การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัว ในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

นายอนันตชัย เพชรรักษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF STEADY-STATE TEMPERATURE DISTRIBUTION AND HEAT TRANSFER

IN THE TRR-1/M1 REACTOR CORE

MR. ANANTACHAI   PECHRAK

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1
โดย	นายอนันตชัย เพชรรักษ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ชนาธิป ทิพยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทรโยธา)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. ชนาธิป ทิพยกุล)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. แสนสุข เวชชการัณย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนันตชัย เพชรรักษ์ : การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1. (ANALYSIS OF STEADY-STATE TEMPERATURE DISTRIBUTION AND HEAT TRANSFER IN THE TRR-1/M1 REACTOR CORE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต,อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ชนาธิป ทิพยกุล, 108 หน้า.

การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1 (ปปว -1/1) ได้ทำการสร้างแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์ฯ โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 และนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ซึ่งได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ที่แต่ละระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ และที่ระยะความสูงต่างๆตามแนวแกนปฏิกรณ์ฯ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ ระหว่างผลการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 และผลจากการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของสารระบายความร้อน ที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์มีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง อย่างไรก็ตาม การที่ค่าประเมินซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลองก็เป็นการแสดงให้เห็นถึงการอนุรักษ์นิยมของแบบจำลองเพื่อการคำนวณที่จะให้ค่าที่สูงกว่าค่าใช้งานจริง ซึ่งก็หมายความว่าหากค่าจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ทำงานอยู่ภายใต้สภาวะความปลอดภัยแล้ว การปฏิบัติงานจริงก็ย่อมมีความปลอดภัยอย่างแน่นอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4970675021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : COOLOD-N2 / STEADY-STATE THERMAL HYDRAULIC ANALYSIS / THAI RESEARCH REACTOR-1/MODIFICATION 1

ANANTACHAI PECHRAK : ANALYSIS OF STEADY-STATE TEMPERATURE DISTRIBUTION AND HEAT TRANSFER IN THE TRR-1/M1 REACTOR CORE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUNCHAI NILSUWANKOSIT,Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : CHANATIP TIPPAYAKUL,Ph.D., 108 pp.

An analysis of steady-state temperature distribution and heat transfer in the TRR-1/M1 reactor has been modeled with a computer code called "COOLOD-N2". To validate the accuracy of the model, experiments were set up to measure the in-core water temperature at various power and also different core levels. The code to measurement comparisons show that the developed model overestimates the measured values. However, the overestimation demonstrates the conservatism of the model, that is, it predicts higher temperatures than the actual values; hence, the reactor has higher safety margin. This assures that the heat generated in the reactor core is adequately removed to prevent the reactor core melting accident.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Nuclear Technology	Student's Signature
Field of Study : Nuclear Technology	Advisor's Signature
Academic Year : 2009	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต หัวหน้าภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดร. ชนาธิป ทิพยกุล และ ดร. แสนสุข เวชชการัณย์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) ตลอดจนคณาจารย์ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายจัดการเครื่องปฏิกรณ์ กลุ่มปฏิบัติการทางเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลองและร่วมเป็นเจ้าหน้าที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ฯเพื่อการวิจัยครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ.. ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง.. ฌ

สารบัญภาพ.. ญ

บทที่

1. บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาของปัญหา.. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.. 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.. 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.. 3

2. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1... 4

2.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1.............. 4

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1............... 5

2.3 องค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/
ปรับปรุงครั้งที่ 1.. 15

2.4 การระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1............... 17

3. รหัสคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย..................... 19

3.1 ลักษณะของรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2... 19

3.2 แบบจำลองการคำนวณการกระจายอุณหภูมิในเชื้อเพลิงแบบแท่ง...................... 20

3.3 แบบจำลองการคำนวณแรงดันตก.. 24

3.4 แบบจำลองการคำนวณการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ.. 26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย.. 30

4.1 การวัดค่าการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวใน แกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1.. 30

4.2 การคำนวณการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 โดยใช้โปรแกรมคำนวณสำหรับวิเคราะห์ของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย..... 33

5. ผลการวิจัย... 44

5.1 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกน ปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1.. 44

5.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่1 ที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยใช้ รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2…………………………………………………….. 58

5.3 การวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ตามข้อกำหนดด้านวิศวกรรม ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1........................ 79

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ... 83

6.1 สรุปผลการวิจัย... 83

6.2 ข้อเสนอแนะ.. 87

รายการอ้างอิง... 90

ภาคผนวก.. 91

ภาคผนวก ก.. 92

ภาคผนวก ข.. 95

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 108

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1	4
2.2	ข้อมูลจำเพาะของแท่งเชื้อเพลิง...	11
4.1	ข้อมูลของการวิเคราะห์บริเวณช่องการไหลที่ได้รับความร้อน...........................	41
4.2	ข้อมูลการวิเคราะห์ของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนบริเวณแผ่นรองนิรภัย	43
4.3	ข้อมูลการวิเคราะห์ของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนบริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกนปฏิกรณ์ฯ..	43
5.1	ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงโดยหัววัดอุณหภูมิที่อยู่ในแท่งเชื้อเพลิง..	44
5.2	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่1.............	47
5.3	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่2.............	48
5.4	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่3.............	49
5.5	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่4.............	50
5.6	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่5.............	51
5.7	แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่6.............	52
5.6	ข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2…………………………………………………………………...	56

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย..	5
2.2	บ่อปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1..	6
2.3	ภาพมุมมองจากด้านบนของบ่อปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1..........	7
2.4	ลักษณะแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1..................................	8
2.5	ลักษณะการจัดเรียงเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (แกนหมายเลข 17)..	8
2.6	ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1...	9
2.7	โครงสร้างของแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่1..	10
2.8	โครงสร้างแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายใน........................	12
2.9	ลักษณะการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม...	13
2.10	องค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1..	16
2.11	ภาพหน้าตัดแสดงแบบจำลองการกระจายความร้อนในแท่งเชื้อเพลิงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ..	17
2.12	การระบายความร้อนของแกนปฏิกรณ์ฯ..	18
3.1	แบบจำลองการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง...	21
3.2	ค่าพารามิเตอร์การคำนวณแรงดันตกสำหรับ COOLOD-N2…………………..	26
4.1	เครื่องวัดอุณหภูมิ..	30
4.2	หัววัดอุณหภูมิ..	31
4.3	แผนผังของหัววัดอุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิในเนื้อเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อน..	32
4.4	ช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิงสำหรับการทดลองวัด.................................	33
4.5	รูปทรงทางเรขาคณิตของแท่งเชื้อเพลิงและการแบ่งบริเวณเนื้อเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2………………………………	34
4.6	ผังแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1และแบบจำลองพื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณ...	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.7	แบบจำลองการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน ที่เกิดขึ้นกับแท่งเชื้อเพลิง..	37
4.8	แบบจำลองการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนที่เกิดขึ้น ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	38
4.9	ภาพตัดขวางของพื้นที่การไหลของสารระบายความร้อนที่ไหลผ่านครีบของแท่ง เชื้อเพลิง..	39
4.10	ช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ณ บริเวณแผ่นรองนิรภัย (safety plate)……..	41
4.11	ช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ณ บริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกน ปฏิกรณ์ฯ..	42
5.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดกับระดับ กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ..	45
5.2	ตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อยภายในแกนปฏิกรณ์ฯ……	46
5.3	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 1 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	53
5.4	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 2 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	53
5.5	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 3 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	54
5.6	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 4 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	54
5.7	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	55
5.8	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 6 ในแกนปฏิกรณ์ฯ..	55
5.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการ คำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ	57
5.10	การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดจากเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดบรรจุอยู่ภายใน ที่ตำแหน่ง B4 กับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2………..	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

5.11 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดจากเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดบรรจุอยู่ภายในที่ตำแหน่ง E7 กับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2.......... 59

