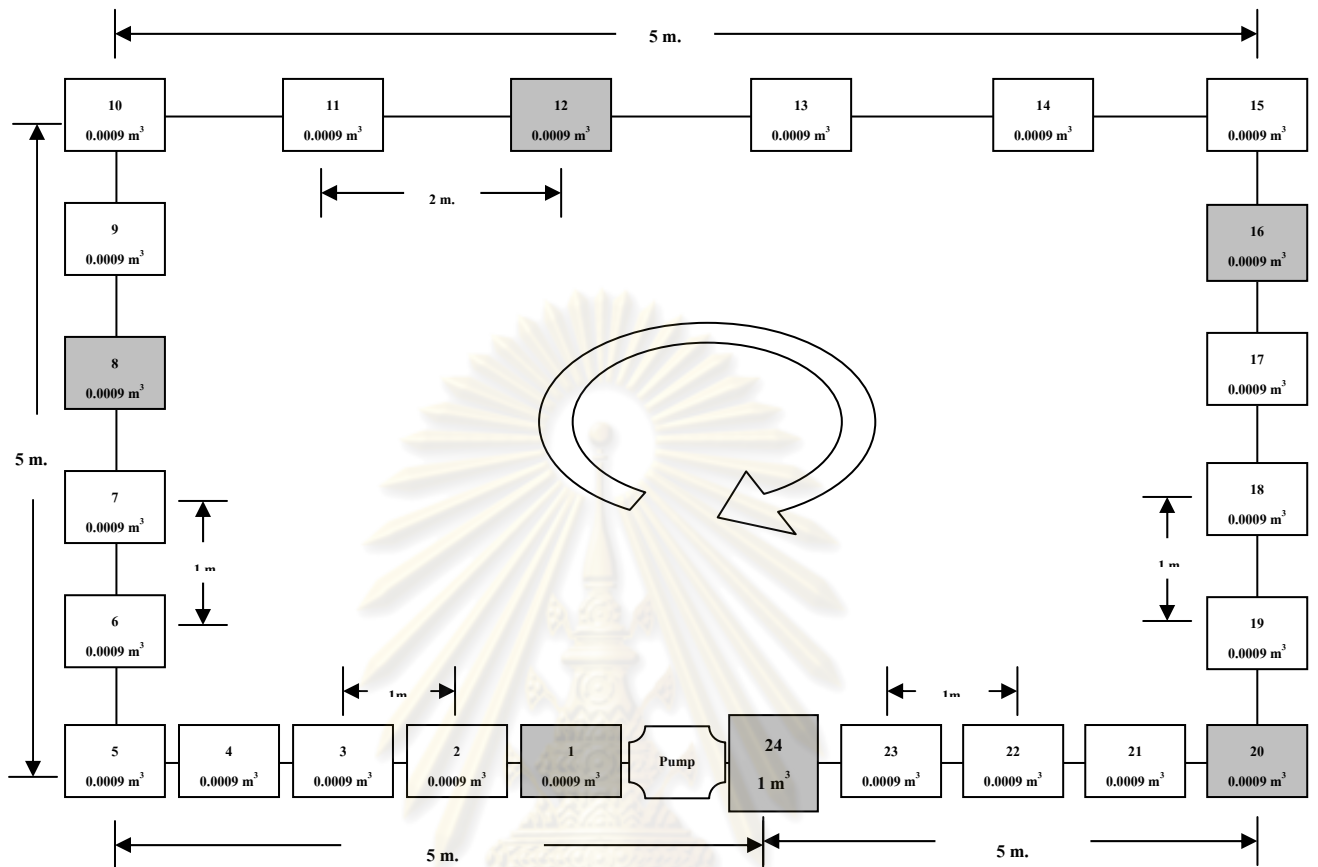
รูปภาพที่ 4.12 ความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. ผลที่ได้มีลักษณะเดียวกับกรณีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.11 แต่ช่วงการแกว่งของความดันก่อนที่ความดันจะเริ่มมีค่าที่จะสั้นลงคือ 0.05 – 0.1 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากค่าความดันเริ่มต้นในระบบสูงขึ้น ขณะที่กำลังของปั๊มมีค่าเท่าเดิม การเพิ่มความดัน โดยปั๊มจึงมีผลกระทบน้อยกว่ากรณีความดันตั้งต้นเป็น 0.5 Mpa.



รูปภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

กราฟรูปภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อความดันตั้งต้นในระบบเพิ่มสูงถึง 5 MPa. ปั๊มขนาด 1,000 W. มีผลน้อยมากกับการเพิ่มความดันในระบบ ขณะที่ช่วงเวลาที่การแกว่งของความดันที่แต่ละโหนดยาวขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดันเริ่มต้นในระบบสูงมาก เป็นผลให้ความสามารถในการควบคุมการไหลโดยปั๊มลดลง จึงทำให้อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันและ ระบบมีความเสถียรลดลง

4.1.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 24 โหนด

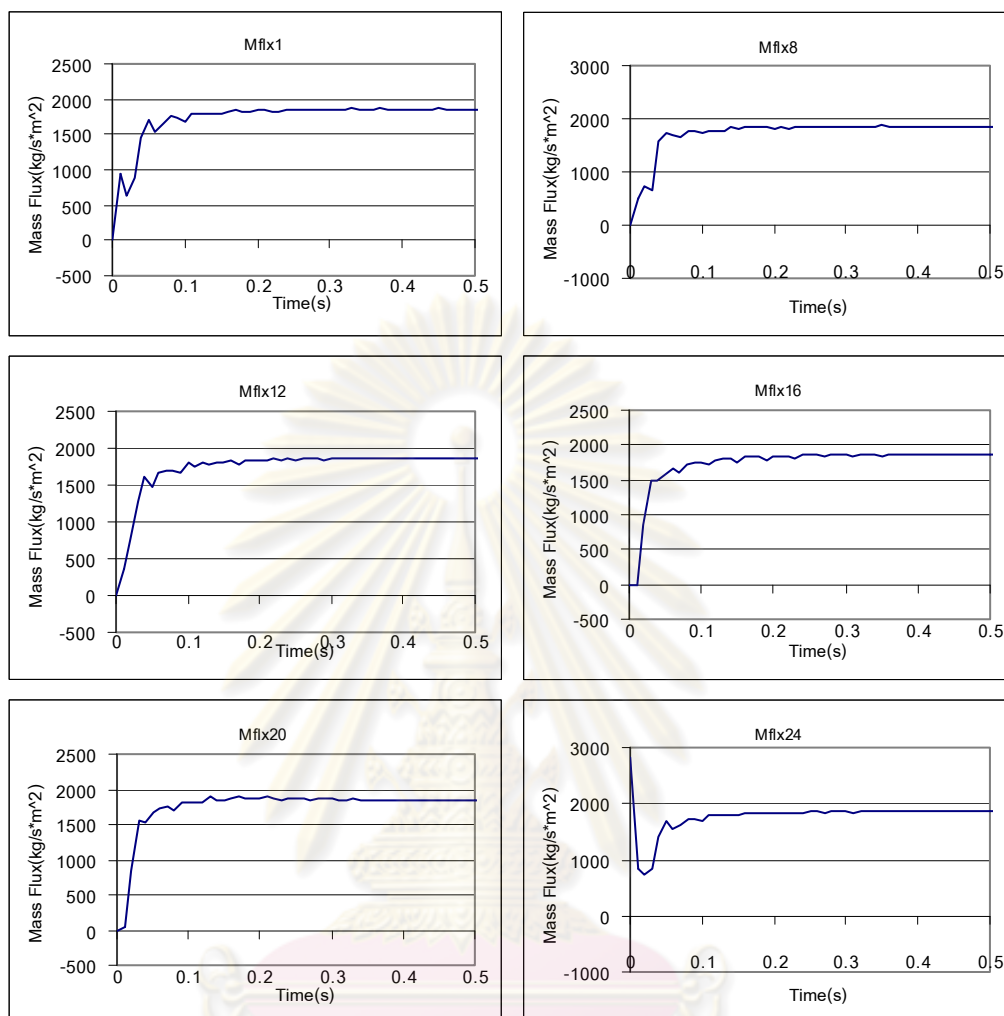


รูปภาพที่ 4.14 ระบบจำลองกรณีมี 24 โหนดที่มีปั๊มในระบบ

จากรูปภาพที่ 4.14 โหนดที่มีการแรเงาคือโหนดที่ 1, 8, 12, 16, 20 และ 24 ตามลำดับ เป็นโหนดที่ทำการเก็บผลมาศึกษาจากระบบรวมทั้งระบบ โดยผลการทดสอบโปรแกรมในกรณี 24 โหนดนี้ จะชี้ถึงผลกระทบของความละเอียดในการจำลองระบบต่อผลการคำนวณ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

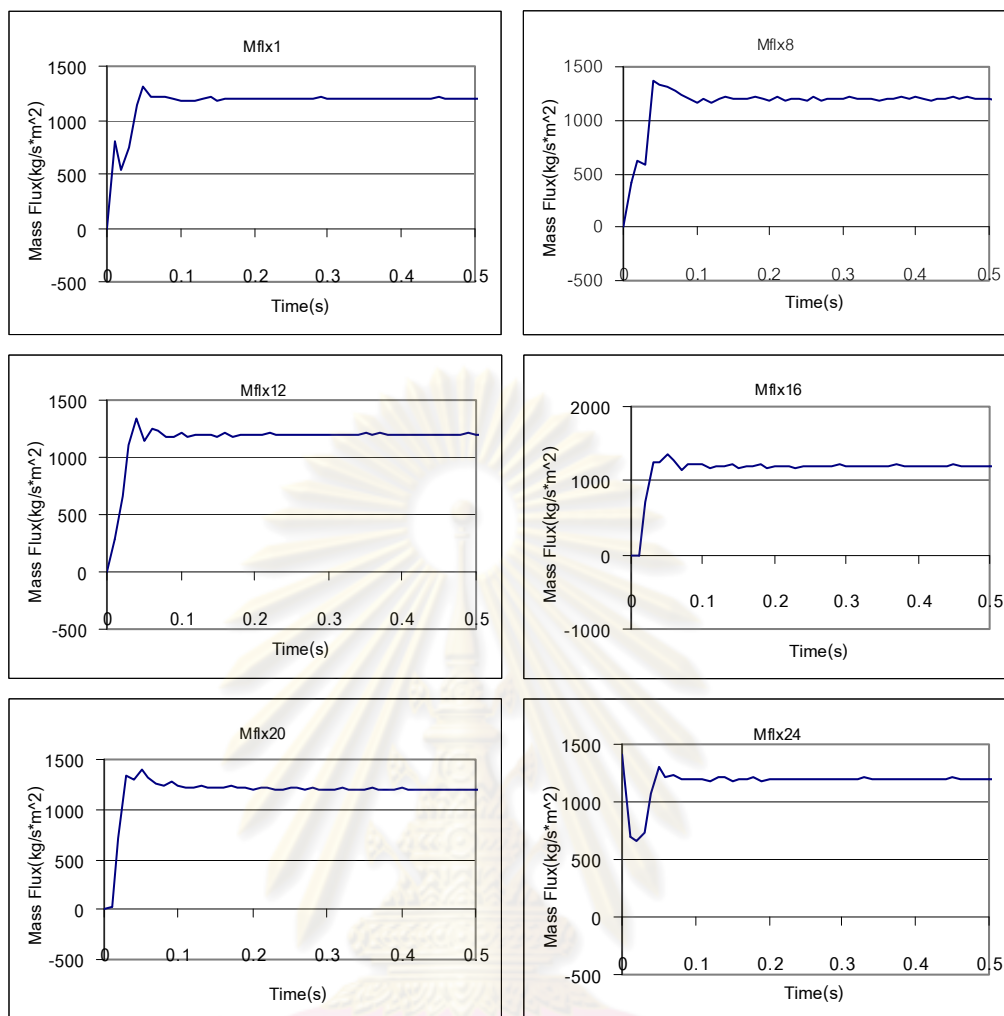
ก) ผลการทดสอบทางด้านอัตราการไหลในระบบ



รูปภาพที่ 4.15 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa.

กำลังป้อนที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

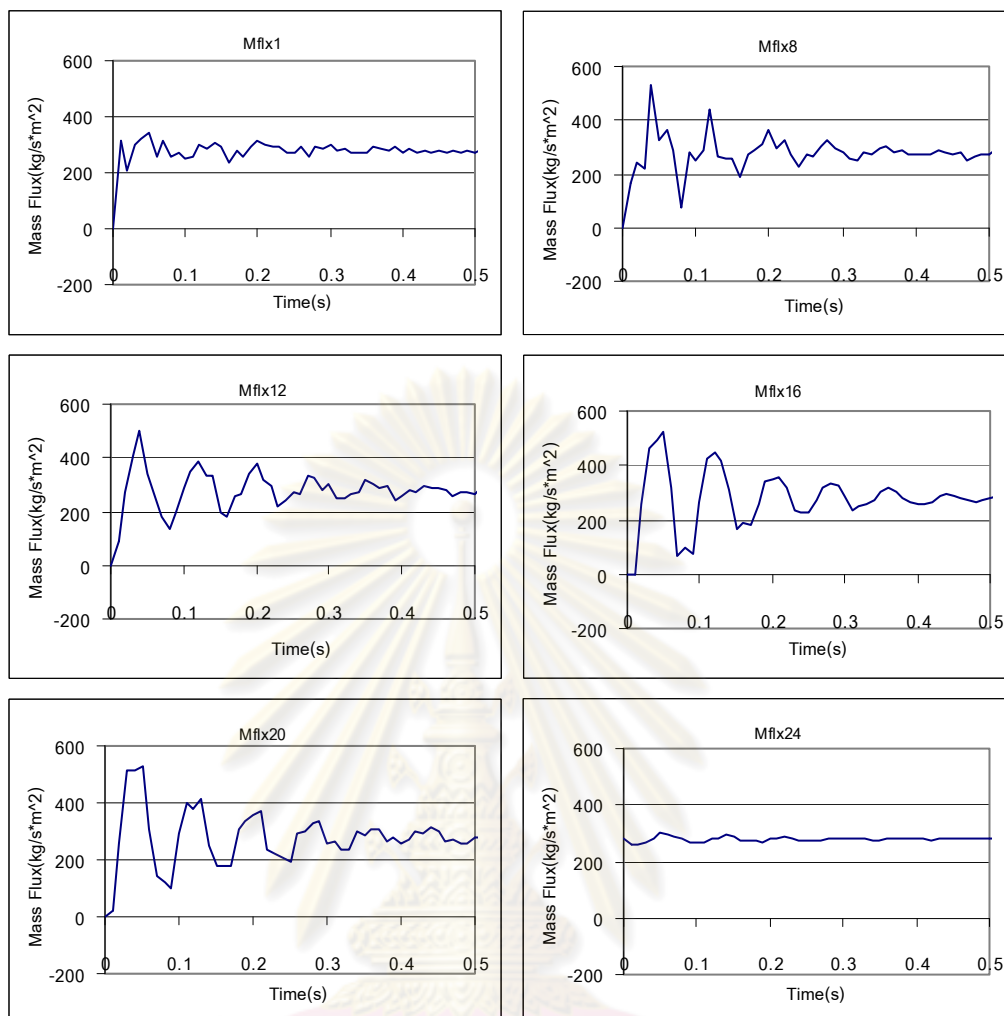
รูปภาพที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบของโปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. แต่มีความดันตั้งต้นของแต่ละโหนดคือ 0.5 MPa. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟ ในรูปภาพที่ 4.5 ของกรณีที่มี 6 โหนด กล่าวคือค่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดมีค่าใกล้เคียงกัน ณ เวลาที่สอดคล้องกัน กับทั้งมีช่วงระยะเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน



รูปภาพที่ 4.16 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

เมื่อมีการปรับความดันตั้งต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. ผลที่ได้ดังรูปภาพที่ 4.16 ยังสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดในรูปภาพที่ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