5.12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 61

5.13 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 62

5.14 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 62

5.15 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 63

5.16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 63

5.17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 800 kW........ 64

5.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW........ 64

5.19 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW........ 65

5.20 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW........ 65

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.21	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW……	66
5.22	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW……	66
5.23	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW……	67
5.24	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	67
5.25	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	68
5.26	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	68
5.27	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	69
5.28	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	69
5.29	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,200kW……	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.30	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW…………………………………………………………………..	70
5.31	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,500kW…………………………………………………………………….	71
5.32	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW…………………………………………………………………..	71
5.33	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW…………………………………………………………………..	72
5.34	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW…………………………………………………………………..	72
5.35	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW…………………………………………………………………..	73
5.36	ช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิง…...	74
5.37	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1..	75
5.38	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2..	75
5.39	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3..	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.40	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4........	76
5.41	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5........	77
5.42	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6........	77
5.43	แสดงการประเมินหาค่ากำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงเท่ากับ 600 °C........	80
5.44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิ ONB และอุณหภูมิของสารระบายความร้อนต่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ........	81
5.45	แสดงการประเมินเพื่อหาการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ....	82
6.1	แสดงค่าพีคกำลังในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัดต่างๆ........	84
6.2	แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัดต่างๆ........	85
6.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2........	89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย แบบ TRIGA MARK III (Training Research and Isotope Production by General Atomic) โดยสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ทำการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 แทนเครื่องเดิม คือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 (ปปว-1) ตั้งแต่วันที่ 29 กันยายน 2520 และเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ถึงระดับวิกฤตเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน 2520 โดยเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 มีระดับกำลังสูงสุด 2 MW ในการเดินเครื่องแบบให้กำลังสม่ำเสมอ (Steady State Mode Operation) และ 2,000 MW ในการเดินเครื่องแบบทวีกำลัง (Pulsing Mode Operation) ปัจจุบันอยู่ภายใต้การบริหารจัดการของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยชนิดสระน้ำ (Swimming Pool Type) ลักษณะแกนปฏิกรณ์ฯ มีการจัดเชื้อเพลิงในแกนเป็นลักษณะหกเหลี่ยม (Hexagonal Array) โดยที่แกนปฏิกรณ์ฯ จะบรรจุอยู่ภายในถังอลูมิเนียมทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 55 เซนติเมตร และสูงประมาณ 2 เมตร และจะยึดติดกับสะพานเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Reactor Bridge) โดยแกนปฏิกรณ์ฯจะแขวนอยู่ในน้ำที่ระดับความสูงจากพื้นบ่อปฏิกรณ์ฯ ประมาณ 2 เมตร โดยบ่อปฏิกรณ์ฯ มีขนาดความกว้าง 3.5 เมตร ยาว 12 เมตร ลึก 8.5 เมตร ภายในบ่อบรรจุน้ำไว้ประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร น้ำภายในบ่อเป็นน้ำที่บริสุทธิ์ที่มีการกำจัดสารแขวนลอยและจำกัดค่าความเป็นกรดและด่างให้อยู่ประมาณ 5.5 – 5.8 และความนำไฟฟ้าไม่เกิน 2 ไมโครโมห์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งน้ำนี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอนและเป็นสารระบายความร้อน ซึ่งในการระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ใช้ระบบระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยตัวจากแกนปฏิกรณ์ฯ ขึ้นสู่ผิวน้ำ และถูกดูดออกไปโดยเครื่องดูดน้ำของระบบปฐมภูมิ ผ่านตัวแลกถ่ายความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อแลกถ่ายความร้อนกับน้ำของระบบทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก่อนที่น้ำระบบปฐมภูมิจะถูกดูดเข้าบ่อปฏิกรณ์ฯ และขณะที่น้ำของระบบทุติยภูมิจะถูกระบายความร้อนที่ได้รับมาสู่บรรยากาศโดยใช้หอระบายความร้อน (Cooling Tower) ทางด้านวิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 นั้น ได้กำหนดค่าของอุณหภูมิน้ำภายในบ่อปฏิกรณ์ (Bulk Water Temperature) ต้องไม่เกิน

40 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิของน้ำภายในบ่อเกินกว่าค่าที่กำหนด เครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 จะไม่สามารถเพิ่มระดับกำลังได้ (Interlock) ส่วนอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงต้องไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงเกินกว่าค่าที่กำหนด เครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 จะดับเครื่องอัตโนมัติ (SCRAM)[1]

การวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 จำเป็นต้องมีการคำนวณด้านเทอร์มัลไฮโดรลิกส์ อาทิเช่น การคำนวณค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง อุณหภูมิของเปลือกหุ้มเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของสารระบายความร้อน เป็นต้น โดยปัจจุบันการคำนวณด้านเทอร์มัลไฮโดรลิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 จะให้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 เป็นเครื่องมือเพื่อการคำนวณดังกล่าว และเพื่อเป็นการยืนยันว่าการคำนวณดังกล่าวจะเป็นไปด้วยความถูกต้องและแม่นยำ จึงได้ทำการทดลองเพื่อมาตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำจากการคำนวณนั้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่1 ที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

1.2.3 เพื่อเสนอแนะการปรับปรุงระบบระบายความร้อนออกจากแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ให้สามารถระบายความร้อนได้เพียงพอต่อการเดินเครื่องที่ระดับกำลังสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.1 หาลักษณะของการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 โดยการวัดด้วยอุปกรณ์การวัดทางอิเลคทรอนิกส์ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการระบายความร้อนความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ที่สภาวะคงตัว และมีการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ

1.3.2 สร้างแบบจำลองการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้การวัดด้วยอุปกรณ์การวัดทางอิเลคทรอนิกส์

1.3.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการคำนวณเพื่อเสนอแนะการปรับปรุงระบบระบายความร้อนออกจากแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ให้สามารถระบายความร้อนได้เพียงพอต่อการเดินเครื่องที่ระดับกำลังสูง

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้า ข้อมูล เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษา ออกแบบ และเลือกอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสม

1.4.3 ทำการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆของแกนปฏิกรณ์ฯ

1.4.4 วิเคราะห์การระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ฯ

1.4.5 สร้างแบบจำลองเพื่อการคำนวณหาการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

1.4.6 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ทางอิเลคทรอนิกส์กับผลการคำนวณการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

1.4.7 สรุป เสนอแนะและรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบลักษณะการกระจายอุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

1.5.2 ทำให้ทราบลักษณะการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

2.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบวิจัย ที่สามารถทำงานได้ 3 แบบคือ[1]

2.1.1 แบบคงตัว (steady state mode) การทำงานแบบนี้หมายถึงการทำงานทั้งแบบควบคุมเอง (manual) และแบบควบคุมอัตโนมัติ (automatic) โดยมีระดับกำลังสูงสุด 2 เมกกะวัตต์

2.1.2 แบบทวีกำลัง (pulsing mode) เป็นการให้เครื่องปฏิกรณ์ฯ ทำงานด้วยกำลังสูงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งสามรถทำงานได้ระดับกำลังสูงสุดถึง 2,000 เมกกะวัตต์ ภายในระยะเวลาประมาณ 10.5 มิลลิวินาที

2.1.3 แบบคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave mode) เป็นการเพิ่มระดับกำลังจากระดับต่ำไปเป็นระดับสูงภายในระยะเวลาสั้นๆ

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1[2]

แบบของเครื่องปฏิกรณ์	TRIGA Mark III
ระดับกำลังคงตัวสูงสุด	2 เมกกะวัตต์ (ความร้อน)
ระดับการทวีกำลังสูงสุด	2.1 % δk/k ($ 3.00)
เชื้อเพลิง	
วัสดุเชื้อเพลิง-สารหน่วงนิวตรอน	U-ZrH1.6
ปริมาณเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียม	8.5 wt-%, 20 wt-%
การเสริมสมรรถนะยูเรเนียม	20% U-235
รูปทรง	ทรงกระบอก
ความยาวของเชื้อเพลิง	38.1 ซม.
เส้นผ่าศูนย์กลางของเชื้อเพลิง	3.63 ซม.
วัสดุเปลือกหุ้ม	สแตนเลส เบอร์ 304

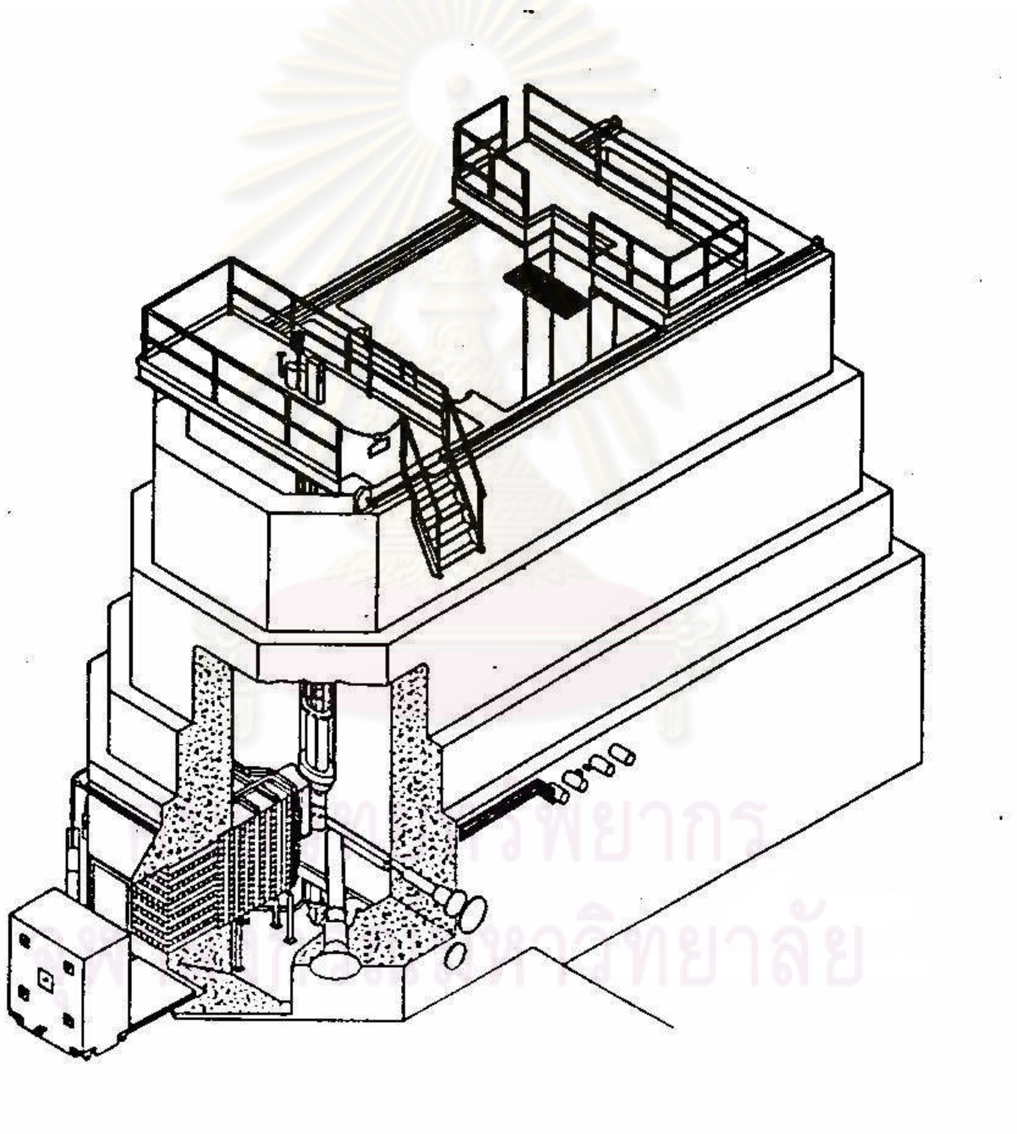
ความหนาเปลือกหุ้ม	0.05 ซม.
จำนวนของเชื้อเพลิง	107 แท่ง (แกนหมายเลข 17)
จำนวนของแท่งควบคุม	
Transient	1 แท่ง
Safety	1 แท่ง
Shim	2 แท่ง
Regulating	1 แท่ง
การระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ	การพาความร้อนโดยธรรมชาติ

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

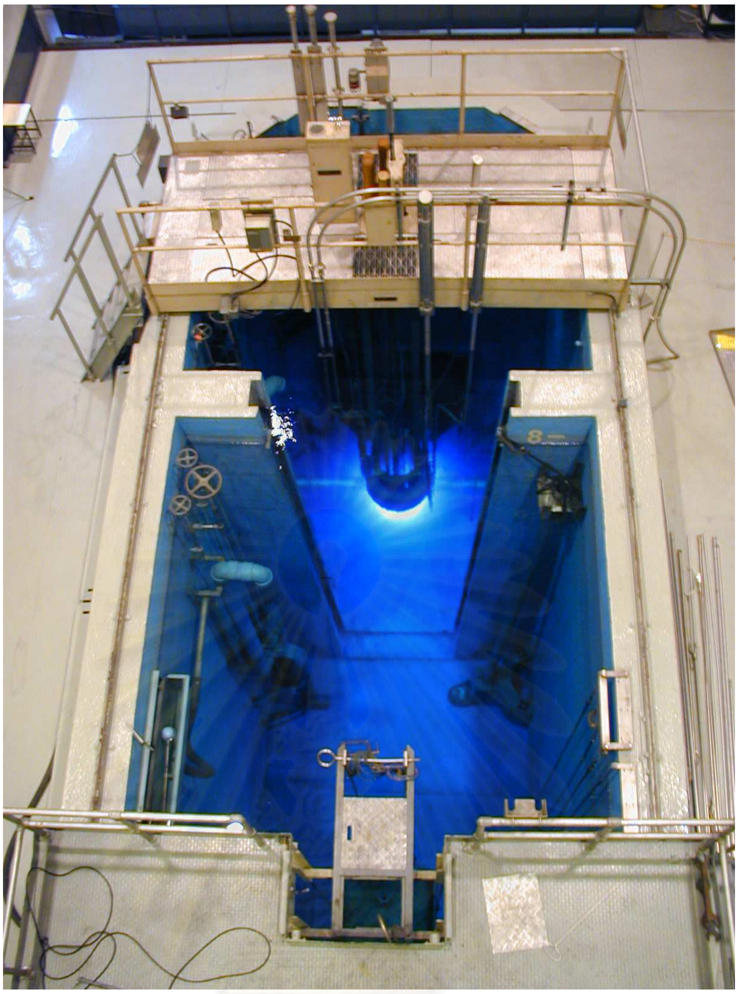
2.2.1 อาคารปฏิกรณ์ (reactor building) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ติดตั้งอยู่ภายในอาคารปฏิกรณ์ฯ ซึ่งมีความยาว 26 เมตร กว้าง 22 เมตร และสูง 20 เมตร ภายในอาคารประกอบด้วยห้องทดลองและห้องปฏิบัติการต่างๆ บริเวณภายในของอาคารที่เป็นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะเป็นบริเวณกักอากาศที่มีการควบคุมการเข้า-ออกของอากาศ ตลอดจนควบคุมการปลดปล่อยของสารรังสีสู่ภายนอก[3] ซึ่งรูปของอาคารปฏิกรณ์ฯ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 อาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

2.2.2 บ่อปฏิกรณ์ฯ (reactor pool) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีขนาด กว้าง 3.5 เมตร ยาว 12 เมตร และลึก 8.5 เมตร ผนังของบ่อทำจากคอนกรีตความหนาแน่นสูง ส่วนบนของบ่อหนาประมาณ 0.46 เมตร ถัดลงมาหนา 0.76 เมตร ส่วนที่สามหนา 1.07 เมตร และส่วนล่างสุดหนา 1.37 เมตร โดยบ่อปฏิกรณ์ฯจะมีสะพานเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดแกนปฏิกรณ์ฯ โดยสะพานเครื่องปฏิกรณ์ฯ สามารถเลื่อนตำแหน่งได้ และภายในบ่อปฏิกรณ์ฯ บรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ที่ระดับ 8 เมตร คิดเป็นปริมาตรน้ำในบ่อประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร[3] ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



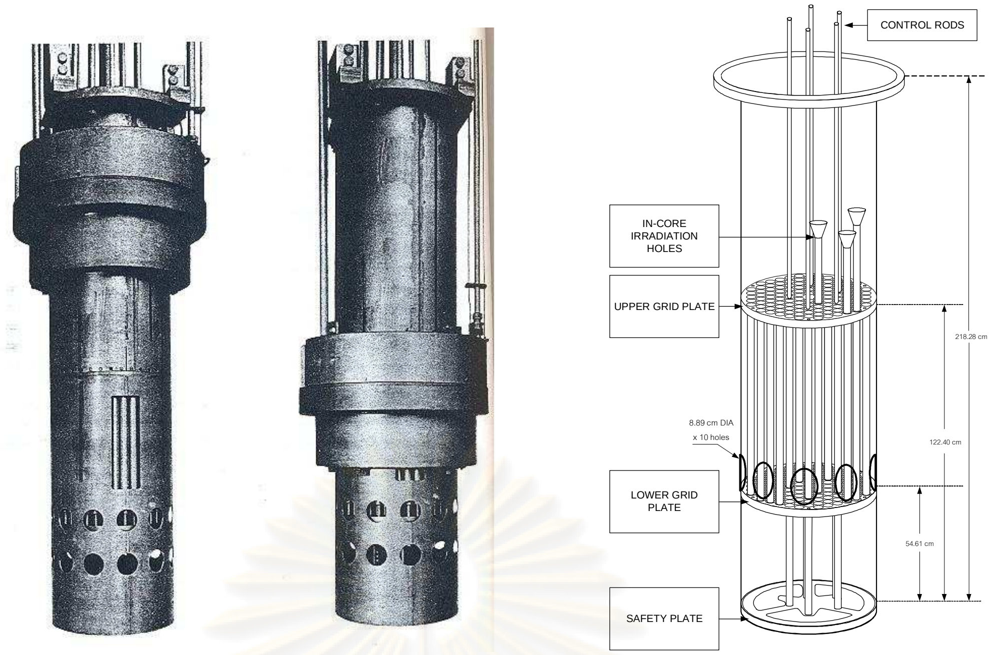
รูปที่ 2.2 บ่อปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1



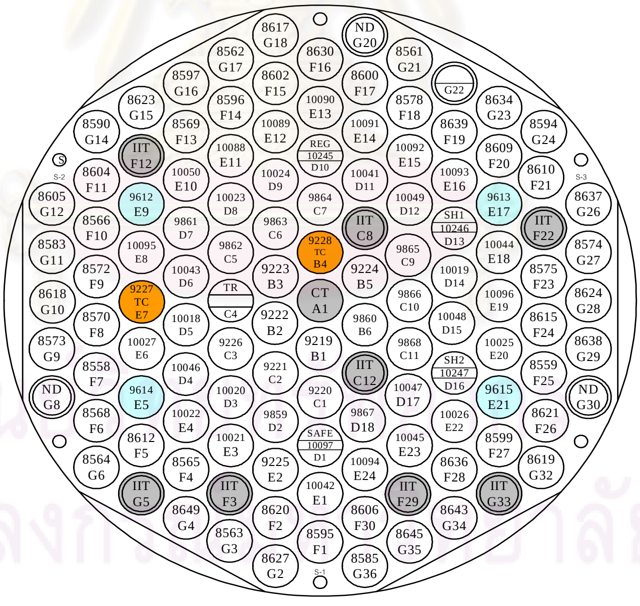
รูปที่ 2.3 ภาพมุมมองจากด้านบนของบ่อปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