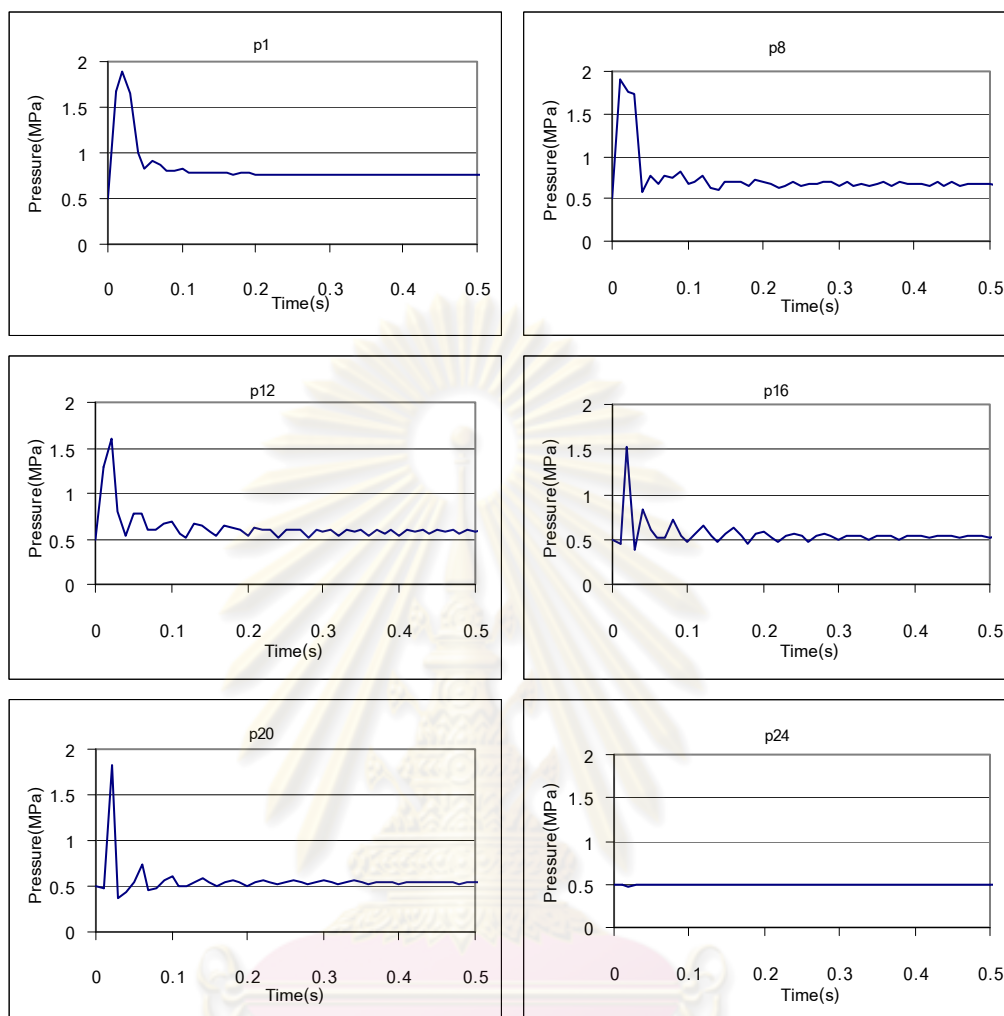


รูปภาพที่ 4.17 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.17 ในกรณีเมื่อความดันตั้งต้นเป็น 5 MPa. ยังคงพบว่าได้ผลสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

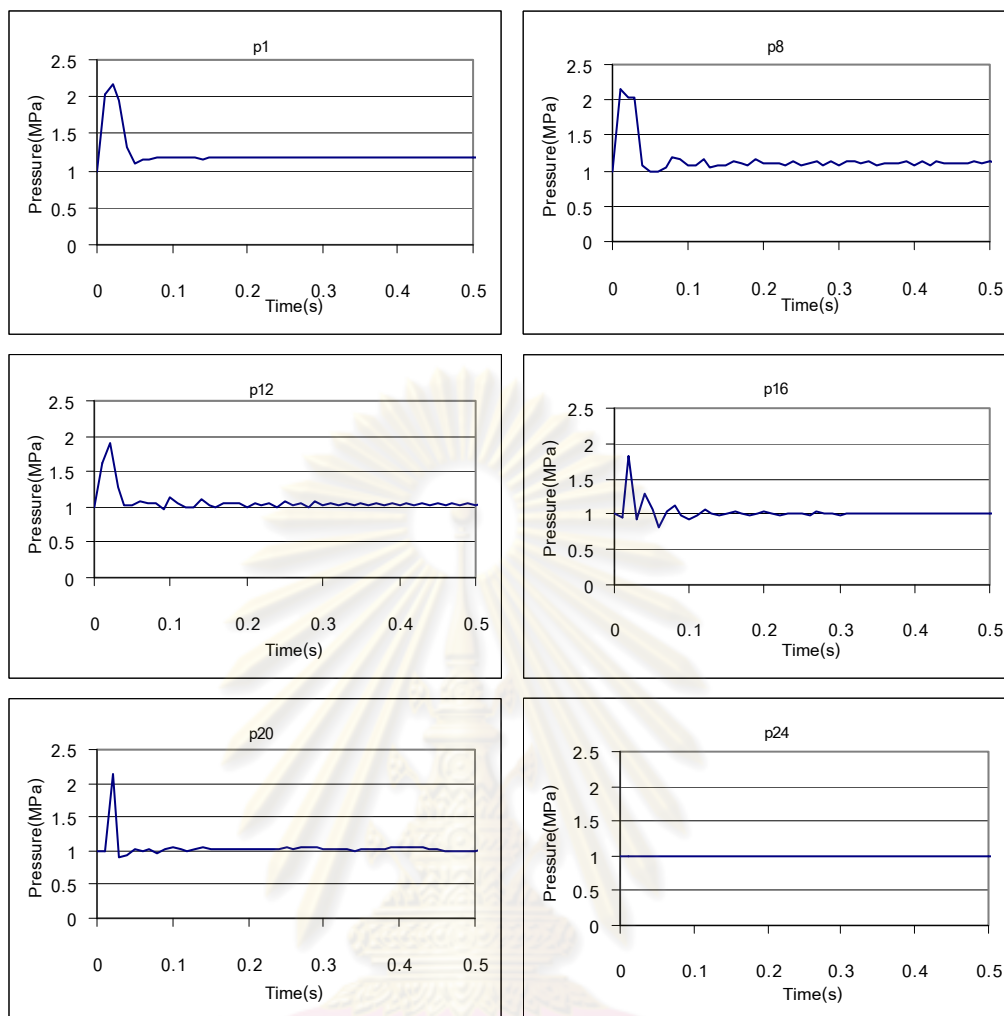
ข) ผลการทดสอบทางด้านความดันในระบบ



รูปภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa.

กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

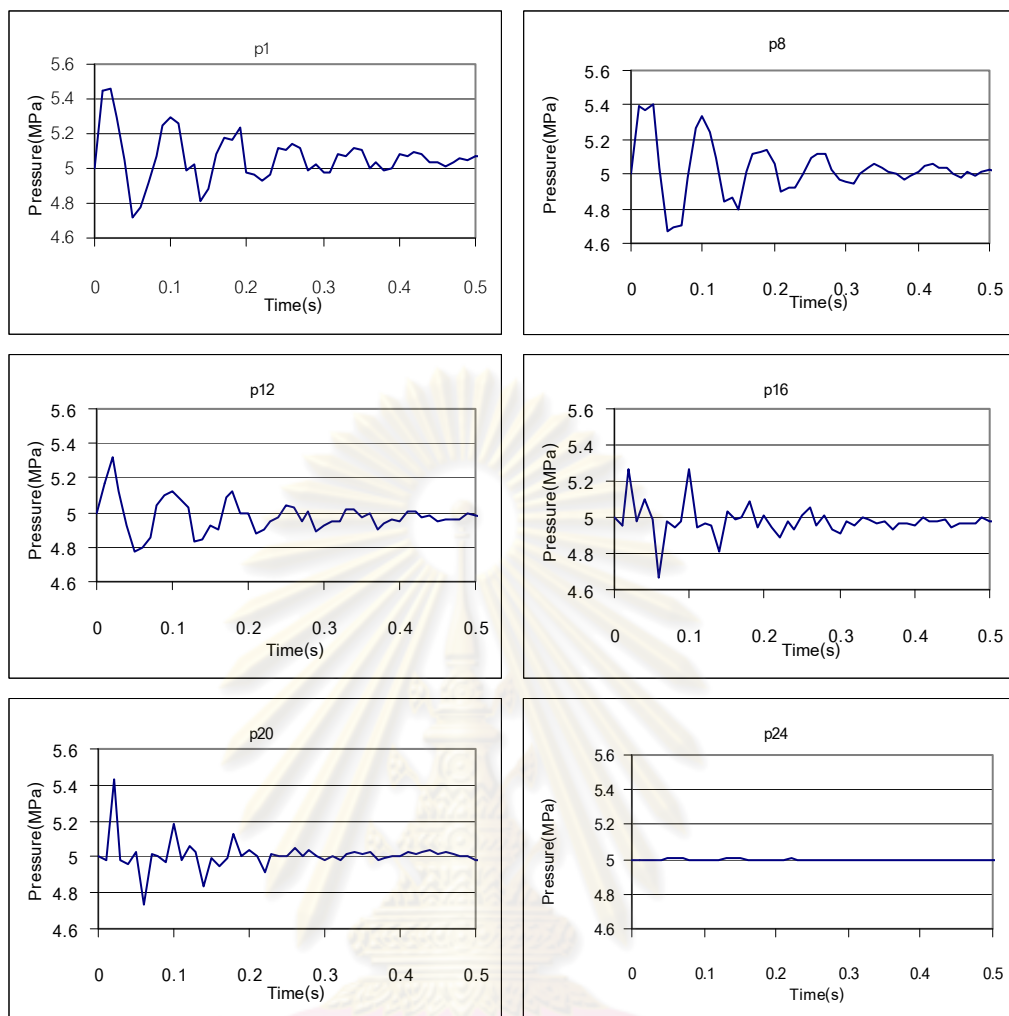
รูปภาพที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบของโปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. แต่มีความดันตั้งต้นของแต่ละโหนดคือ 0.5 MPa. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟ ในรูปภาพที่ 4.11 ของกรณีที่มี 6 โหนด กล่าวคือค่าความดันสูงสุดใกล้เคียงกัน ณ เวลาที่สอดคล้องกัน กับทั้งมีช่วงระยะเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน



รูปภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

เมื่อมีการปรับความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. ผลที่ได้ดังรูปภาพที่ 4.19
ยังสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดดังแสดงโดยรูปภาพที่ 4.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



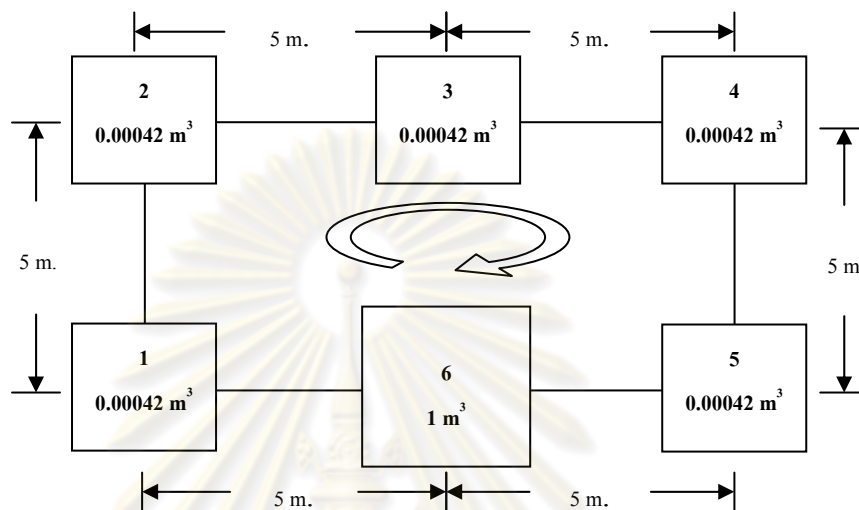
รูปภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.20 ในกรณีเมื่อความดันตั้งต้นเป็น 5 MPa. ยังคงพบว่าได้ผลสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบ ปฐมภูมิ ภายใต้เงื่อนไขหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

4.2.1 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 6 โหนด

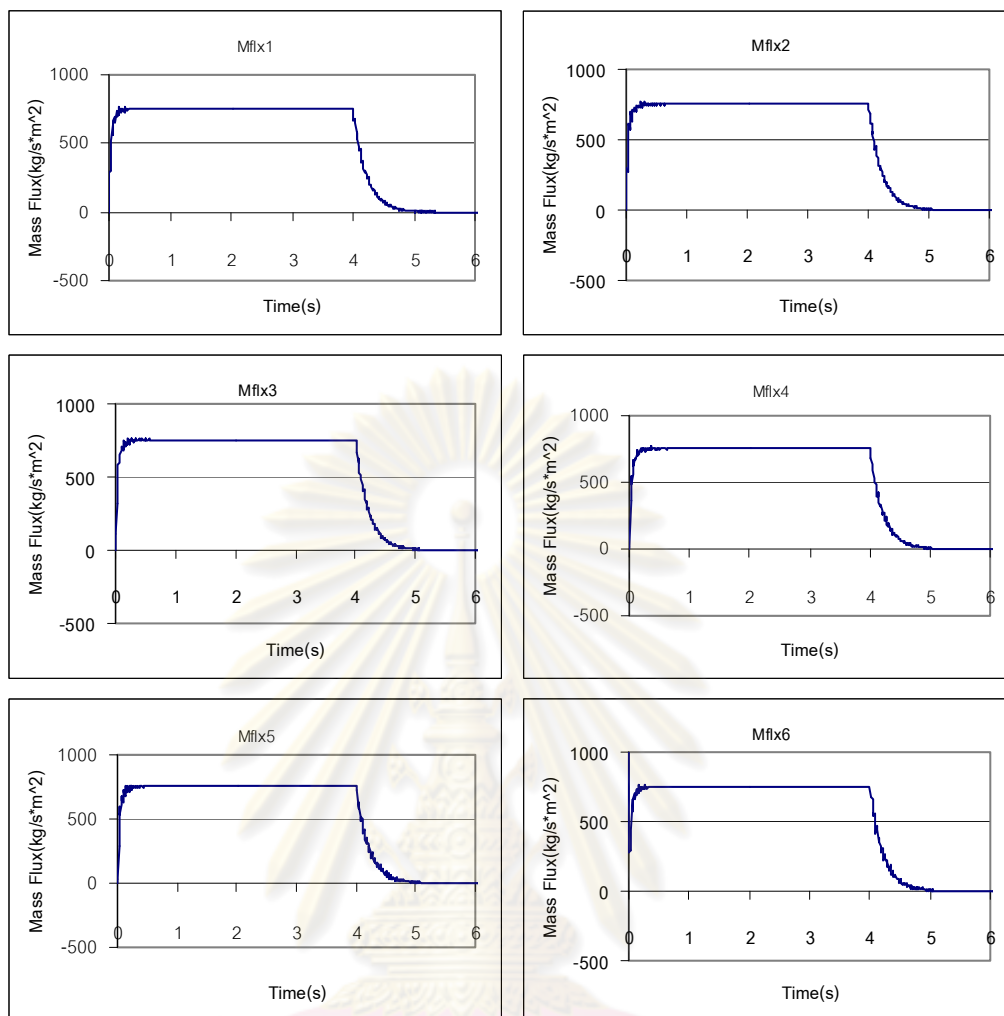


รูปภาพที่ 4.21 ระบบจำลองกรณีมี 6 โหนดโดยไม่มีปั๊มในระบบ

ก) ผลการทดสอบทางด้านอัตราการไหลในระบบ

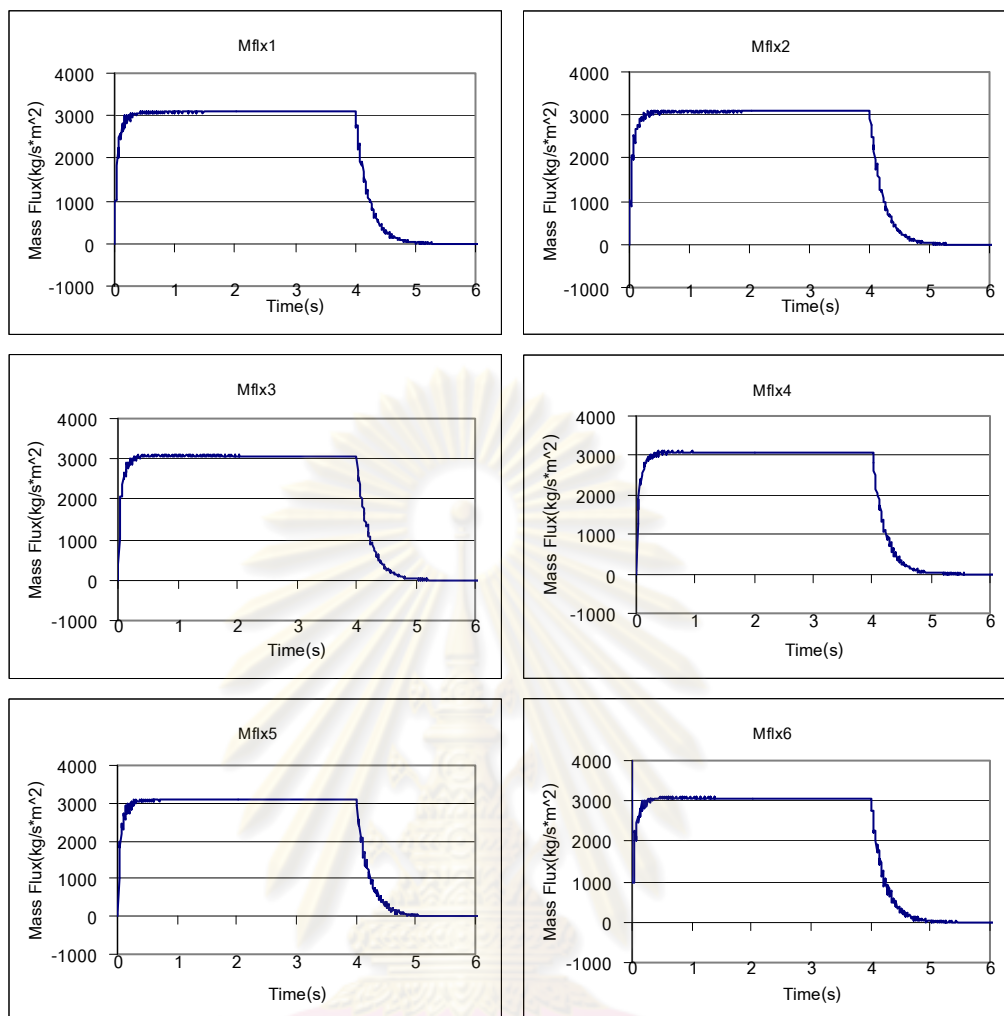
ผลการทดสอบนี้จะพิจารณาถึงอัตราการไหลโดยไม่มีปั๊มอยู่ในระบบ ซึ่งการจำลองจะพิจารณาเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว ณ เวลา $t = 4$ และดำเนินการไปกระทั่งอัตราการไหลมีค่าคงที่ โดยผลการทดสอบโปรแกรมจะพิจารณาในกรณีเดียวกับ 4.1.1 (ก) เมื่อความดันตั้งต้นคงที่ที่ 0.1 MPa . เป็นดังแสดงในรูปภาพที่ 4.22, 4.23 และ 4.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