2.2.3 แกนปฏิกรณ์ฯ (reactor core) มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก ทำจากอลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร[3] ดังรูปที่ 2.4 ภายในจะบรรจุแท่งเชื้อเพลิงในลักษณะแนวตั้ง และมีการจัดเชื้อเพลิงในลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



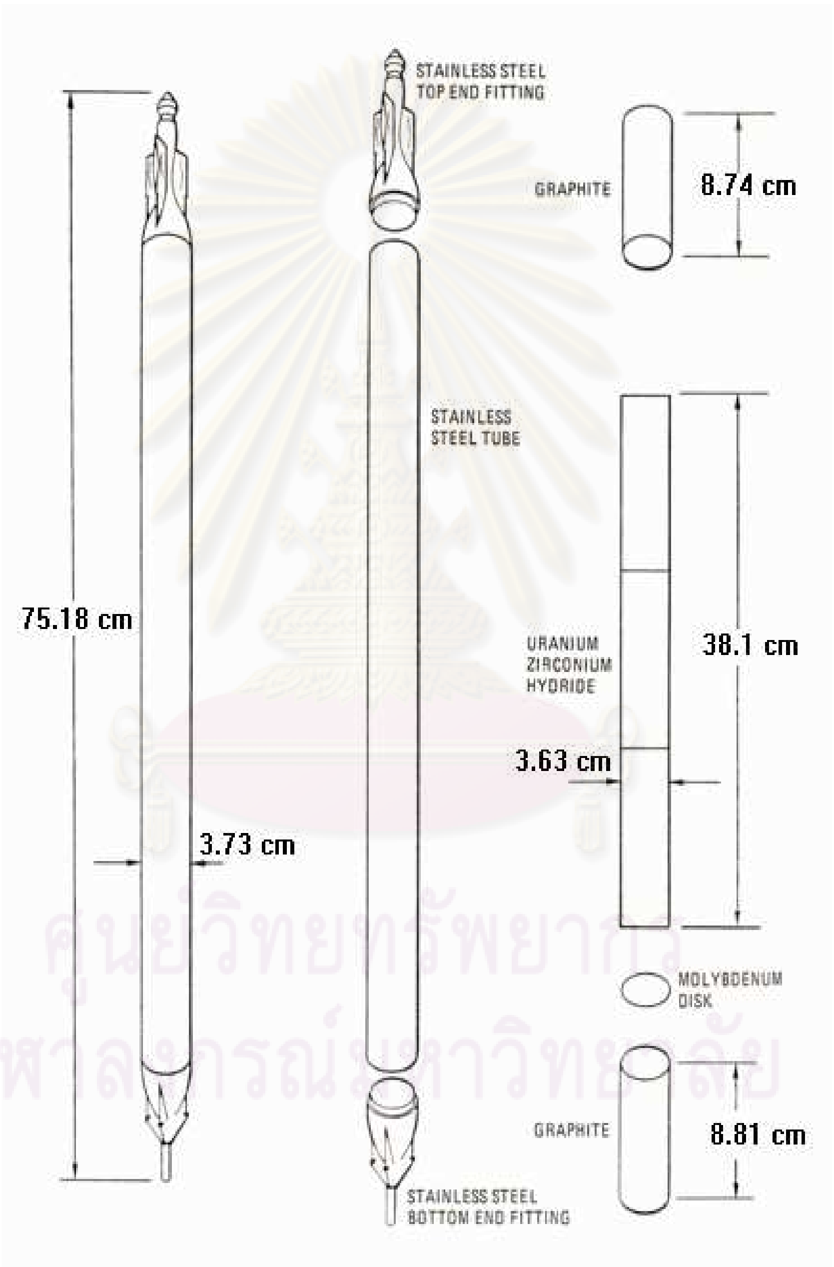
รูปที่ 2.4 ลักษณะแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1



รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดเรียงเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1
(แกนหมายเลข 17)

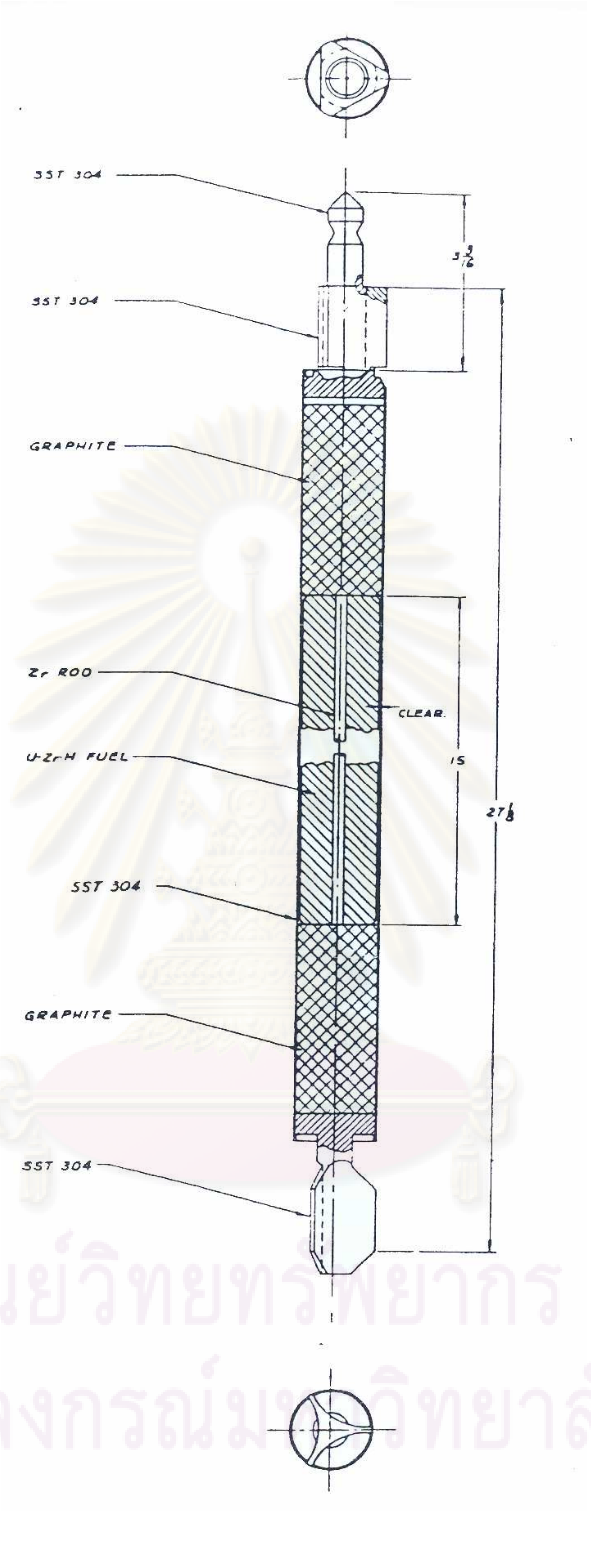
2.2.4 แท่งเชื้อเพลิง (fuel rod) แท่งเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.2.4.1 แท่งเชื้อเพลิงมาตรฐาน มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ยาวประมาณ 75.18 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.73 เซนติเมตร ส่วนบนและส่วนล่างเป็นกราไฟต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอน เนื้อเชื้อเพลิงเป็น U-ZrH1.6 (uranium – zirconium hydride) เปลือกหุ้มทำจากสแตนเลสที่มีความหนา 0.05 เซนติเมตร[2] ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.6 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