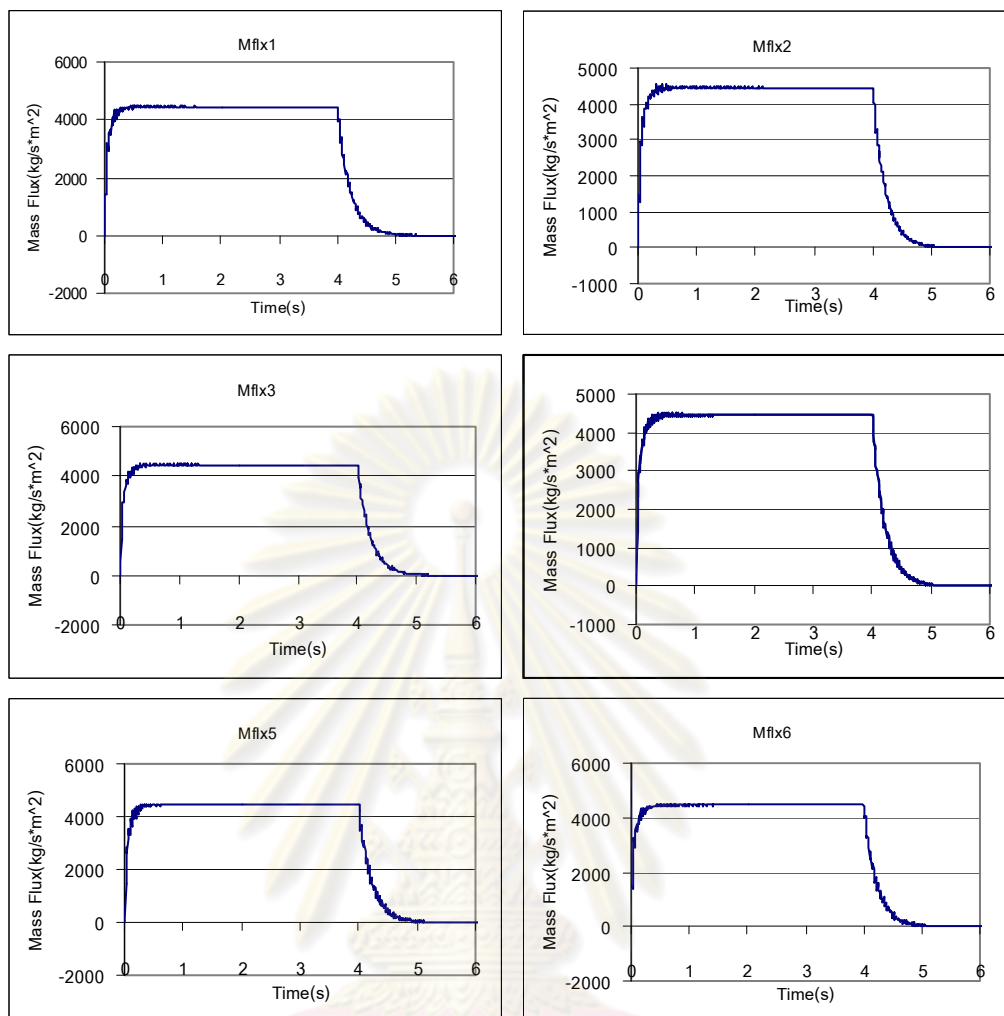
รูปภาพที่ 4.22 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.22 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับเวลา กรณีที่มีความดันตั้งต้นเป็น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. จะเห็นได้ชัดว่าหลังจากช่วงเวลา ที่ 4 วินาทีแรก ระบบมีอัตราการไหลในแต่ละโหนดลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจาก ได้หยุดการทำงานของปั๊มลง ในระบบจึงไม่มีแรงขับเคลื่อนจากปั๊ม เหลือเพียงแรงจากความดัน ในแต่ละโหนดที่มีผลต่อการขับเคลื่อนของไหลในระบบ แต่ในกรณีนี้ความดันตั้งต้นน้อยมาก จึงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในระบบ จึงทำให้เห็นชัดว่าเมื่ออยู่ในสภาวะหยุด การทำงานของปั๊ม อัตราการไหลจึงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นอัตราการไหลของ แต่ละโหนดเริ่มลู่เข้าหาค่าศูนย์ ทั้งนี้เพราะว่าระบบเริ่มปรับให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้แล้ว อัตราการไหลจึงเริ่มหยุดนิ่ง



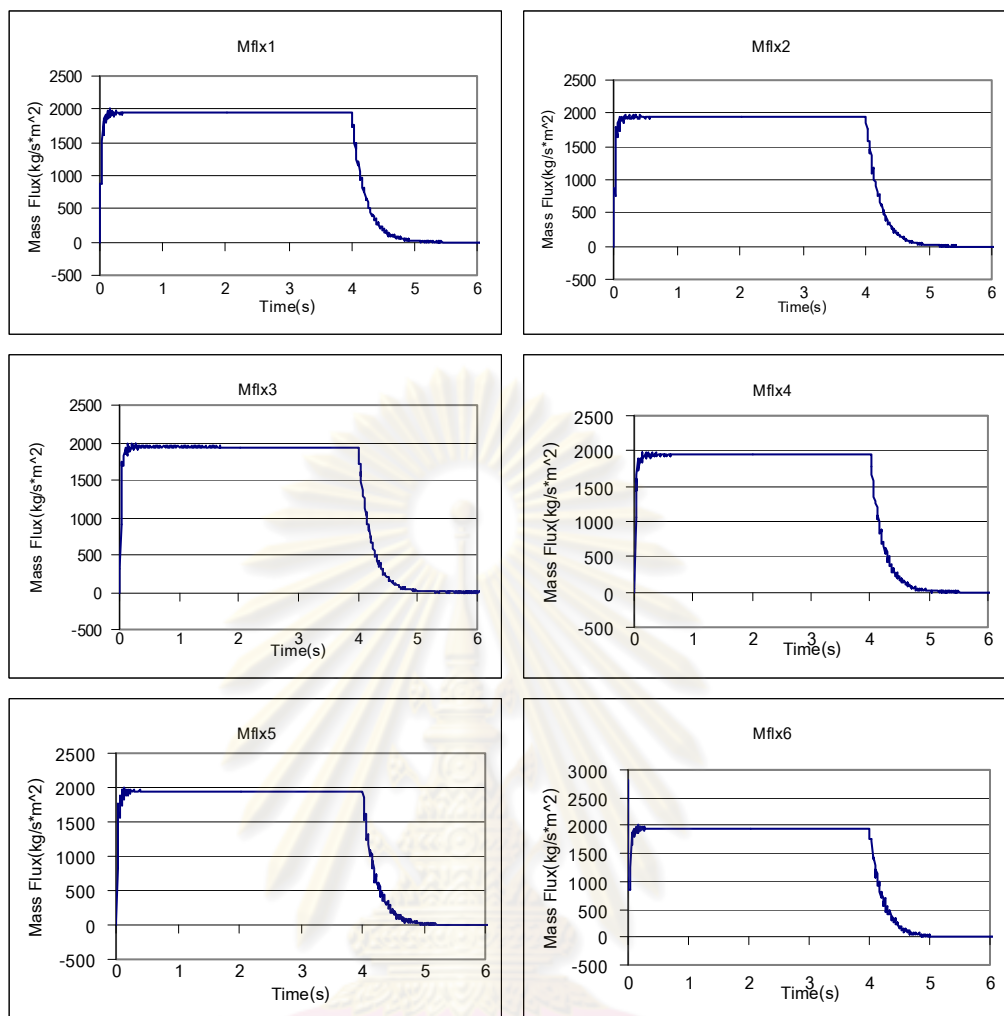
รูปภาพที่ 4.23 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.23 ซึ่งเป็นกรณีความดันตั้งต้นเป็น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ยังพบว่ากราฟมีลักษณะเดิม แต่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามกำลังของปั๊มที่เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบจึงทดลองเพิ่มกำลังปั๊มเป็น 2,000 W. เพื่อพิจารณาว่ากำลังของปั๊มยังส่งผลต่อการปรับค่าของอัตราการไหลในระบบให้อยู่ในสภาวะคงตัวหลังปิดปั๊มหรือไม่ หลังจากการหยุดปั๊ม ผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.24



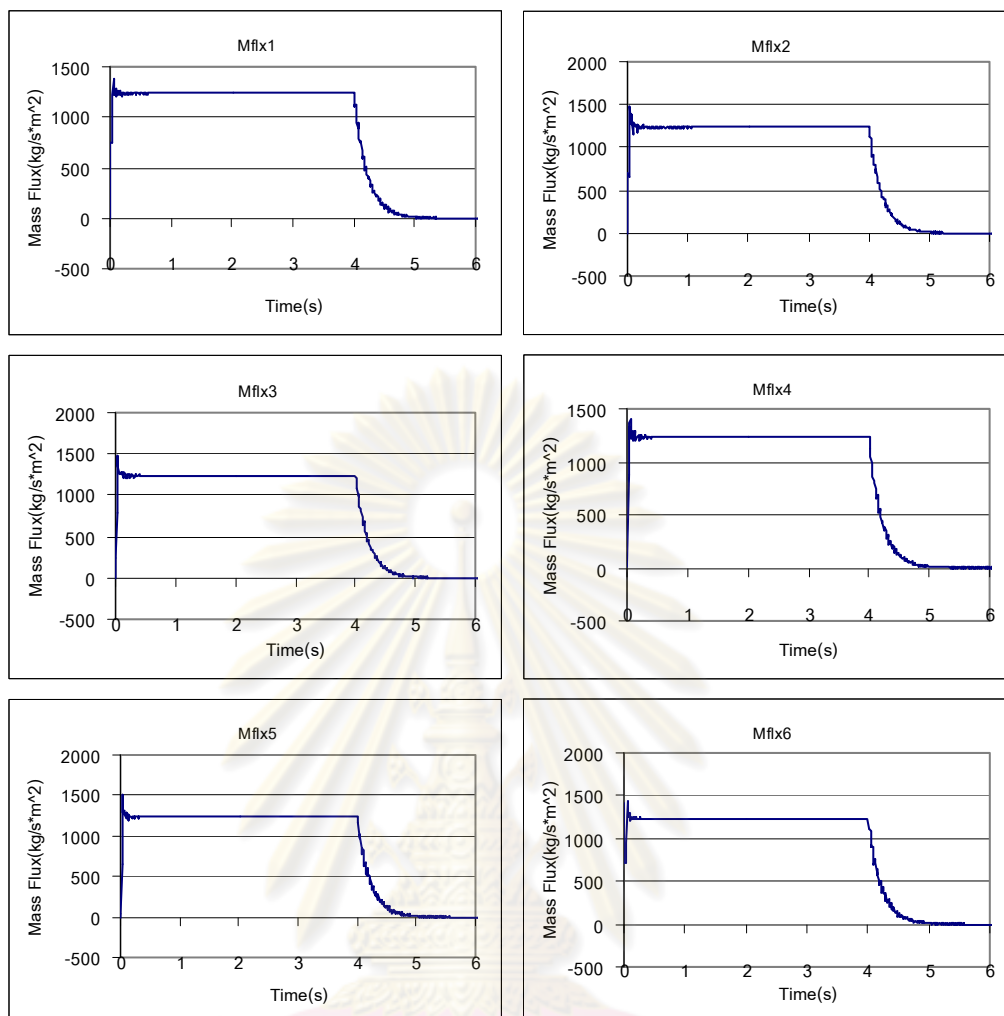
รูปภาพที่ 4.24 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1MPa. กำลังปั๊มที่ 2,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.24 เห็นชัดว่ากราฟยังคงมีลักษณะเดิม นั่นคือกำลังของปั๊มไม่ส่งผลต่อการปรับค่าของอัตราการไหลในระบบให้อยู่ในสภาวะหยุดนิ่งหลังหยุดปั๊ม เพื่อเป็นการทดสอบผลของความดันตั้งต้นในระบบต่ออัตราการไหลหลังหยุดปั๊ม จึงปรับให้กำลังของปั๊มคงที่ที่ 1,000 W. แล้วปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้นผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.25, 4.26, และ 4.27



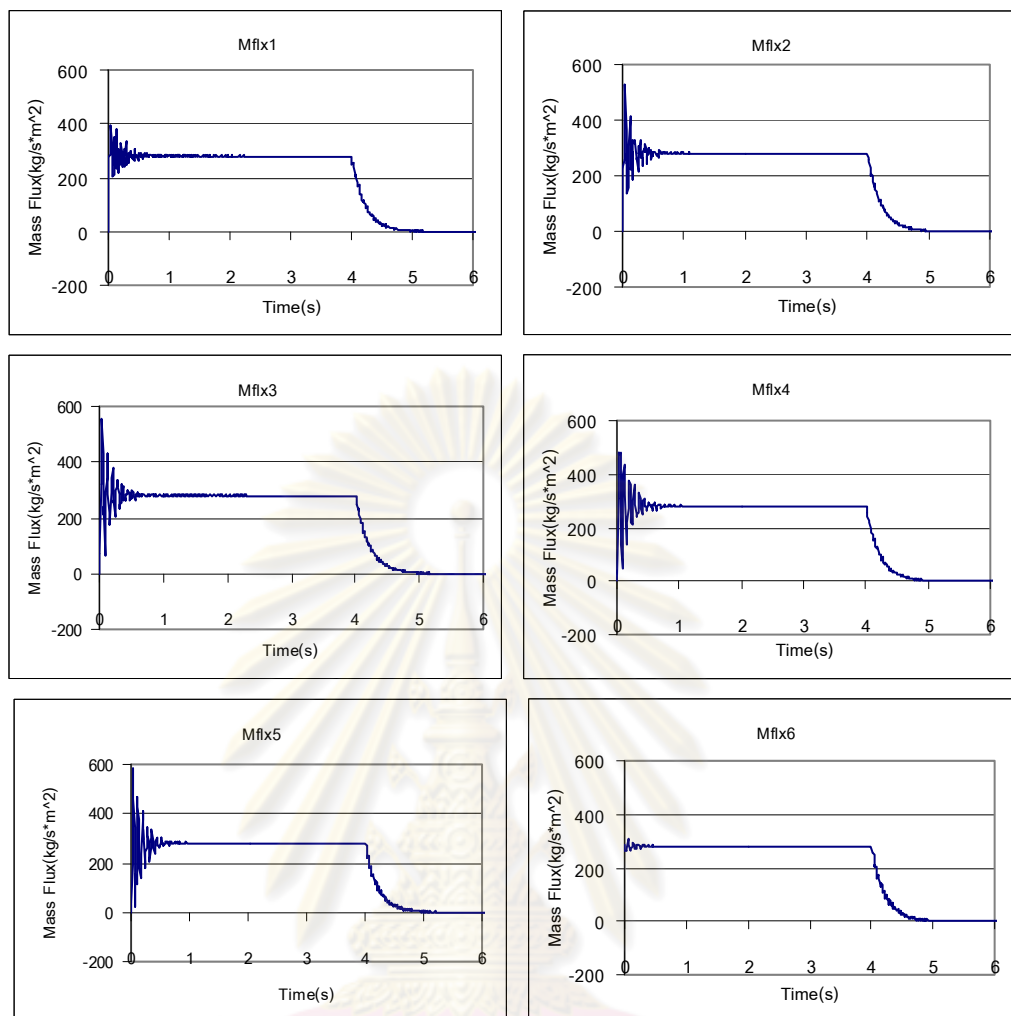
รูปภาพที่ 4.25 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปภาพที่ 4.25 เป็นกราฟแสดง ผลการทดสอบ โปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มเท่ากับ 1,000 W แต่จะมีการปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้นซึ่งความดันแต่ละโหนดเริ่มที่ 0.5 MPa. พบว่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดหลังจากช่วงเวลา 4 วินาทีแรกหลังหยุดปั๊ม อัตราการไหลมีการลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในระบบไม่มีแรงขับเคลื่อนจากปั๊ม เหลือเพียงแรงจากความดันในแต่ละโหนดที่มีผลต่อการขับเคลื่อนของไหลในระบบ โดยในกรณีนี้ ความดันตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 0.5 MPa. แต่ยังไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในระบบ จึงทำให้เห็นชัดว่าเมื่ออยู่ในสภาวะหยุดการทำงานของปั๊ม อัตราการไหลจึงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นอัตราการไหลของแต่ละโหนดเริ่มลู่เข้าหาค่าศูนย์ ทั้งนี้ เพราะวาระบบเริ่มปรับให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้แล้ว อัตราการไหลจึงเริ่มหยุดนิ่ง