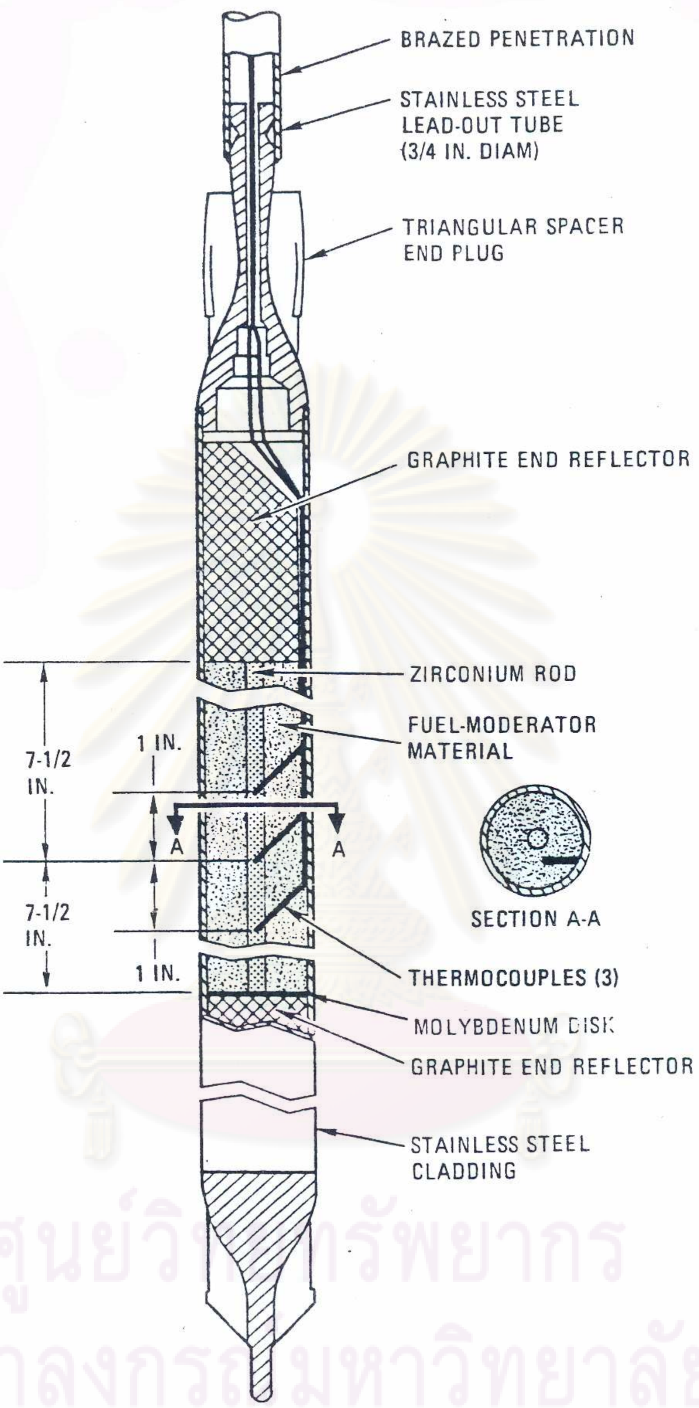
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของแท่งเชื้อเพลิง[2]

เนื้อเชื้อเพลิง	
อัตราส่วน H/Zr	1.6
ปริมาณยูเรเนียม	8.5 wt-%, 20 wt-%
การเสริมสมรรถนะ	20%
เส้นผ่าศูนย์กลาง	2.87 ซม.
ความยาว	38.1 ซม.
กราไฟต์และตัวสะท้อนนิวตรอน	
เส้นผ่าศูนย์กลาง	2.87 ซม.
ความยาว	8.74 ซม.(ด้านบน), 8.81 ซม.(ด้านล่าง)
เปลือกหุ้มเชื้อเพลิง	
วัสดุ	เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304
ความหนา	0.05 ซม.
ความยาว	55.88 ซม.
องค์ประกอบทั้งแท่ง	
เส้นผ่าศูนย์กลางทั้งหมด	3.73 ซม.
ความยาวทั้งหมด	75.18 ซม.
น้ำหนัก	~ 3.175 กก.

2.2.4.2 แท่งเชื้อเพลิงแบบมีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายใน มีรูปร่างลักษณะและส่วนประกอบเหมือนกับแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐาน ยกเว้นแต่ภายในของเชื้อเพลิงนี้จะมีหัววัดอุณหภูมิ (thermocouple) อยู่ 3 หัว สำหรับวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง และต่อสายสัญญาณมายังอุปกรณ์วัดภายในห้องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ฯ[2] ดังรูปที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



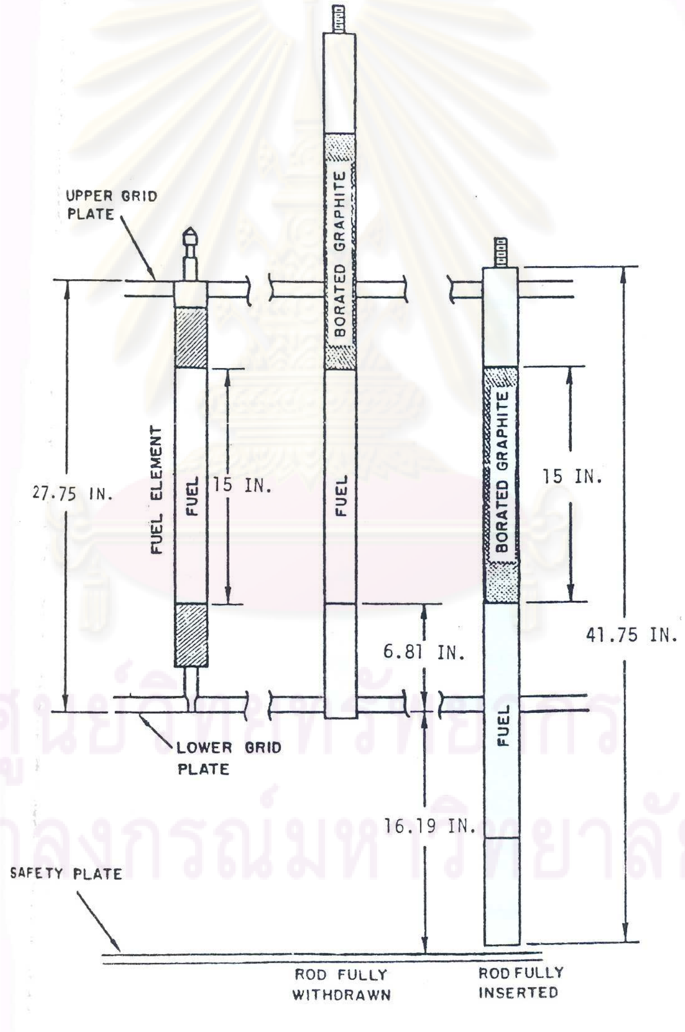
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายใน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.5 แท่งควบคุม (control rod) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ดังในรูปที่ 2.9 ซึ่งแท่งควบคุมจะมีลักษณะคล้ายแท่งเชื้อเพลิงแต่มีขนาดที่ยาวกว่า โดยแท่งควบคุมจะมีความยาวประมาณ 106 เซนติเมตร. แท่งควบคุมจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

2.2.5.1 Fuel Follower Control Rod (FFCR) มีอยู่ 4 แท่ง โดยส่วนบนของแท่งควบคุมเป็น boron carbide (B_4C) ซึ่งเป็นตัวดูดจับนิวตรอน ส่วนด้านล่างจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิง[1]

2.2.5.2 Air Follower Control Rod (AFCR) มีอยู่ 1 แท่ง โดยส่วนบนของแท่งควบคุมเป็น boron carbide (B_4C) ซึ่งเป็นตัวดูดจับนิวตรอน ส่วนด้านล่างจะเป็นโพรงอากาศ[1]



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม

2.2.6 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (neutron source) ทำหน้าที่เป็นตัวจุดชนวนการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในแกนปฏิกรณ์ฯ ทำจากธาตุ americium- beryllium มีความแรงรังสี 3 คูรี[3]

2.2.7 ระบบสนับสนุนเครื่องปฏิกรณ์ฯ

2.2.7.1 ระบบไฟฟ้า จะเป็นระบบสำหรับการจ่ายไฟ ให้กับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ทั้งหมด อาทิเช่น แผงควบคุม มอเตอร์ และอุปกรณ์การวัดและควบคุมต่างๆ ตลอดจนมีการสำรองไฟ ในกรณีที่ไฟฟ้าดับ เพื่อความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

2.2.7.2 ระบบวัดและควบคุม ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆ จากการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ อาทิเช่น ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง ตำแหน่งของแท่งควบคุม เป็นต้น เพื่อให้สามารถควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ฯ ได้ตามเงื่อนไขและเป็นไปด้วยความปลอดภัย โดยระบบวัดและควบคุม ยังสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ[4] ได้ดังนี้

2.2.7.2.1 ระบบควบคุม (control system) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

2.2.7.2.2 ระบบป้องกันและรักษาความปลอดภัย (protection and safety system) ทำหน้าที่ป้องกันและรักษาความปลอดภัยในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

2.2.7.3 ระบบระบายความร้อน เนื่องจากการเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีวัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อการวิจัย ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะต้องทำการระบายความร้อนออกไป โดยเครื่องปฏิกรณ์ฯ ใช้หลักการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ น้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นสารระบายความร้อนจะถูกดูดออกโดยเครื่องดูดน้ำเพื่อไปแลกถ่ายความร้อนที่ตัวแลกถ่ายความร้อน (heat exchanger) ก่อนที่จะนำน้ำนั้นกลับเข้าบ่อปฏิกรณ์ฯ ดังเดิม[1]

2.2.7.4 ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ทำหน้าที่ควบคุมการระบายอากาศภายในบริเวณกักอากาศของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อรักษาระดับความดันอากาศภายในบริเวณกักอากาศให้มีค่าเป็นลบ (negative pressure) เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของสารรังสีออกสู่ภายนอกในกรณีที่เกิดการรั่วไหล[1]