รูปภาพที่ 4.26 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.26 ซึ่งเป็นกรณีความดันตั้งต้นเป็น 1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ยังพบว่ากราฟมีลักษณะเดิม เพื่อเป็นการเปรียบเทียบจึงทดลองเพิ่มความดันตั้งต้นเป็น 5 MPa. เพื่อพิจารณาว่าความดันตั้งต้นยังส่งผลต่อการปรับค่าของอัตราการไหลในระบบให้อยู่ในสภาวะคงตัวหรือไม่หลังจากการหยุดปั๊ม ผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.27

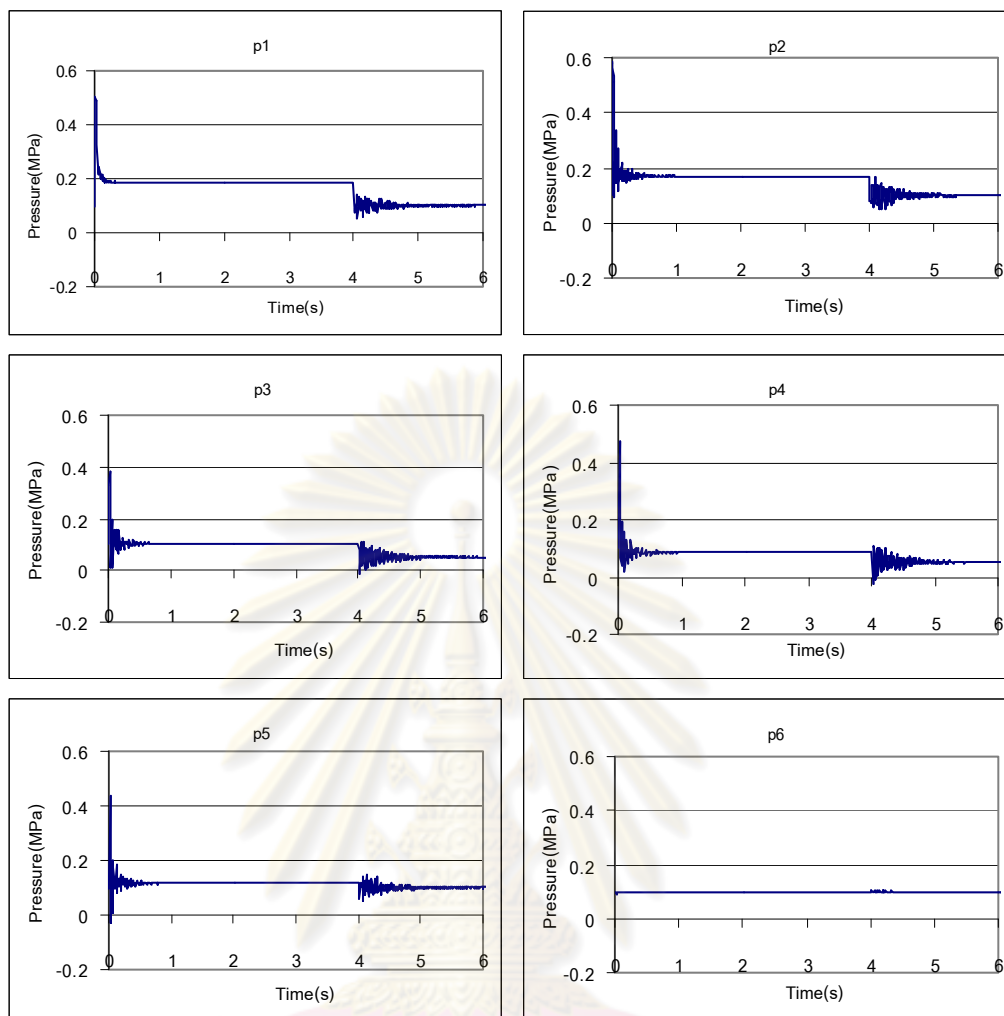


รูปภาพที่ 4.27 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.27 เห็นชัดว่ากราฟยังคงมีลักษณะเดิม นั่นคือความดันตั้งต้นไม่ส่งผลต่อการปรับค่าของอัตราการไหลในระบบให้อยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง หลังจากการหยุดปั๊มแล้ว

ข) ผลการทดสอบทางด้านความดันในระบบ

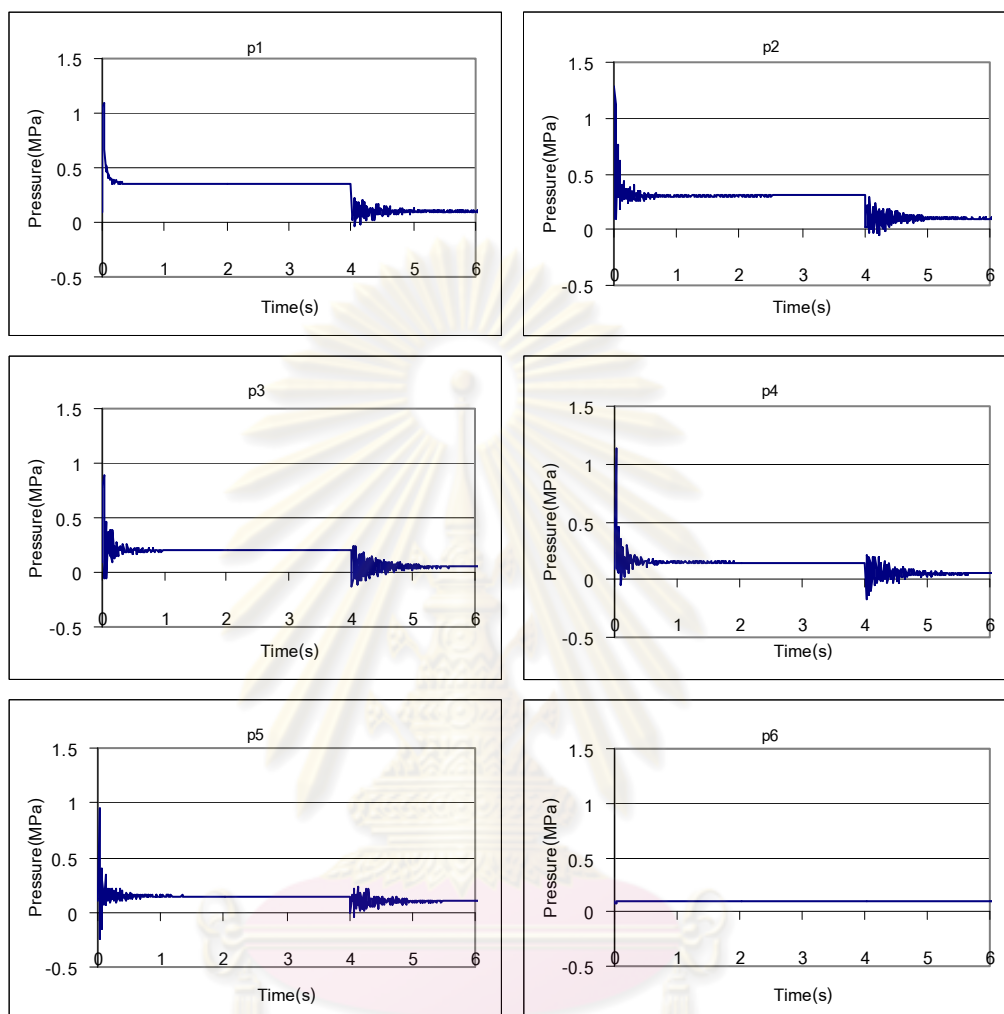
ผลการทดสอบนี้จะพิจารณาถึงความดันโดยไม่มีปั๊มในระบบ ซึ่งการจำลองจะพิจารณาเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว ณ เวลา $t = 4$ และดำเนินการไปกระทั่งอัตราการไหลมีค่าคงที่ โดยผลการทดสอบโปรแกรมจะพิจารณาในกรณีเดียวกับ 4.1.1 (ข)



รูปภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa. กำลังปั๊มที่ 100 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลา เมื่อหยุดการทำงานของปั๊ม โดยจะเริ่มพิจารณาจากกราฟเมื่อเวลาที่ $t = 4$ จากกราฟจะเห็นได้ชัดว่า ในช่วงเวลาที่ 4 – 5 วินาทีในแต่ละโหนดมีการแกว่งของค่าความดัน ทั้งนี้เนื่องจากปั๊มหยุดการทำงาน จึงทำให้ความดันในแต่ละโหนดที่ได้จากปั๊มลดลง จึงเกิดการแกว่งของค่าความดันในแต่ละโหนดตามมา แต่หลังจากนั้นความดันของแต่ละโหนดเริ่มคงที่ โดยที่ความดันที่โหนด 3 และ 4 จะมีค่าน้อยกว่าโหนดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากระบบเริ่มปรับเข้าสู่สภาวะคงตัวเหลือเพียงผลของแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลต่อความดันในระบบ โดยที่โหนดที่ 3 และ 4 ได้รับผลของแรงโน้มถ่วงน้อยกว่าโหนดอื่น จึงทำให้ความดันของโหนด 3 และ 4 น้อยกว่าโหนดอื่น ส่วนโหนดที่ 6 ความดันคงที่ เพราะว่าปริมาตรของโหนดที่ 6 มีขนาดใหญ่่มากเมื่อเทียบกับโหนดอื่นๆ ทำให้ความดันที่ลดลงเนื่องจากการหยุดการทำงานของปั๊มส่งผล

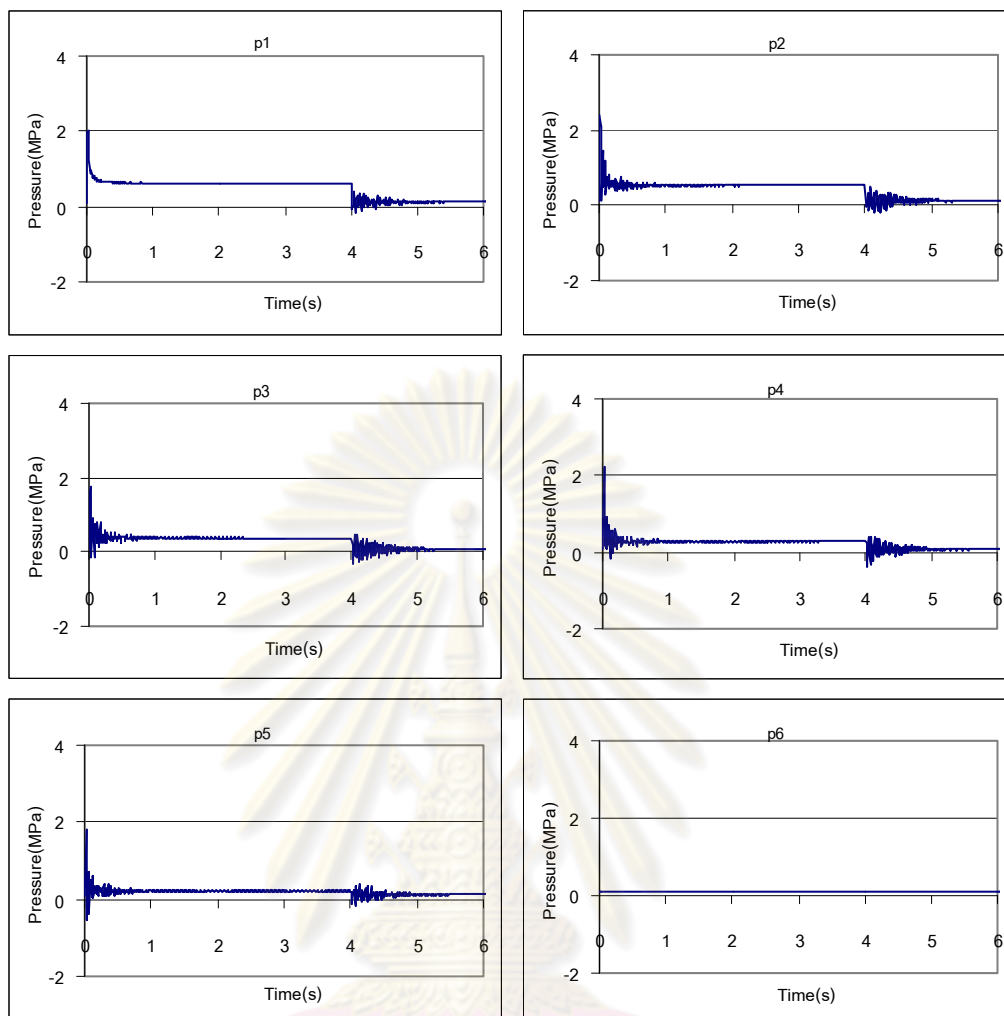
น้อยมากต่อความดันรวมในโหนดที่ 6 จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความดันเกิดขึ้นในโหนดนี้



รูปภาพที่ 4.29 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa.

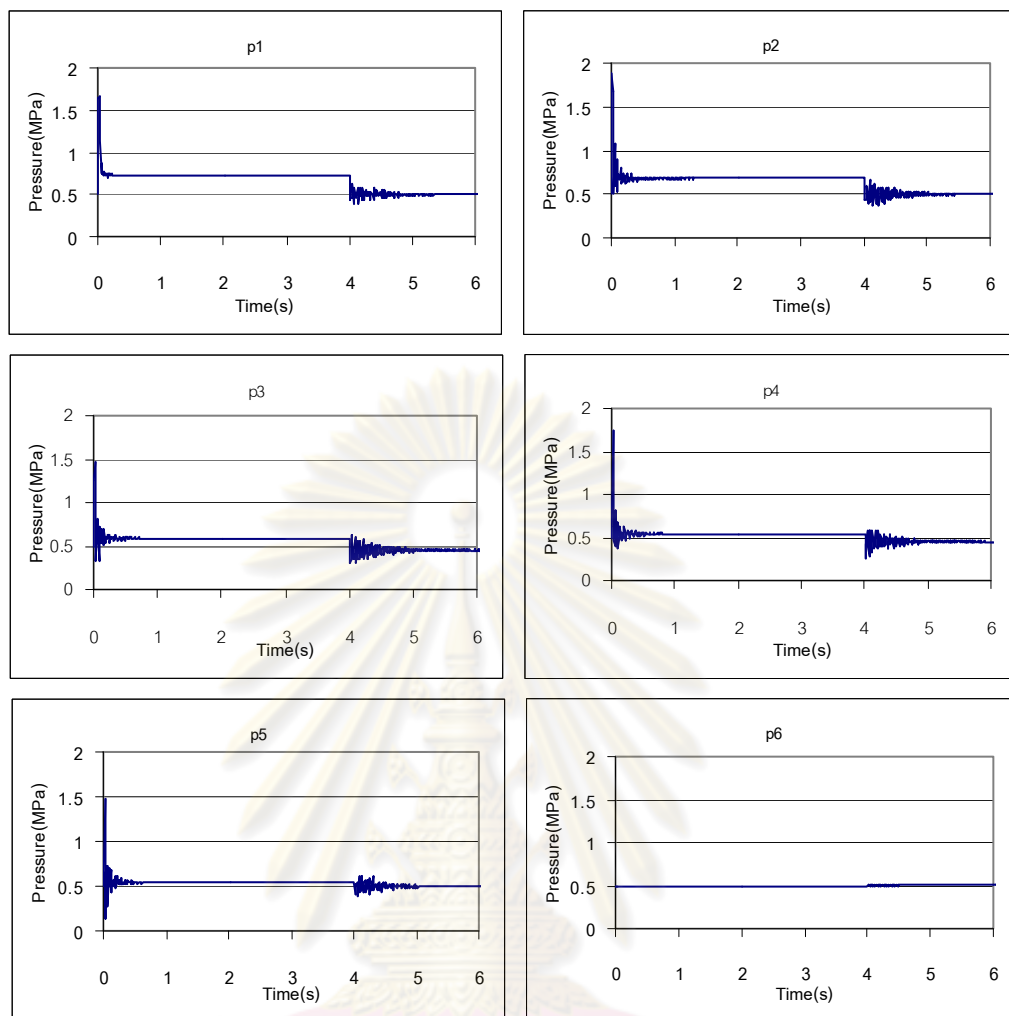
กำลังปั๊มที่ 550 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.29 จะพบว่ากราฟมีลักษณะเดิม คือช่วงเวลาของการแกว่ง และการเข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อพิจารณาว่ากำลังของปั๊มมีผลต่อความเสถียรของความดันในระบบหรือไม่หลังหยุดการทำงานของปั๊ม จึงปรับกำลังของปั๊มเป็น 2,000 W. ผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.30



รูปภาพที่ 4.30 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 2,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

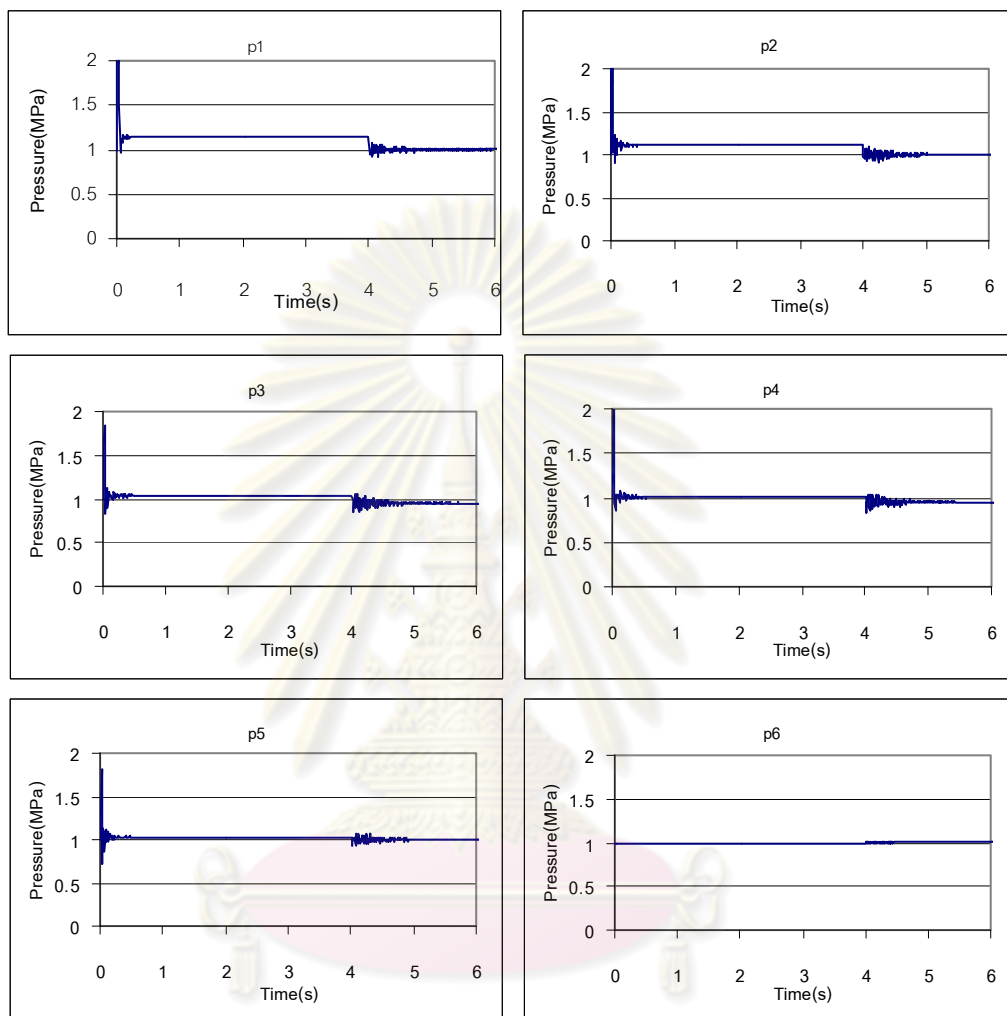
จากรูปภาพที่ 4.30 เห็นชัดว่ากราฟยังคงมีลักษณะเดิม นั่นคือกำลังของปั๊มไม่มีผลต่อความเสถียรของความดันในระบบหลังการหยุดการทำงานของปั๊ม ต่อไปจะพิจารณาว่าผลของความดันตั้งต้น ส่งผลต่อความเสถียรของความดันในระบบหลังการหยุดการทำงานของปั๊มหรือไม่ จึงทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้น แต่กำลังของปั๊มคงที่ที่ 1,000 W. ผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.31, 4.32 และ 4.33



รูปภาพที่ 4.31 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

รูปที่ 4.31 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบโปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มเท่ากับ 1,000 W แต่จะมีการปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้น โดยในกราฟนี้ จะมีความดันตั้งต้นในแต่ละโหนดที่ 0.5 MPa. และจะพิจารณาจากกราฟที่เวลา $t = 4$ เป็นต้นไป พบว่าความดันแต่ละโหนดมีการแกว่งของความดันในช่วงเวลาที่ 4 - 5 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากปั๊มหยุดการทำงาน จึงทำให้ความดันในแต่ละโหนดที่ได้จากปั๊มลดลง จึงเกิดการแกว่งของค่าความดันในแต่ละโหนดตามมา แต่หลังจากนั้นความดันของแต่ละโหนดเริ่มคงที่ โดยที่ความดันที่โหนด 3 และ 4 จะมีค่าน้อยกว่าโหนดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากระบบเริ่มปรับเข้าสู่สภาวะคงตัวเหลือเพียงผลของแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลต่อความดันในระบบ โดยที่โหนดที่ 3 และ 4 ได้รับผลของแรงโน้มถ่วงน้อยกว่าโหนดอื่น จึงทำให้ความดันของโหนด 3 และ 4 น้อยกว่าโหนดอื่น ส่วนโหนดที่ 6 ความดันคงที่ เพราะว่าปริมาตรของโหนดที่ 6 มีขนาดใหญ่มาก

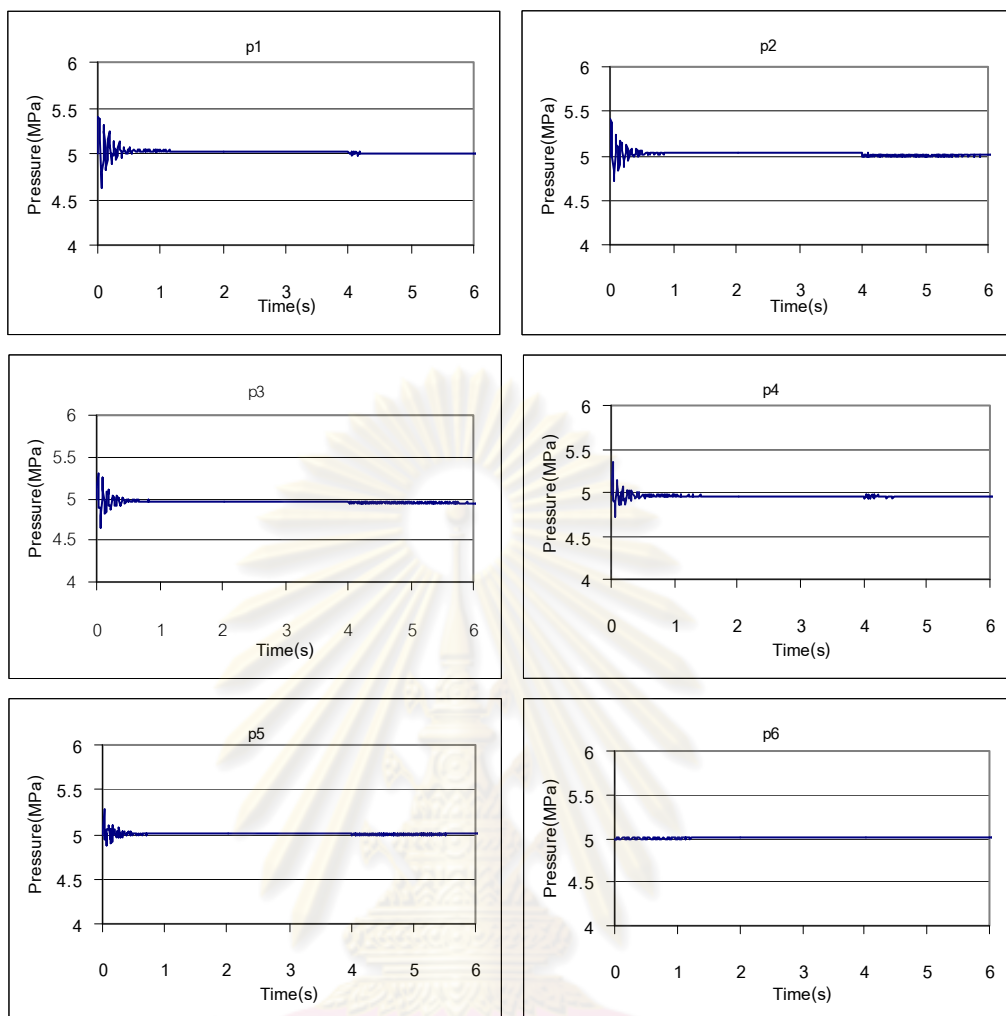
เมื่อเทียบกับ โหนดอื่นๆ ทำให้ความดันที่ลดลงเนื่องจากการหยุดการทำงานของปั๊ม ส่งผลน้อยมากต่อความดันรวมในโหนดที่ 6 จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความดันเกิดขึ้นในโหนดนี้



รูปภาพที่ 4.32 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa.

กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.32 ความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. ผลที่ได้มีลักษณะเดียวกับกรณีความดันตั้งต้น 0.5 MPa. ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.31 แต่ช่วงการแกว่งของความดันมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความดันเริ่มต้นในระบบสูงขึ้น จึงทำให้พายุการทำงานของปั๊มแล้ว ผลของความดันที่ลดลงซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความดันตั้งต้น จึงไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในแต่ละโหนด ทำให้ขนาดการแกว่งของค่าความดันในแต่ละโหนดลดลง

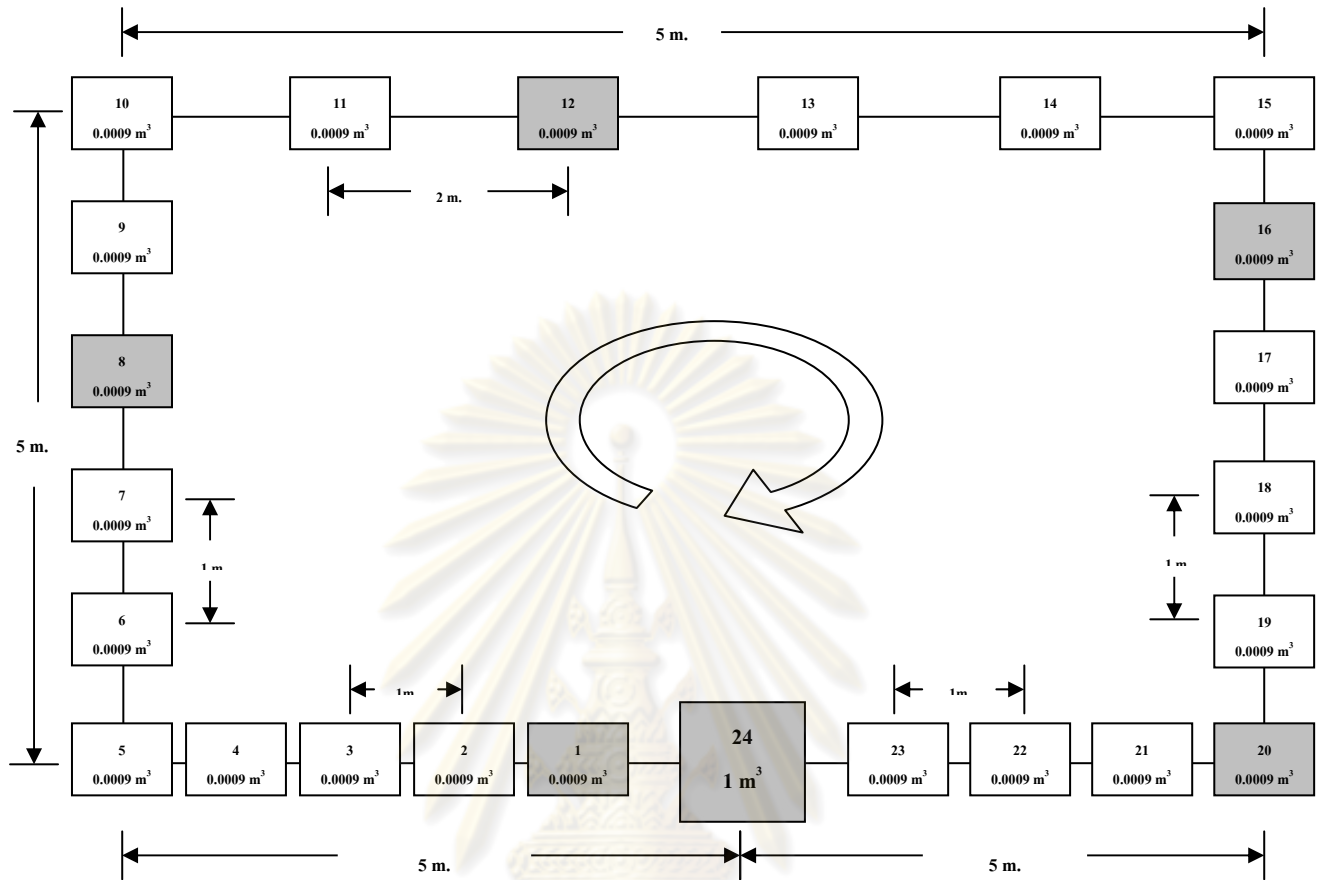


รูปภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa.

กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 6 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.33 ความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 5 MPa. ผลที่ได้เห็นชัดเจนว่าช่วงการแกว่งของความดันมีขนาดลดลงมาก นั่นคือความดันตั้งต้นมีผลต่อขนาดการแกว่งของความดันหลังการหยุดการทำงานของปั๊ม แต่ไม่ส่งผลต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.2.2 ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำลอง กรณีที่มี 24 โหนด

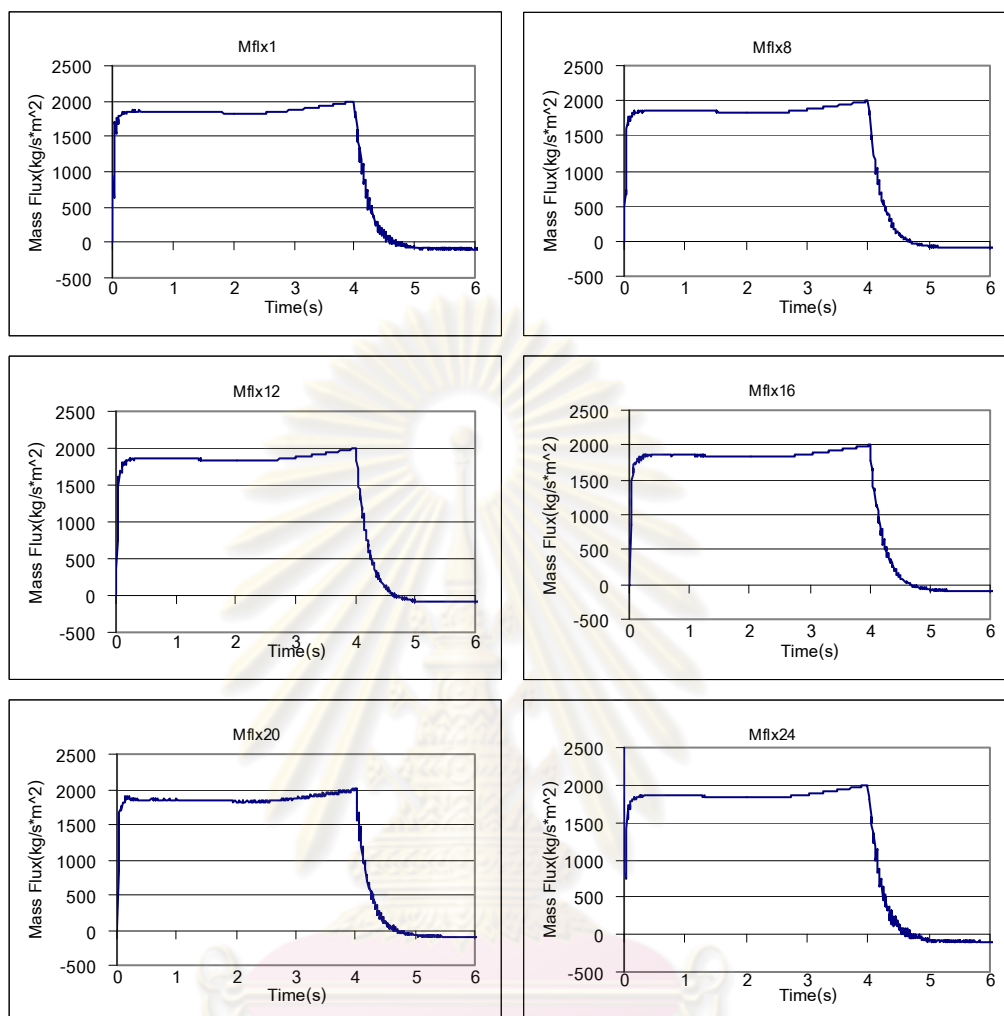


รูปภาพที่ 4.34 ระบบจำลองกรณีมี 24 โหนดโดยไม่มีปั๊มในระบบ

ผลการทดสอบโปรแกรมในกรณี 24 โหนดนี้ จะชี้ถึงผลกระทบของความละเอียดในการจำลองระบบต่อผลการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