2.2.7.5 ระบบรักษาคุณภาพน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ ทำหน้าที่ดูดน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ มาผ่านเครื่องกรองที่มีสารเรซิ่นซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดจับสารแขวนลอย เพื่อรักษาค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำ ตลอดจนเพื่อรักษาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ ไม่ให้มีค่าเกินกว่า 2 ไมโครโมห์ต่อตารางเซนติเมตร[1]

2.2.7.6 ระบบระบายความร้อนออกจากแกนปฏิกรณ์ฯกรณีฉุกเฉิน

ทำหน้าที่ฉีดน้ำเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ฯ เพื่อระบายความร้อนให้แกนปฏิกรณ์ฯ ในกรณีที่เกิดการสูญเสียของน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ หากระดับน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ ลดลงไปประมาณ 3 เมตร จากระดับปกติ สัญญาณจากสวิทช์ลูกลอยจะสั่งการให้ระบบทำงาน[1]

2.2.7.7 ระบบอื่นๆ เป็นระบบที่สนับสนุนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ อาทิเช่น ระบบสื่อสาร ระบบรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

2.3 องค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

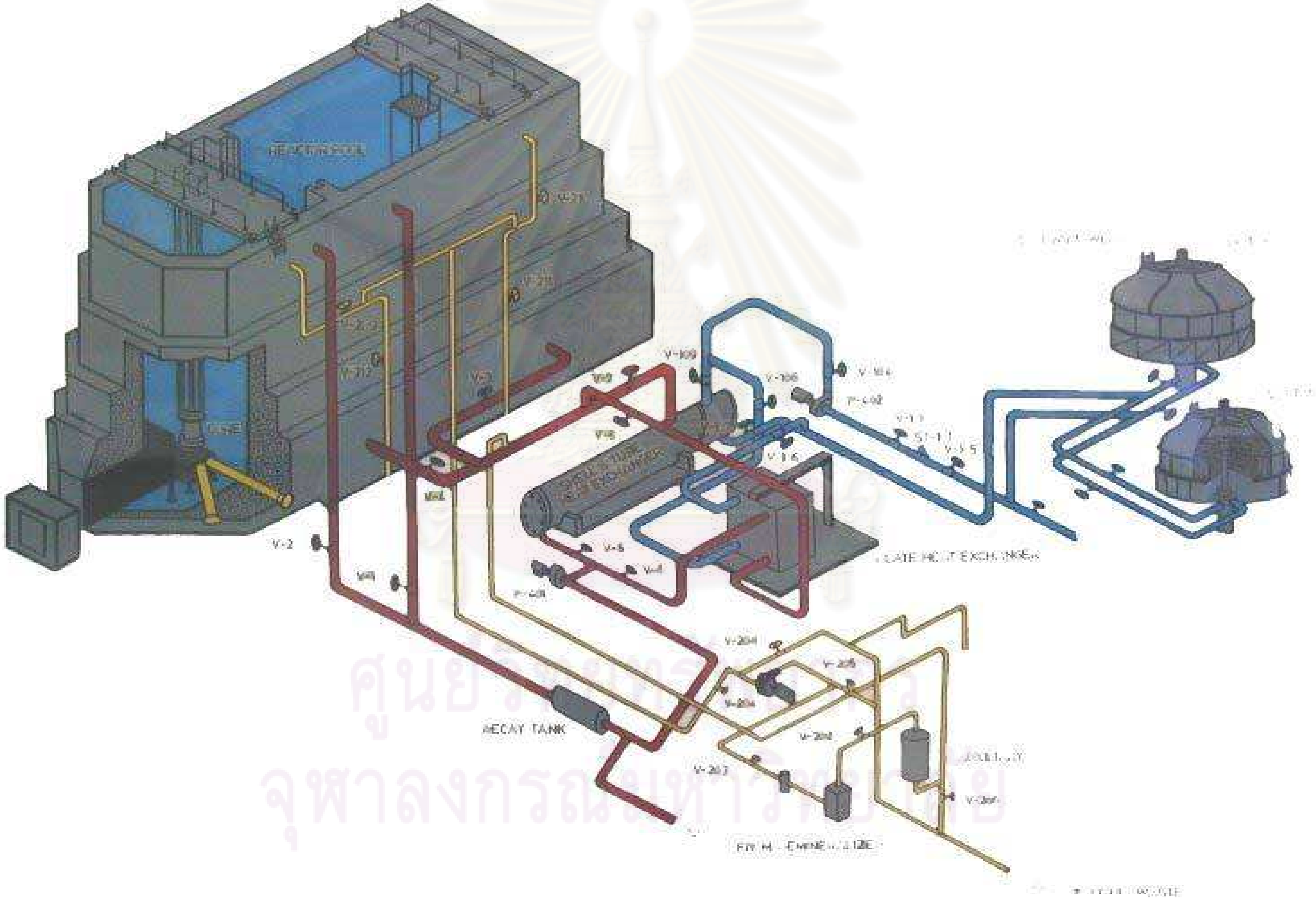
องค์ประกอบของการระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ บ่อปฏิกรณ์ฯ (reactor pool) ระบบระบายความร้อนด้านปฐมภูมิ (primary cooling system) และระบบระบายความร้อนด้านทุติยภูมิ (secondary cooling system)[5]

2.3.1 บ่อปฏิกรณ์ฯ (reactor pool) เป็นบ่อคอนกรีตขนาด กว้าง 3.5 เมตร ยาว 12 เมตร และมีความลึก 8.5 เมตร โดยผนังบ่อทำจากคอนกรีตชนิดความหนาแน่นสูง (high density concrete) โดยความหนาของผนังบ่อจะแบ่งเป็น 4 ชั้น ชั้นล่างสุดหนา 1.37 เมตร และความหนาชั้นถัดไปจะลดลง 0.30 เมตร ส่วนชั้นบนสุดของบ่อหนา 0.46 เมตร [3]

ภายในบ่อจะบรรจุน้ำบริสุทธิ์ที่มีค่าความนำไฟฟ้าไม่เกิน 2 ไมโครโมห์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 5.5 – 5.8 โดยมีปริมาณน้ำอยู่ประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร[3]

2.3.2 ระบบระบายความร้อนด้านปฐมภูมิ (primary cooling system) เป็นระบบที่นำน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ ไประบายความร้อน โดยอาศัยตัวแลกถ่ายความร้อน (heat exchanger) เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่น้ำอีกระบบ และทำให้น้ำจากบ่อปฏิกรณ์ฯ มีอุณหภูมิลดลง ก่อนที่จะส่งกลับเข้าบ่อปฏิกรณ์ฯ ดังเดิม[6]

2.3.3 ระบบระบายความร้อนด้านทุติยภูมิ (secondary cooling system) เป็นระบบที่ทำหน้าที่รับความร้อนที่ได้รับการแลกถ่ายมาจากน้ำของระบบปฐมภูมิที่ตัวแลกถ่ายความร้อน ไประบายสู่ชั้นบรรยากาศโดยอาศัยหอระบายความร้อน[6]



16

รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

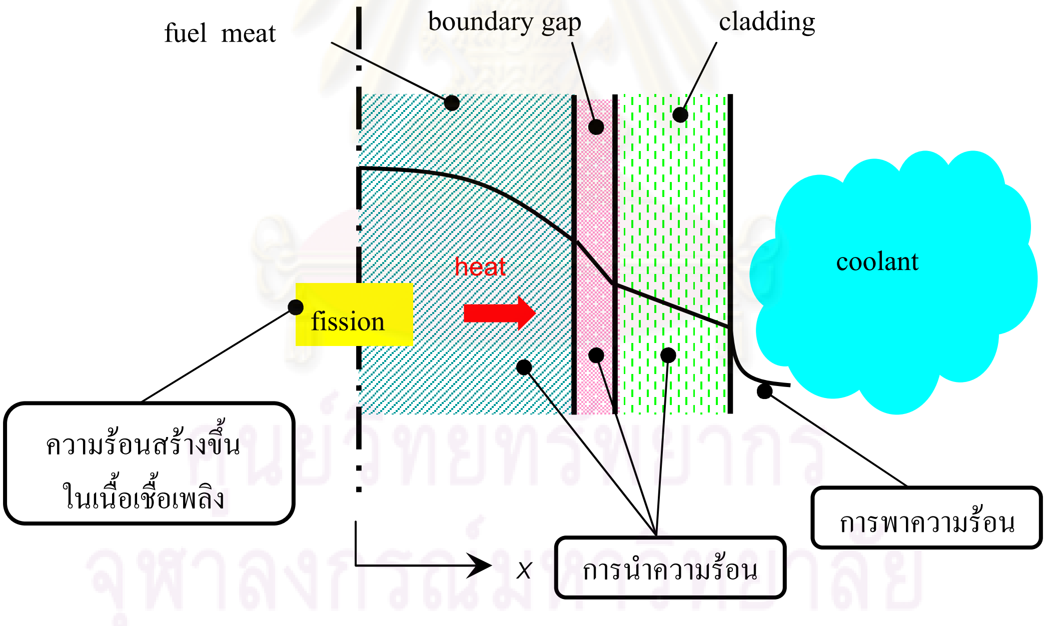
2.4 การระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