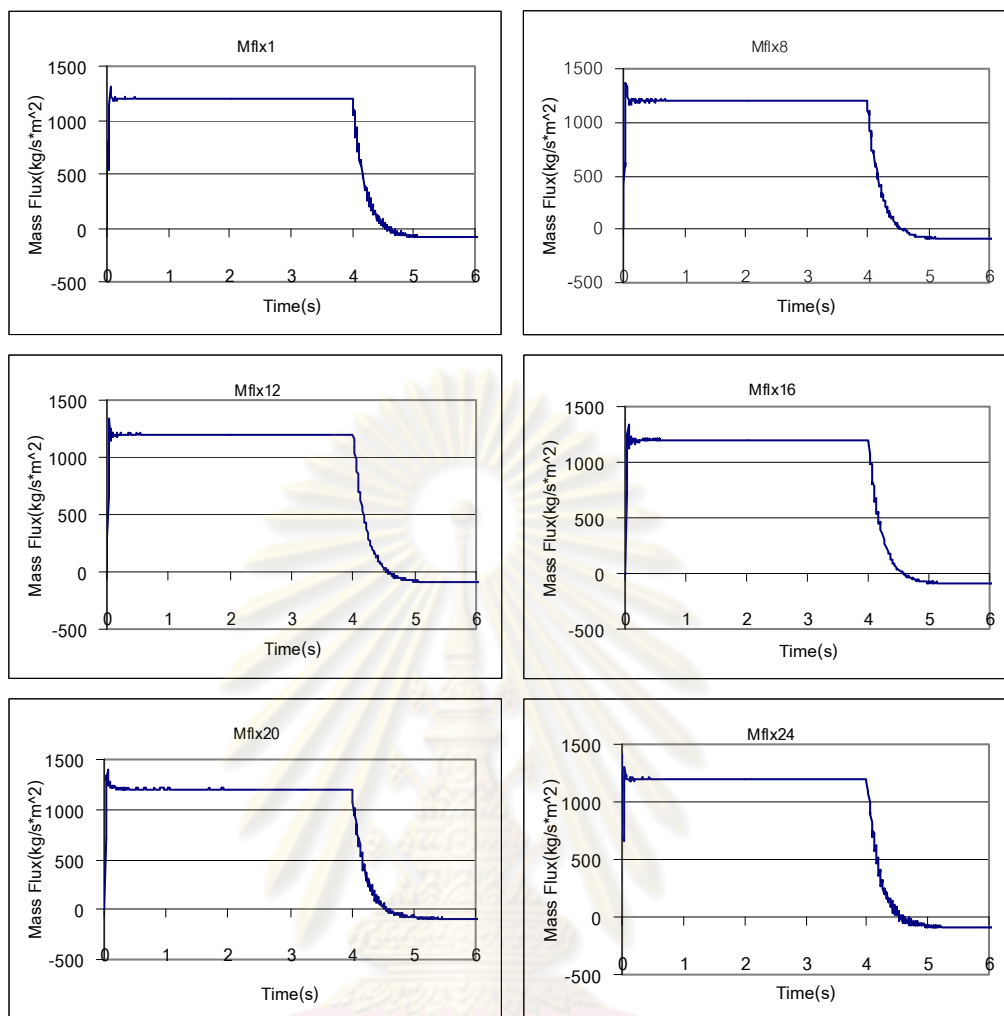
ก) ผลการทดสอบทางด้านอัตราการไหลในระบบ



รูปภาพที่ 4.35 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa.

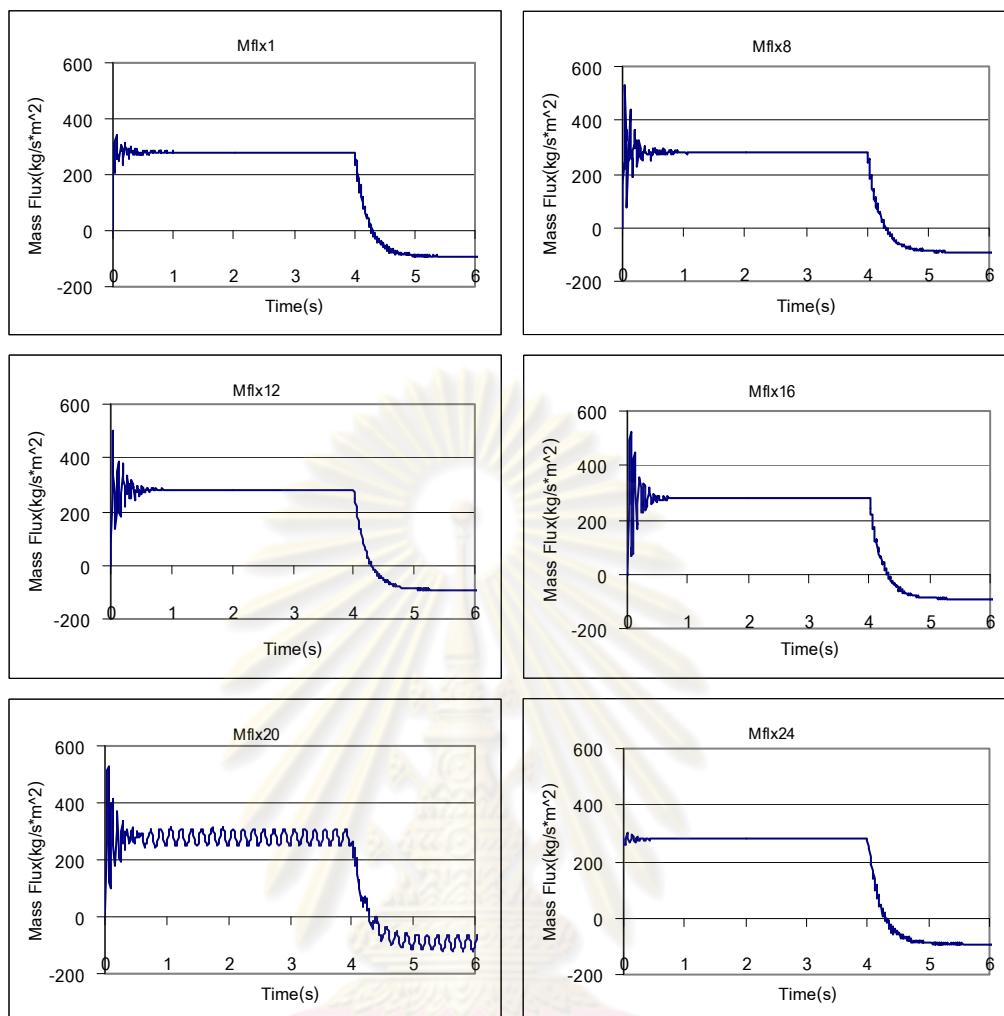
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

รูปภาพที่ 4.35 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบของโปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. แต่มีความดันตั้งต้นของแต่ละโหนดคือ 0.5 MPa. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟ ในรูปภาพที่ 4.25 ของกรณีที่มี 6 โหนด กล่าวคือค่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดมีค่าใกล้เคียงกัน ณ เวลาที่สอดคล้องกัน กับทั้งมีช่วงระยะเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน แต่อัตราการไหลในช่วงที่สภาวะคงตัวมีผลแตกต่างกันคือมีค่าติดลบ แสดงว่ามีการไหลวนทิศกลับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากจำนวนโหนดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการไหลที่ลดลงส่งต่อมายังโหนดที่ 24 เข้าไปทำให้การปรับอัตราการไหลยังคงลดลงจนติดลบจนกระทั่งอัตราการไหลส่งมาถึงโหนดที่ 24 ที่มีปริมาตรขนาดใหญ่ทำให้อัตราการไหลที่ลดลงไม่ส่งผลต่อไป อัตราการไหลจึงเริ่มคงที่ที่ค่าลบนั้น



รูปภาพที่ 4.36 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

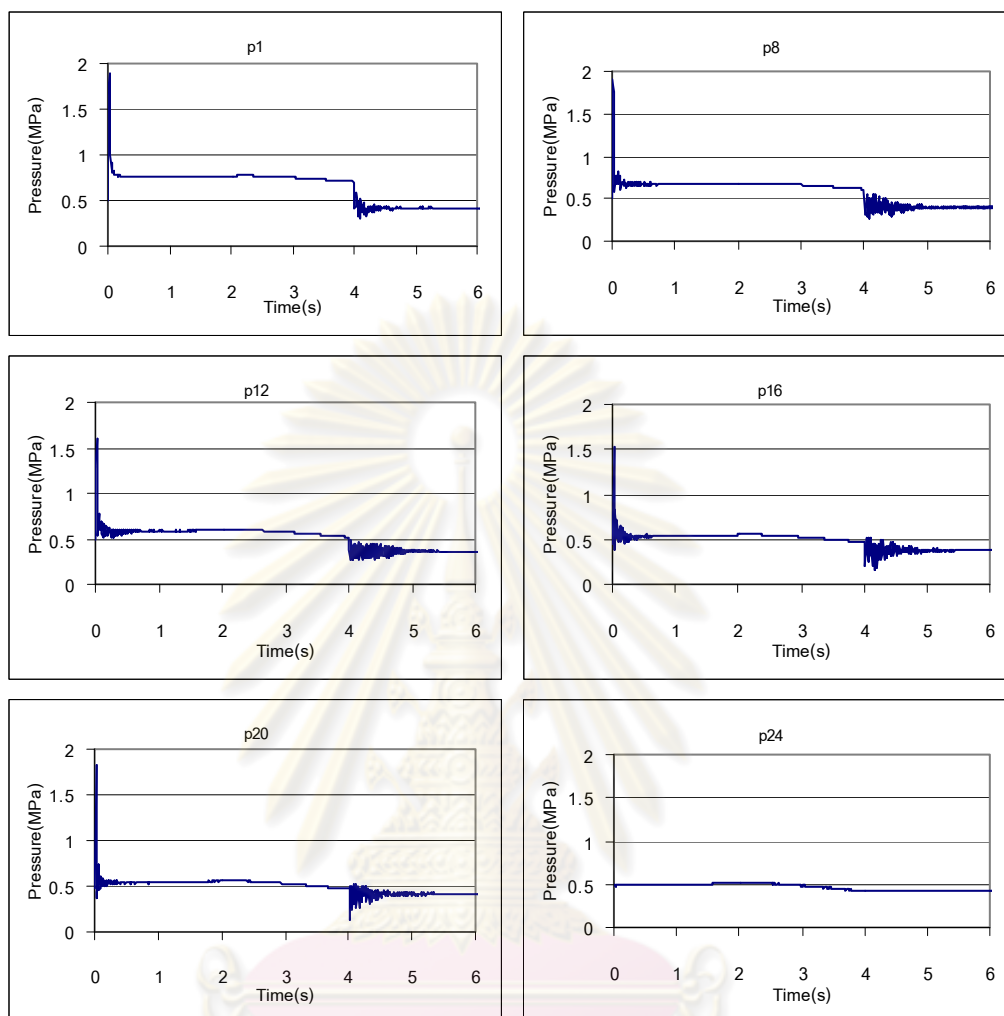
จากรูปภาพที่ 4.36 คือกรณีความดันตั้งต้นเป็น 1 MPa. กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟในรูปภาพที่ 4.26 ของกรณีที่มี 6 โหนด แต่ค่าอัตราการไหลในแต่ละโหนดที่เข้าสู่สถานะคงตัวมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราการไหลลดลง ทำให้อัตราการไหลส่งต่อมายังโหนดที่ 24 นานมากขึ้น ทำให้การปรับอัตราการไหลยังคงลดลงจนติดลบมากขึ้น จนกระทั่งอัตราการไหลส่งมาถึงโหนดที่ 24 ที่มีปริมาตรขนาดใหญ่ทำให้อัตราการไหลที่ลดลงไม่ส่งผลต่อไป อัตราการไหลจึงเริ่มคงที่ที่ค่านั้น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ จึงทดลองเพิ่มความดันตั้งต้นเป็น 5 MPa. เพื่อพิจารณาว่าความดันตั้งต้นมีผลต่อค่าของอัตราการไหลในระบบที่อยู่ในสถานะคงที่หรือไม่ หลังการหยุดการทำงานของปั๊มผลที่ได้เป็นดังรูปภาพที่ 4.37



รูปภาพที่ 4.37 กราฟแสดงอัตราการไหลของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.37 กรณีที่ความดันตั้งต้นเป็น 5 MPa. กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟในรูปภาพที่ 4.27 ของกรณีที่ 6 โหนด และเห็นได้ชัดว่าค่าของอัตราการไหลในแต่ละโหนดที่อยู่ในสภาวะคงตัวมีค่าลดลง นั่นคือความดันตั้งต้นมีผลต่อการปรับค่าของ อัตราการไหลในแต่ละโหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัวหลังการหยุดการทำงานของปั๊ม ส่วนโหนดที่ 20 ที่ค่าอัตราการไหลในช่วงสภาวะคงตัวยังมีการแกว่งอยู่เนื่องมาจาก เป็นตำแหน่งที่อยู่เชื่อมระหว่างแนวตั้งและแนวนอนของระบบ (ดูรูปภาพที่ 4.34) ทำให้ได้รับอัตราการไหลจากแนวตั้งที่ค่าหนึ่ง กับ อัตราการไหลที่แนวนอนค่าหนึ่ง จึงทำให้อัตราการไหลในโหนดเกิดการแกว่งขึ้น

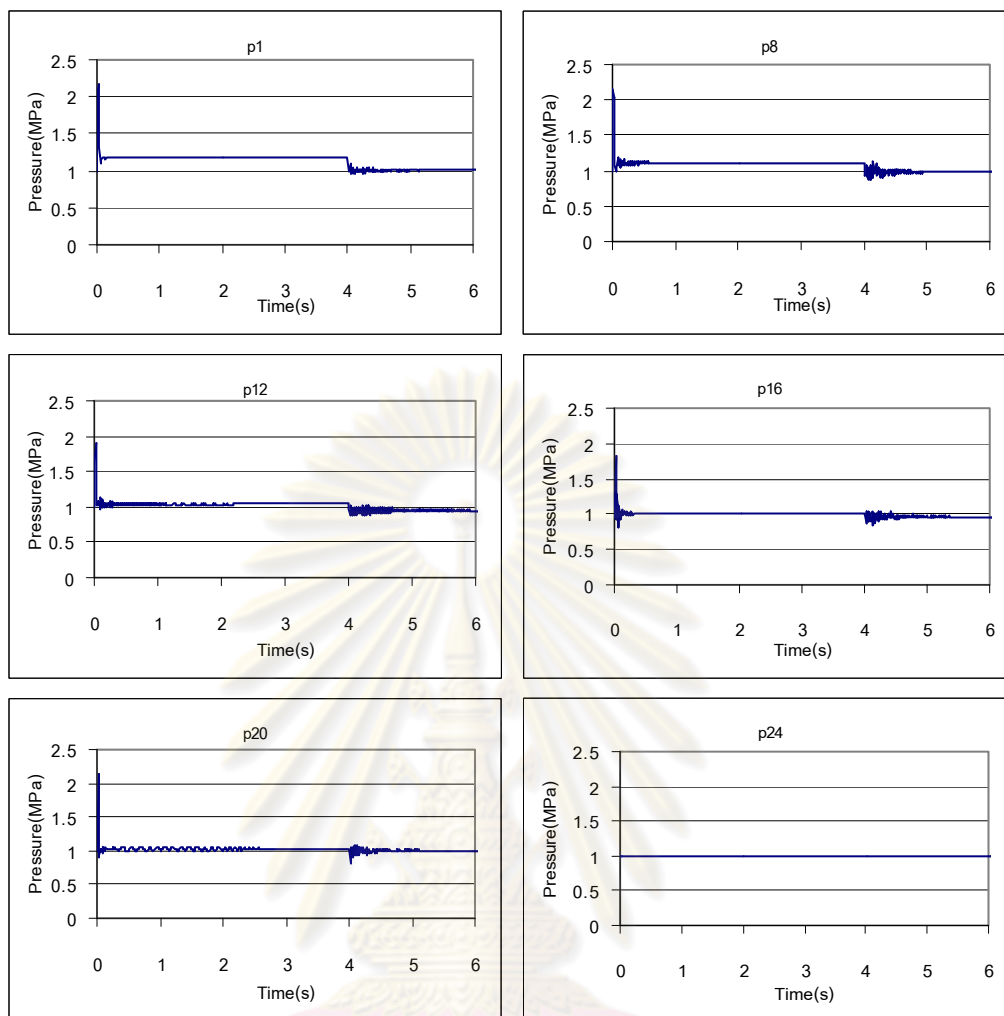
ข) ผลการทดสอบทางด้านความดันในระบบ



รูปภาพที่ 4.38 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 0.5 MPa.

กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

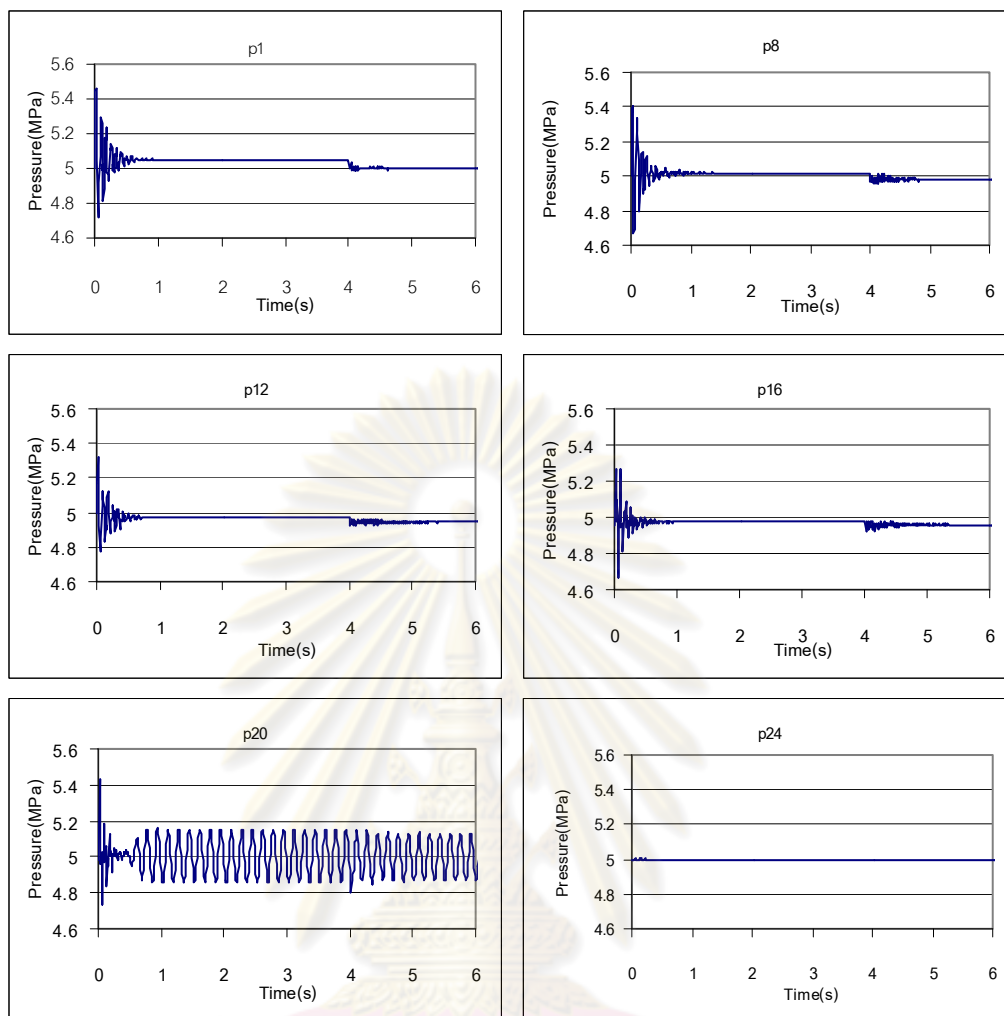
รูปภาพที่ 4.38 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบของโปรแกรม เมื่อกำหนดให้กำลังของปั๊มคือ 1,000 W. แต่มีความดันตั้งต้นของแต่ละโหนดคือ 0.5 MPa. พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟ ในรูปภาพที่ 4.31 ของกรณีที่มี 6 โหนด กล่าวคือช่วงขนาดการแกว่งของความดันมีค่าใกล้เคียงกัน ณ เวลาที่สอดคล้องกัน กับทั้งมีช่วงระยะเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน



รูปภาพที่ 4.39 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 1 MPa.
กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลาก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

เมื่อมีการปรับความดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 1 MPa. ผลที่ได้ดังรูปภาพที่ 4.39
ยังสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดดังแสดงโดยรูปภาพที่ 4.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความดันของแต่ละโหนดซึ่งมีความดันตั้งต้น 5 MPa. กำลังปั๊มที่ 1,000 W. ในช่วงเวลา ก่อนปิดและหลังปิดปั๊ม กรณี 24 โหนด

จากรูปภาพที่ 4.40 ในกรณีเมื่อความดันตั้งต้นเป็น 1 MPa. ยังคงพบว่าได้ผลสอดคล้องกับกรณี 6 โหนดเช่นกัน มีเพียงแต่โหนดที่ 20 ที่ช่วงความดันเข้าสู่สภาวะคงตัว ยังคงมีการแกว่งอยู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่เชื่อมระหว่างแนวตั้งและแนวนอนของระบบ (ดูรูปภาพที่ 4.34) ทำให้ได้รับความดันจากโหนดก่อนหน้าแนวตั้งที่มีผลจากค่าความโน้มถ่วง กับ ความดันในแนวนอนจากโหนดหลังซึ่งไม่มีผลจากค่าความโน้มถ่วง จึงทำให้ความดันในโหนดเกิดการแกว่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กรณีการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวจากแรงดันของปั๊มในระบบปฏุมภูมิ ระหว่างการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

จากผลการทดสอบ โปรแกรมในการคำนวณอัตราการไหลในแต่ละโหนดของระบบ จากข้อมูลที่ได้ในกรณี 6 โหนด พบว่าเมื่อกำหนดให้ความดันในระบบคงที่ แต่ปรับเปลี่ยนกำลังของปั๊มจะเห็นได้ชัดเจนว่า กำลังของปั๊มมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลในระบบและระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งอัตราการไหลมีค่าคงที่ ทั้งนี้อัตราการไหลในระบบที่สภาวะคงตัวจะแปรผันตรงกับกำลังของปั๊ม และเมื่อพิจารณาที่กำลังของปั๊มคงที่แต่ปรับเปลี่ยนความดันจะพบว่า ความดันตั้งต้นของระบบที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้อัตราการไหลในสภาวะคงตัวของระบบลดลง ในส่วนของความแม่นยำในการจำลองระบบของโปรแกรมที่พัฒนานั้น พบว่าเมื่อจำลองระบบให้มีความละเอียดมากขึ้นยังให้ผลสอดคล้องกัน จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนามีความเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการพยายามจำลองระบบโดยใช้โหนดเพิ่มมากขึ้นกว่านี้พบว่า ไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้ตลอดช่วงที่ต้องการพิจารณา ซึ่งแสดงว่าโปรแกรมที่พัฒนานี้ยังมีข้อจำกัดในส่วนของจำนวนโหนด ที่สามารถใช้ในการจำลองระบบ

จากผลการทดสอบโปรแกรมในการคำนวณความดันของระบบ จากข้อมูลที่ได้ในกรณี 6 โหนดพบว่าเมื่อกำหนดให้ความดันในระบบคงที่ แต่ปรับเปลี่ยนกำลังของปั๊มจะเห็นได้ชัดเจนว่า กำลังของปั๊มมีผลต่อการควบคุมการไหลของระบบ ตัวอย่างเช่นจากรูปภาพที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มกำลังของปั๊มจาก 100 W. เป็น 550 W. พบว่าปั๊มเริ่มมีผลต่อการควบคุมการไหลทั้งระบบ จึงสรุปได้ว่า กำลังของปั๊มในการควบคุมการไหลทั้งระบบจะแปรผันตามความดันตั้งต้นของระบบนั่นเอง และเมื่อพิจารณาที่กำลังของปั๊มคงที่แต่ปรับเปลี่ยนความดันจะพบว่า เมื่อความดันตั้งต้นของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่กำลังของปั๊มยังคงเดิมระบบเริ่มมีความเสถียรน้อยลง เมื่อการจำลองระบบมีความละเอียดมากขึ้นกล่าวคือ จำนวนโหนดเพิ่มขึ้นเป็น 24 โหนดพบว่า ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับกรณี 6 โหนด ซึ่งแปลว่าผลกระทบของจำนวนโหนดที่ใช้ต่อการคำนวณมีผลน้อยต่อการศึกษานี้ อย่างไรก็ตามการพยายามจำลองระบบโดยใช้โหนดเพิ่มมากขึ้นกว่านี้

ไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้ตลอดช่วงที่ต้องการพิจารณา ซึ่งแสดงว่าโปรแกรมที่พัฒนานี้ ยังมีข้อจำกัดในส่วนของจำนวน โหนด ที่สามารถใช้ในการจำลองระบบ ถ้าระบบมีความซับซ้อนกว่านี้อาจไม่สามารถจำลองได้อย่างถูกต้อง

5.1.2 การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวภายใต้เงื่อนไขก่อนเริ่มและหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

จากผลการทดสอบโปรแกรมในการคำนวณอัตราการไหลในแต่ละโหนดของระบบ จากข้อมูลที่ได้ในกรณี 6 โหนดพบว่าความดันตั้งต้นไม่ส่งผลต่อค่าของอัตราการไหลในระบบ และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะหยุดนิ่ง ในส่วนของความแม่นยำในการจำลองระบบของโปรแกรมที่พัฒนานั้น พบว่าเมื่อจำลองระบบให้มีความละเอียดมากขึ้นยังให้ผลสอดคล้องกัน โดยความดันตั้งต้นมีผลต่อค่าของอัตราการไหลในแต่ละโหนดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว นั่นคือค่าของอัตราการไหลในแต่ละโหนดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว จะแปรผกผันกับความดันตั้งต้น จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนามีความเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการพยายามจำลองระบบโดยใช้โหนดเพิ่มมากขึ้นกว่านี้พบว่า ไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้ตลอดช่วงที่ต้องการพิจารณา ซึ่งแสดงว่าโปรแกรมที่พัฒนานี้ยังมีข้อจำกัดในส่วนของจำนวนโหนด ที่สามารถใช้ในการจำลองระบบ

จากผลการทดสอบโปรแกรมในการคำนวณความดันของระบบ จากข้อมูลที่ได้ในกรณี 6 โหนดพบว่า การปรับเปลี่ยนความดันตั้งต้นในระบบ จะเห็นได้ชัดเจนว่า มีผลต่อช่วงขนาดการแกว่งของอัตราการไหลในแต่ละโหนด โดยช่วงขนาดการ แกว่งจะแปรผกผันกับความดันตั้งต้น แต่ความดันตั้งต้นไม่มีผลต่อช่วงระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อการจำลองระบบมีความละเอียดมากขึ้นกล่าวคือ จำนวนโหนดเพิ่มขึ้นเป็น 24 โหนดพบว่า ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับกรณี 6 โหนด ซึ่งแปลว่าผลกระทบของจำนวนโหนดที่ใช้ต่อการคำนวณมีผลน้อยต่อการศึกษานี้ อย่างไรก็ตามการพยายามจำลองระบบโดยใช้โหนดเพิ่มมากขึ้นกว่านี้ ไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้ตลอดช่วงที่ต้องการพิจารณา ซึ่งแสดงว่าโปรแกรมที่พัฒนานี้ยังมีข้อจำกัดในส่วนของจำนวนโหนด ที่สามารถใช้ในการจำลองระบบ ถ้าระบบมีความซับซ้อนกว่านี้อาจไม่สามารถจำลองได้อย่างถูกต้อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับโปรแกรมคำนวณทั้ง 2 กรณีสามารถพัฒนาให้ใช้กับระบบที่มีความละเอียดมากขึ้นได้โดยการปรับเปลี่ยนสมการสถานะ ทั้งนี้เนื่องจากในโปรแกรมคำนวณที่ผู้วิจัยได้ใช้นั้นเป็นสมการสถานะที่มีความคลาดเคลื่อนที่ไวมากต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของความดัน ซึ่งจะส่งผลต่อระบบจำลองที่ละเอียดมาก เพราะค่าความดันในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว จึงทำให้ผลคำนวณออกมาเกิดความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นหากผู้สนใจที่จะทำการพัฒนาโปรแกรมนี้ให้ใช้กับระบบที่ต้องการความละเอียดมากขึ้น อาจปรับเปลี่ยนสมการสถานะให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ก็จะสามารพัฒนาได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ชวน หลีกภัย. โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, หน้า 5. 30 มีนาคม 2537 ณ ตึกสันติไมตรี ทำเนียบรัฐบาล กรุงเทพมหานคร, 2537
- [2] อัจจง ชุมสาย ณ อยุธยา. ประโยชน์และคุณค่าของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, หน้า 22-23. 30 มีนาคม 2537 ณ ตึกสันติไมตรี ทำเนียบรัฐบาล กรุงเทพมหานคร, 2537
- [3] สุชาติ มงคลพันธ์. มารู้อีกโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, หน้า 43-44. 30 มีนาคม 2537 ณ ตึกสันติไมตรี ทำเนียบรัฐบาล กรุงเทพมหานคร, 2537
- [4] Agrawal. Y, Talbot. and Gong, K. Laser anemometer study of flow development in curved circular pipes. J. Fluid Mech 85 (1978) : 497-518.
- [5] Condina, R, Vazques, M. and Zienkiewicz, O.C. A General algorithm for compressible and incompressible flow – part III: The semi – implicit form. International Journal for Numerical Methods in Fluids 27 (1998) : 13-32.
- [6] Zienkiewicz, O.C, Nithiarasu, P, Condina, R, Vazquez, M and Ortiz, P. The Characteristic-based-split procedure: An efficient and accurate algorithm for fluid problems. International Journal for Numerical Methods in Fluids 31 (1999) : 359-392.
- [7] R. Byron bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot. Transport Phenomena. 2nd ed. USA : John Wiley& Sons, 1960.
- [8] Thorfot, E. Density of Fluids – Changing Pressure and Temperature. [Online]. 2005. Available from : http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html . [2009, Sep]
- [9] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [10] เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนการ. การกระจายตัวของความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนในท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเครื่องกล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] พัชรี ชีระเอก. การวิเคราะห์การไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัวโดยระเบียบวิธีการแยกด้วยคุณลักษณะและเอลิเมนต์ที่ปรับขนาดได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเครื่องกล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

- [12] ปฏิคม แซ่หลี่. การศึกษาระบบโครงข่ายการไหลของท่อทั่วไป ส่วนที่ 1 : ของไหลรูปเดียวในสถานะคงที่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต วิทยาลัยปิโตรเลียม และปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [13] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [14] Lester Haar , John S. Gallagher , and George S. Kell. NBS/NRC Steam Table:Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs For Vapor and Liquid States of Water in SI Units. 2nd ed.USA : Hemisphere Publishing Corporation, 1984.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. โปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐุมภุมิภายใต้เงื่อนไข ก่อนเริ่มการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมดังนี้