เมื่อทำการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน (nuclear fission) ภายในเนื้อเชื้อเพลิง การเกิดปฏิกิริยาฟิชชันก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาด้วย ในการถ่ายเทความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ อาศัยกระบวนการหลักสองกระบวนการ คือ

2.4.1 การนำความร้อน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันในเนื้อเชื้อเพลิงผ่านตัวเนื้อเชื้อเพลิงเอง (fuel meat), ผ่านช่องว่างระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับวัสดุหุ้มเชื้อเพลิง (boundary gap) และ ผ่านตัววัสดุหุ้มเชื้อเพลิง (cladding)[7]

2.4.2 การพาความร้อนจากผิววัสดุหุ้มเชื้อเพลิง (cladding) สู่สารระบายความร้อน (coolant)[7]

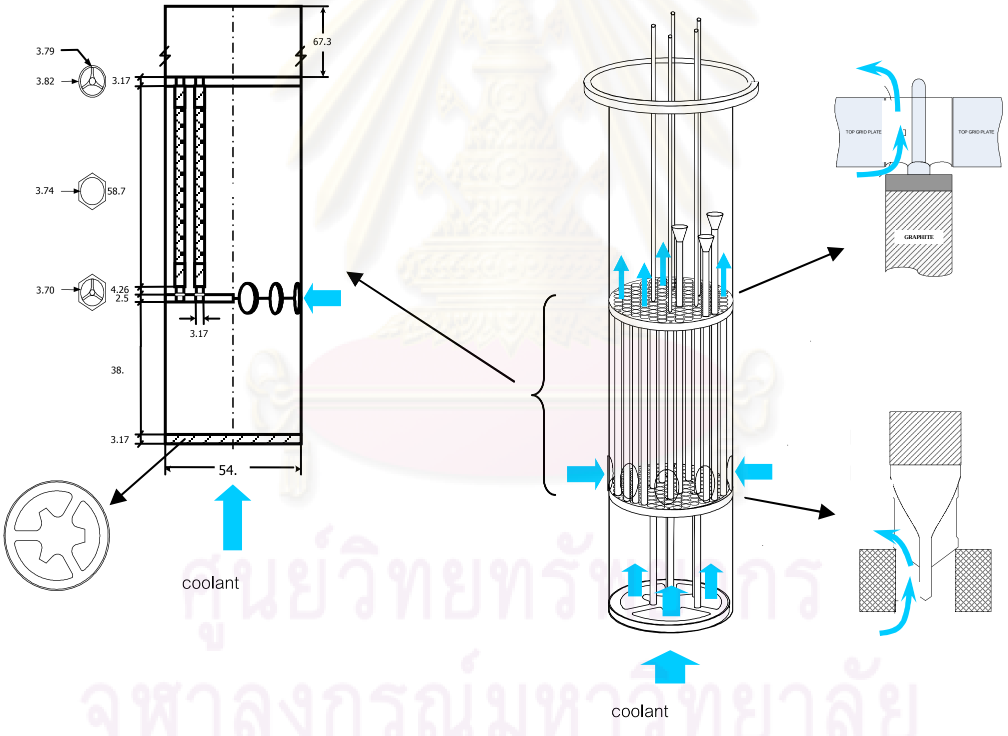
ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพหน้าตัดแสดงแบบจำลองการกระจายความร้อนในแท่งเชื้อเพลิง
ของกระบวนการถ่ายเทความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ

เมื่อสารระบายความร้อนได้รับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากเชื้อเพลิง ทำให้สารระบายความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจะมีค่าความหนาแน่นน้อย

กว่าสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้สารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน ส่วนสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะเคลื่อนที่จากด้านล่างของแกนปฏิกรณ์ฯ มาแทนที่ ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นกระบวนการพาความร้อนโดยธรรมชาติ และเมื่อสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงลอยตัวสู่ด้านบนของบ่อปฏิกรณ์ฯ ก็จะถูกดูดออกโดยเครื่องดูดน้ำ แล้วส่งผ่านไปยังตัวแลกถ่ายความร้อน (heat exchanger) เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่น้ำของระบบทุติยภูมิ ส่งผลให้สารระบายความร้อนของระบบปฐมภูมิมีอุณหภูมิลดลง และถูกส่งกลับผ่านเครื่องดูดน้ำเข้าทางด้านล่างของบ่อปฏิกรณ์ฯ ส่วนน้ำของระบบทุติยภูมิเมื่อได้รับความร้อนจากสารระบายความร้อนระบบปฐมภูมิ ก็ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และจะถูกนำความร้อนดังกล่าวนั้นไปประบายสู่ชั้นบรรยากาศโดยอาศัยหอระบายความร้อน (cooling tower)[5] ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.12 การระบายความร้อนของแกนปฏิกรณ์ฯ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

รหัสคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ถูกพัฒนาขึ้นที่สถาบันวิจัยนิวเคลียร์แห่งประเทศญี่ปุ่น (ชื่อเดิม JAERI ภายหลังเปลี่ยนชื่อเป็น ทบวงการปรมาณูแห่งประเทศญี่ปุ่น JAEA) เพื่อใช้ในการคำนวณทางเทอร์มัลไฮโดรลิกส์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเมื่อแกนปฏิกรณ์ปฏิบัติการอยู่ในสภาวะคงตัว รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถคำนวณแกนปฏิกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้งชนิดแผ่นและชนิดแท่งได้

3.1 ลักษณะของรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2[8]

3.1.1 การคำนวณอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแผ่น อุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแผ่นสามารถคำนวณได้โดยสมมุติฐานว่า การเกิดความร้อนในเนื้อเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ตามแนวทิศทางของรัศมี และการพิจารณาจะเป็นแบบการนำความร้อนใน 1 มิติ การกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแผ่นในแนวแกน จะคำนวณจากอุณหภูมิของสารระบายความร้อนและค่าตัวประกอบยอดสุดตามแนวแกน (axial peaking factor)

3.1.2 การคำนวณอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแท่งกระบอก อุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแท่งกระบอก สามารถคำนวณได้โดยสมมุติฐานว่า การเกิดความร้อนในเนื้อเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ตามแนวทิศทางของรัศมี และการพิจารณาจะเป็นแบบการนำความร้อนใน 1 มิติ การกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแท่งกระบอกในแนวแกนจะคำนวณจากอุณหภูมิของสารระบายความร้อนและค่าตัวประกอบยอดสุดตามแนวแกน (axial peaking factor) เช่นเดียวกันกับการคำนวณอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแบบแผ่น

3.1.3 การคำนวณอุณหภูมิของระบบระบายความร้อน ในส่วนเพิ่มเติมของการคำนวณอุณหภูมิเชื้อเพลิงแบบแผ่น, อุณหภูมิของสารระบายความร้อนของระบบปฐมภูมิและระบบทุติยภูมิ สามารถคำนวณได้โดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ซึ่งในการคำนวณนี้ การสูญเสียความร้อนจากผิวสัมผัสของท่อ, ตัวแลกถ่ายความร้อนและอื่นๆ จะไม่นำมาคิด

หอระบายความร้อนแบบทรงกลม (counter flow cooling tower) และตัวแลกถ่ายความร้อนแบบทรงกลม(counter flow heat exchanger), ตัวแลกถ่ายแบบไหลขนาน (parallel flow type) และแบบเปลือกและท่อ(shell & tube type) ได้บรรจุไว้ในรหัสคอมพิวเตอร์นี้แล้วด้วย

3.1.4 การคำนวณ อุณหภูมิ ONB (Onset of Nucleate Boiling), ความไม่เสถียรของการไหล, ฟลักซ์ความร้อนของ DNB (Departure from Nucleate Boiling) และแรงดันตก รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มีความสามารถในการคำนวณอุณหภูมิONB, ค่าฟลักซ์ความร้อนที่จุดการเริ่มของความไม่เสถียรของการไหล และ ค่าฟลักซ์ความร้อนDNB ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ มีความสำคัญต่อการยืนยันความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์

ในส่วนที่เพิ่มเข้ามา คือการคำนวณแรงดันตก (pressure drop) ที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆด้านบน ก็ได้เพิ่มเข้ามาใน COOLOD-N2

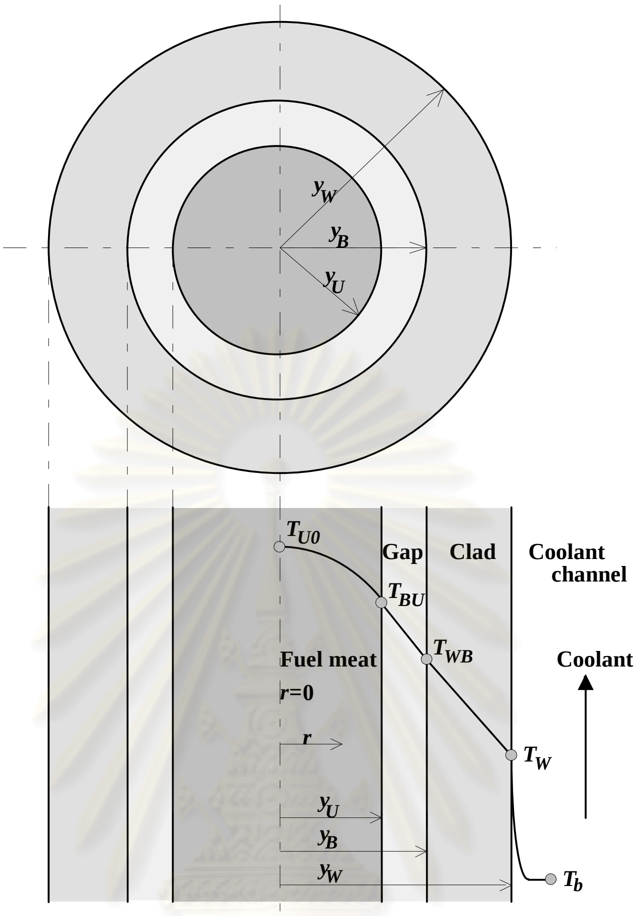
3.1.5 การระบายความร้อนแบบการพาโดยธรรมชาติ โดยทั่วไป เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยแบบสระน้ำจะมีการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ การระบายความร้อนแบบการพาโดยธรรมชาตินั้น ทิศทางการไหลของสารระบายความร้อนจะลอยขึ้นด้านบน อันเป็นผลมาจากค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันนั่นเอง

3.1.6 ส่วนของการถ่ายเทความร้อน เป็นโปแกรมย่อยสำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

3.2 แบบจำลองการคำนวณการกระจายอุณหภูมิในเชื้อเพลิงแบบแท่ง[8]

ภายใต้สมมุติฐานว่าการเกิดความร้อนในเนื้อเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ตามแนวทิศทางของรัศมี ($q_u = 2q_u / y_u$ = ค่าคงที่) และการพิจารณาการนำความร้อนใน 1 มิติ การกระจายอุณหภูมิในเชื้อเพลิงแบบแท่งกระบอกสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1แบบจำลองการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง

3.2.1 อุณหภูมิของสารระบายความร้อนทั้งหมด (coolant bulk temperature) : T_b

$$T_b = T_{in} + F_b \frac{1}{G\,A\,Cp}\int_0^L Q(Z)dZ \qquad (3.1)$$

โดยที่ T_b เป็น อุณหภูมิของสารระบายความร้อนทั้งหมด

T_{in} เป็น อุณหภูมิของสารระบายความร้อนด้านขาเข้า

F_b เป็น ค่าตัวประกอบที่ทำให้อุณหภูมิของสารระบายความร้อนทั้งหมดสูงขึ้น

G เป็น อัตราการไหลเชิงมวลของสารระบายความร้อน (kg/m^{2}s)

A เป็น พื้นที่ผิวของแท่งเชื้อเพลิงตามความยาว (m^2)

C_p เป็น ความร้อนจำเพาะของสาระบายความร้อน (kJ/kgK)

Q(Z) เป็น ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงที่แต่ละความสูงของแท่งเชื้อเพลิง (kJ).

รหัสคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลค่านี้จากข้อมูลขาเข้าทั้งหมดของกำลังความร้อนของการเดินเครื่องปฏิกรณ์และค่าตัวประกอบยอดสุดตามแนวแกน (axial peaking factor)

3.2.2 อุณหภูมิผิวด้านนอกของเปลือกหุ้ม(clad outer surface temperature) : T_W

บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกหุ้มของแท่งเชื้อเพลิง จะสมมุติฐานว่าความร้อนที่ปลดปล่อยสู่น้ำซึ่งเป็นสารระบายความร้อนโดยวิธีการพาความร้อนและอุณหภูมิบริเวณผิวด้านนอกของเปลือกหุ้มสามารถที่จะคำนวณได้ดังนี้

$$T_W = T_b + F_f \frac{q_W}{h_W} \tag{3.2}$$

$$q_W = q_U \frac{2\pi\ y_U}{2\pi\ y_W} \tag{3.3}$$

โดยที่ F_f เป็น ตัวประกอบที่ทำให้อุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่เป็นลักษณะฟิล์มสูงขึ้น

h_w เป็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (kW/m^{2}K)

q_w เป็น ฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่งรัศมี y_w

q_u เป็น ฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่งรัศมี y_u (ดังรูปที่ 3.1)

เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ในแนวรัศมี ในการนำความร้อนแบบ 1 มิติ สารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_w และ q_u ดังนี้

$$\begin{gathered} Q_W = Q_u \\ q_W A_W = q_u A_u \quad \rightarrow \quad q_W 2\pi y_W L = q_u 2\pi y_u L \\ q_W = q_U \frac{2\pi\ y_U}{2\pi\ y_W}. \end{gathered} \tag{3.4}$$

โดยสมมุติให้การเกิดความร้อนในเนื้อเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ตามแนวทิศทางของรัศมีจึงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\dot{q}_U = 2q_U / y_U = \text{ค่าคงที่} \qquad (3.5)$$

หมายเหตุ $\dot{q}_U$ เป็น อัตราการเกิดความร้อนจากเนื้อเชื้อเพลิง (kW).

3.2.3 อุณหภูมิผิวด้านในของเปลือกหุ้ม (clad inner surface temperature) : T_{WB}

บริเวณผิวด้านในของเปลือกหุ้ม การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นการสมมุติให้เป็นนำความร้อนแบบ 1 มิติ ในทิศทางของรัศมี จากจุดกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิง สามารถที่จะคำนวณหาอุณหภูมิผิวด้านในของเปลือกหุ้มโดยใช้สมการของการนำความร้อนใน 1 มิติ และสามารถกระจายได้ดังต่อไปนี้

$$T_{WB} = T_W + F_W \frac{q_U \; y_U}{k_W} \ln \frac{y_W}{y_B} \qquad (3.6)$$

$$= T_W + F_W \frac{\dot{q}_U \; y_U^2}{2k_W} \ln \frac{y_W}{y_B} \qquad (3.7)$$

โดยที่ F_W เป็น ตัวประกอบที่ทำให้อุณหภูมิผิวด้านในของเปลือกหุ้มสูงขึ้น

y_i เป็น ทิศทางรัศมีที่ตำแหน่ง i.

3.2.4 อุณหภูมิผิวเนื้อเชื้อเพลิง (fuel meat surface temperature) : T_{BU}

ช่วงช่องว่างระหว่างเปลือกหุ้มและเนื้อเชื้อเพลิง ความร้อนที่ผ่านมีระยะทางที่น้อยมาก สมการการนำความร้อน 1 มิติ สำหรับช่องว่างเล็กๆ สามารถเขียนในรูปแบบที่คล้ายกันกับสมการของการพาความร้อน อุณหภูมิผิวเนื้อเชื้อเพลิง T_{BU} ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_{BU} = T_{WB} + F_B \frac{q_U}{h_{WB}} \qquad (3.8)$$

โดยที่ F_B เป็น ตัวประกอบที่ทำให้อุณหภูมิช่วงช่องว่างระหว่างเปลือกหุ้มและเนื้อเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น

h_{WB} เป็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของช่องว่าง

ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับข้อมูลขาเข้าเพื่อการคำนวณ อันได้แก่ ความหนาของช่องว่าง (gap thickness) และค่าความนำของช่องว่าง (gap conductivity) อย่างไรก็ตามค่าความสัมพันธ์ที่ถูกต้องสำหรับ h_{WB} เป็นข้อมูลความลับของ COOLOD-N2 ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะเขียนเป็นสมการของ h_{WB} ไว้ ณ ที่นี้ได้

3.2.5 อุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิง (fuel meat maximum temperature) : T_{UO}

สำหรับสมมาตรแนวแกนของแท่งเชื้อเพลิงได้ให้ค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่ตำแหน่งเส้นกึ่งกลางของรูปทรงกระบอกเป็นเส้นที่สมมาตรของการกระจายอุณหภูมิ ค่าสูงสุดของอุณหภูมิแท่งเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากสมการการนำความร้อน 1 มิติ โดยที่การผลิตความร้อนมีค่าคงที่

$$T_{U0} = T_{BU} + F_U \; \frac{\dot{q}_U}{4k_U} y_U{}^2 \tag{3.9}$$

โดยที่ $q_U = \dfrac{\dot{q}_U \; y_U}{2}$

โดยที่ $\dot{q}_u$ เป็น การผลิตความร้อนเชิงปริมาตรในเชื้อเพลิง (kW/m^3)

3.3 **แบบจำลองการคำนวณแรงดันตก**[8]

3.3.1 สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความหนืด

3.4.1.1 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ((Re $\leq$ 2500)

$$F = \frac{Cb}{Re} \tag{3.10}$$

โดยที่ F เป็น สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความหนืด

Cb เป็น ตัวประกอบที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของช่องการไหล.

Cb = 64.0 สำหรับการไหลแบบท่อ

Cb = 56.9 สำหรับช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Cb = 96.0 สำหรับช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1.2 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) (Re > 2500)

สามารถที่จะเลือกได้จาก 3 สหสัมพันธ์ ดังนี้

3.