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

int i,nnodes;
double R[nnodes+1], Uo[nnodes+1], C[nnodes+1], XPI, D, L, G[nnodes+1], Cd[nnodes+1];
double v[nnodes+1],p[nnodes+1],t[nnodes+1],rho[nnodes+1],u[nnodes+1],
      p_o[nnodes+1],t_o[nnodes+1],rho_o[nnodes+1],u_[ nnodes+1],
      p_n[nnodes+1],t_n[nnodes+1],rho_n[nnodes+1],u_n[nnodes+1],h[nnodes+1],
      mflx[nnodes+1],mflxo[nnodes+1],mflxn[nnodes+1],Re[nnodes+1],
      marea,mr,t0,dt,tmax,time,dtnxt,tnxt,totmass,totenergy,p1,rho1,t1,u1,a,b,c,dp,power;

double cal_t(double u2, double u1, double t1, double c) {
    return (u2-u1)/c + t1;
}

double cal_p(double rho2, double rho1, double t2, double t1, double p1,double a, double b) {
    return p1 + b - b*rho1/(rho2+rho2*a*(t2-t1)) ;
}

double cal_rho(double p2, double p1, double t2, double t1, double rho1, double a, double b) {
    return (rho1/(1+a*(t2-t1)))/(1-(p2-p1)/b) ;
}

double cal_u(double t2, double t1, double u1,double c) {
    return c*(t2-t1) + u1;
}

double cal_Re(double r, double mflx) {
    return (2*r*mflx)/0.0653 ;
}

```

```

double cal_Cd(double re, double h1, double h2) {
    re = fabs(re);
    if( re==0 )                return 0.0 ;
    if( 0 < re && re < 2100 )  return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*(16.0/re) ;
    if( 2100 <= re && re < 1e5 ) return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*(0.07991/pow(re,0.25)) ;
    if( re >= 1e5 )           return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*0.0044 ;
}

int direction(double mf) {
    if(mf>=0.0) return 1;
    else if(mf<0.0) return -1;
    else return 0;
}

void calculate(double dt,double time,int nnodes){
    int notcnv,num,i;
    double dmass[nnodes+1];

    for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
        p_o[i] = p[i];          //pressure
        t_o[i] = t[i];          //temperature
        rho_o[i] = rho[i];      //density
        u_o[i] = u[i];          //internal energy
        mflxo[i] = mflx[i];     //massflux
    }
    num=0;
}

```

```

do {
    dmass[nnodes]=mflxo[nnodes]*marea*dt;

    for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
        Re[i] = cal_Re(mr,mflxo[i]);
        Cd[i] = cal_Cd(Re[i],h[i],h[i+1]);
        dmass[i]= mflxo[i]*marea*dt;

    if(i==1)
        rho_n[i]=rho[i]-(dmass[i]-dmass[nnodes])/v[i];
    else
        rho_n[i]=rho[i]-(dmass[i]-dmass[i-1])/v[i];

    if(i != nnodes)
        mflxn[i]=mflx[i]+dt*(
            -(mflxo[i+1]*mflxo[i+1]/rho_o[i+1]-mflxo[i]*mflxo[i]/rho_o[i])
            /(h[i+1]-h[i])
            -(p_o[i+1]-p_o[i])/(h[i+1]-h[i]) +G[i]*(rho_o[i+1]+rho_o[i])/2.0
            -Cd[i]*mflxo[i]*mflxo[i]*(1.0/rho_o[i]+1.0/rho_o[i+1])*direction(mflxo[i])
            /(2*XPI*mr*mr*(h[i+1]-h[i]))
        );
    else
        mflxn[i]=(power*rho_o[i])/(marea*(p_o[1])); //massflux

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

if(i==1)
    u_n[i] = ((rho[i]*(u[i]+(mflx[i]+mflx[nnodes]))*(mflx[i]+mflx[nnodes]))
              /(2*rho[i]*rho[i]))+
              dt*(-(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*marea*(u_o[i]+(mflxo[i]+mflxo[nnodes]))
                  *(mflxo[i]+mflxo[nnodes]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))-
              p_o[i]*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*marea/rho_o[i]
              -((Cd[nnodes]+Cd[i])/2)*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])
              *(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])
              *marea/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))/v[i])/rho_o[i]
              -(mflxo[i]+mflxo[nnodes])*(mflxo[i]+mflxo[nnodes])
              /(2*rho_o[i]*rho_o[i]));
else
    u_n[i] =((rho[i]*(u[i]+(mflx[i]+mflx[i-1]))*(mflx[i]+mflx[i-1]))/(2*rho[i]*rho[i]))+
              dt*(-(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea*(u_o[i]+(mflxo[i]+mflxo[i-1]))
                  *(mflxo[i]+mflxo[i-1]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))-
              p_o[i]*(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea/rho_o[i]
              -((Cd[i-1]+Cd[i])/2)*(mflxo[i]-mflxo[i-1])*(mflxo[i]-mflxo[i-1])
              *(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))/v[i])/rho_o[i]
              -(mflxo[i]+mflxo[i-1])*(mflxo[i]+mflxo[i-1]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]));

t_n[i]=cal_t(u_n[i],u1,t1,c);
p_n[i]=cal_p(rho_n[i],rho1,t_n[i],t1,p1,a,b);
}
num=num+1;
notcnv = 0;

```

```

for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
    if(fabs((p_n[i] - p_o[i])/p_o[i]) > 1e-4) notcnv = 1;
        else rho_o[i]=rho_n[i];
            u_o[i]=u_n[i];
            t_o[i]=t_n[i];
            p_o[i]=p_n[i];
            mflxo[i]=mflxn[i];
    }
} while((notcnv == 1) && (num<=100));

if(notcnv == 1){
    printf("Error! Convergence not reached! Program Stopped!\n");
    system("pause");
    exit(1);
}

for(i=1;i<=nnodes;i++){
    if(i != nnodes){
        p[i]=p_o[i]; //pressure
        t[i]=t_o[i]; //temperature
        rho[i]=rho_o[i]; //density
        u[i]=u_o[i]; //internal energy
        mflx[i]=mflxo[i]; //massflux
    }
    else {
        p[i]=p_o[i];
        t[i]=t_o[i]; //temperature
        rho[i]=rho_o[i]; //density
        u[i]=u_o[i]; //internal energy
        mflx[i]=(power*rho[i])/(marea*(p[1])); //massflux
    }
}
}
}

```

```

void main() {
    nnodes =24;          // จำนวนโหนดในระบบ
    XPI    =atan(1.0)*4.0;
    t0     =0.0;
    dt     =1e-6;
    dtnxt  =0.01;
    time   =0.0;
    tnxt   =time;
    tmax   =5.0;

    p1     =100000;
    rho1   =997.1;
    t1     =25.0;
    u1     =700000;
    a      =0.00021 ;    // Constant (Volumetric Temperature Coefficients - bata)
                        // water : 0.00021 (1/ °C)
    b      =(2.15)*1e9; // Constant (Bulk Modulus Fluid Elasticity some common
                        // Fluids – E) water : 2.15*10^9 (N/m^2 or Pa)
    c      =1877.74;    // Constant of Temp.

    power  =1000.0;     // Power of Pump (watt)
    mr     =0.015;     // Unit (m.)
    marea  =XPI*mr*mr; // Unit (m^2)

    FILE *fp;
    fp = fopen("ที่อยู่ของไฟล์ข้อมูลที่นำเข้ามาคำนวณ","r");
    if(fp==NULL) printf("Can not open file\n");

```

```

do{
    for(i=1;i<=nnodes;i++){
        fscanf(fp,"%lf%lf%lf%lf%lf",&v[i],&p[i],&t[i],&h[i],&G[i]);
        rho[i] = cal_rho(p[i],p1,t[i],t1,rho1,a,b);
        u[i]    = cal_u(t[i],t1,u1,c);
        mflx[i] = 0.0;
        Cd[i]   = 0.0;
    }
    printf("\n");
    h[nnodes+1]= h[1]+h[nnodes]; // Unit (m.)
} while(!feof(fp));
fclose(fp);

do{
    calculate(dt,time,nnodes);
    if(time>=tnxt) {
        printf( "%7.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf\n",
            time,p[1],p[2*nnodes/6],p[3*nnodes/6],p[4*nnodes/6],p[5*nnodes/6],
            p[nnodes] );
        tnxt=time+dt;
    }
    time=time+dt;
} while(time<=tmax);

return ;

}

```


2. โปรแกรมการคำนวณลักษณะการไหลของของไหลสถานะเดียวในระบบปฐภูมิภายใต้เงื่อนไขหลังหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมดังนี้

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

int i,nnodes;
double R[nnodes+1], Uo[nnodes+1], C[nnodes+1], XPI, D, L, G[nnodes+1], Cd[nnodes+1];
double v[nnodes+1],p[nnodes+1],t[nnodes+1],rho[nnodes+1],u[nnodes+1],
      p_o[nnodes+1],t_o[nnodes+1],rho_o[nnodes+1],u_[ nnodes+1],
      p_n[nnodes+1],t_n[nnodes+1],rho_n[nnodes+1],u_n[nnodes+1],h[nnodes+1],
      mflx[nnodes+1],mflxo[nnodes+1],mflxn[nnodes+1],Re[nnodes+1],
      marea,mr,t0,dt,tmax,time,dtnxt,tnxt,totmass,totenergy,p1,rho1,t1,u1,a,b,c,dp,power;

double cal_t(double u2, double u1, double t1, double c) {
    return (u2-u1)/c + t1;
}

double cal_p(double rho2, double rho1, double t2, double t1, double p1,double a, double b) {
    return p1 + b - b*rho1/(rho2+rho2*a*(t2-t1)) ;
}

double cal_rho(double p2, double p1, double t2, double t1, double rho1, double a, double b) {
    return (rho1/(1+a*(t2-t1)))/(1-(p2-p1)/b) ;
}

double cal_u(double t2, double t1, double u1,double c) {
    return c*(t2-t1) + u1;
}

double cal_Re(double r, double mflx) {
    return (2*r*mflx)/0.0653 ;
}

```

```

double cal_Cd(double re, double h1, double h2) {
    re = fabs(re);
    if( re==0 )                return 0.0 ;
    if( 0 < re && re < 2100 )   return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*(16.0/re) ;
    if( 2100 <= re && re < 1e5 ) return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*(0.07991/pow(re,0.25)) ;
    if( re >= 1e5 )           return 2.0*XPI*mr*(h2-h1)*0.0044 ;
}

int direction(double mf) {
    if(mf>=0.0) return 1;
    else if(mf<0.0) return -1;
    else return 0;
}

void calculate(double dt,double time,int nnodes){
    int notcnv,num,i;
    double dmass[nnodes+1];

    for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
        p_o[i] = p[i];          //pressure
        t_o[i] = t[i];          //temperature
        rho_o[i] = rho[i];      //density
        u_o[i] = u[i];          //internal energy
        mflxo[i] = mflx[i];     //massflux
    }
    num=0;

    do {
        dmass[nnodes]=mflxo[nnodes]*marea*dt;

```

```

for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
    Re[i] = cal_Re(mr,mflxo[i]);
    Cd[i] = cal_Cd(Re[i],h[i],h[i+1]);
    dmass[i]= mflxo[i]*marea*dt;

if(i==1)
    rho_n[i]=rho[i]-(dmass[i]-dmass[nnodes])/v[i];
else
    rho_n[i]=rho[i]-(dmass[i]-dmass[i-1])/v[i];

if(i != nnodes)
    mflxn[i]=mflx[i]+dt*(
        -(mflxo[i+1]*mflxo[i+1]/rho_o[i+1]-mflxo[i]*mflxo[i]/rho_o[i])
        /(h[i+1]-h[i])
        -(p_o[i+1]-p_o[i])/(h[i+1]-h[i]) +G[i]*(rho_o[i+1]+rho_o[i])/2.0
        -Cd[i]*mflxo[i]*mflxo[i]*(1.0/rho_o[i]+1.0/rho_o[i+1])*direction(mflxo[i])
        /(2*XPI*mr*mr*(h[i+1]-h[i]))
    );

else {
    if(time < 4)
        mflxn[i]=(power*rho_o[i])/(marea*(p_o[1])); // massflux pump
    else
        mflxn[i]=mflx[i]+dt*(
            -(mflxo[1]*mflxo[1]/rho_o[1]-mflxo[i]*mflxo[i]/rho_o[i])
            /(h[i+1]-h[i])
            -(p_o[1]-p_o[i])/(h[i+1]-h[i])
            +G[i]*(rho_o[1]+rho_o[i])/2.0
            -Cd[i]*mflxo[i]*mflxo[i]*(1.0/rho_o[i]+1.0/rho_o[1])
            *direction(mflxo[i])/(2*XPI*mr*mr*(h[i+1]-h[i]))
        ); // massflux stop pump

```

```

if(i==1)
    u_n[i] = ((rho[i]*(u[i]+(mflx[i]+mflx[nnodes]))*(mflx[i]+mflx[nnodes]))
              /(2*rho[i]*rho[i]))+
              dt*(-(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*marea*(u_o[i]+(mflxo[i]+mflxo[nnodes]))
                  *(mflxo[i]+mflxo[nnodes]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))-
              p_o[i]*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*marea/rho_o[i]
              -((Cd[nnodes]+Cd[i])/2)*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])
              *(mflxo[i]-mflxo[nnodes])*(mflxo[i]-mflxo[nnodes])
              *marea/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))/v[i])/rho_o[i]
              -(mflxo[i]+mflxo[nnodes])*(mflxo[i]+mflxo[nnodes])
              /(2*rho_o[i]*rho_o[i]));
else
    u_n[i] =((rho[i]*(u[i]+(mflx[i]+mflx[i-1]))*(mflx[i]+mflx[i-1]))/(2*rho[i]*rho[i]))+
              dt*(-(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea*(u_o[i]+(mflxo[i]+mflxo[i-1]))
                  *(mflxo[i]+mflxo[i-1]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))-
              p_o[i]*(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea/rho_o[i]
              -((Cd[i-1]+Cd[i])/2)*(mflxo[i]-mflxo[i-1])*(mflxo[i]-mflxo[i-1])
              *(mflxo[i]-mflxo[i-1])*marea/(2*rho_o[i]*rho_o[i]))/v[i])/rho_o[i]
              -(mflxo[i]+mflxo[i-1])*(mflxo[i]+mflxo[i-1]))/(2*rho_o[i]*rho_o[i]));

t_n[i]=cal_t(u_n[i],u1,t1,c);
p_n[i]=cal_p(rho_n[i],rho1,t_n[i],t1,p1,a,b);
}
num=num+1;
notcnv = 0;

```

```

for(i = 1; i <= nnodes; i++) {
    if(fabs((p_n[i] - p_o[i])/p_o[i]) > 1e-4) notcnv = 1;
        else rho_o[i]=rho_n[i];
            u_o[i]=u_n[i];
            t_o[i]=t_n[i];
            p_o[i]=p_n[i];
            mflxo[i]=mflxn[i];
    }
} while((notcnv == 1) && (num<=100));

if(notcnv == 1){
    printf("Error! Convergence not reached! Program Stopped!\n");
    system("pause");
    exit(1);
}

for(i=1;i<=nnodes;i++){
    if(i != nnodes){
        p[i]=p_o[i]; //pressure
        t[i]=t_o[i]; //temperature
        rho[i]=rho_o[i]; //density
        u[i]=u_o[i]; //internal energy
        mflx[i]=mflxo[i]; //massflux
    }
}

```

```

else {
    p[i]=p_o[i];
    t[i]=t_o[i]; //temperature
    rho[i]=rho_o[i]; //density
    u[i]=u_o[i]; //internal energy
    if(time<4)
        mflx[i]=(power*rho[i])/(marea*(p[1])); //massflux
    else
        mflx[i]=mflxo[i]; //massflux
    }
}
}
}
void main() {
    nnodes =24; // จำนวนโหนดในระบบ
    XPI =atan(1.0)*4.0;
    t0 =0.0;
    dt =1e-6;
    dtnxt =0.01;
    time =0.0;
    tnxt =time;
    tmax =5.0;
    p1 =100000;
    rho1 =997.1;
    t1 =25.0;
    u1 =700000;
    a =0.00021 ; // Constant (Volumetric Temperature Coefficients - bata)
                    water : 0.00021 (1/ °C)
    b =(2.15)*1e9; // Constant (Bulk Modulus Fluid Elasticity some common
                    Fluids – E) water : 2.15*10^9 (N/m^2 or Pa)
    c =1877.74; // Constant of Temp.
    power =1000.0; // Power of Pump (watt)

```

```

mr      =0.015;          // Unit (m.)
mareas =XPI*mr*mr;     // Unit (m^2)

FILE *fp;

fp = fopen("ที่อยู่ของไฟล์ข้อมูลที่น่าเข้ามาคำนวณ","r");
if(fp==NULL) printf("Can not open file\n");
do{
    for(i=1;i<=nnodes;i++){
        fscanf(fp,"%lf%lf%lf%lf%lf",&v[i],&p[i],&t[i],&h[i],&G[i]);
        rho[i] = cal_rho(p[i],p1,t[i],t1,rho1,a,b);
        u[i]    = cal_u(t[i],t1,u1,c);
        mflx[i] = 0.0;
        Cd[i]   = 0.0; }
    printf("\n");
    h[nnodes+1]= h[1]+h[nnodes]; // Unit (m.)
} while(!feof(fp));
fclose(fp);

do{
    calculate(dt,time,nnodes);
    if(time>=tnxt) {
        printf( "%7.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf %12.2lf\n",
            time,p[1],p[2*nnodes/6],p[3*nnodes/6],p[4*nnodes/6],p[5*nnodes/6],
            p[nnodes] );
        tnxt=time+dt;
    }
    time=time+dt;
} while(time<=tmax);

return ;

}

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้านาย ปัญญา แซ่ลี เกิดเมื่อวันที่ ๒ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๒๕ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา ๒๕๔๕ และได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทั้งในระดับปริญญาบัณฑิตและปริญญามหาบัณฑิต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย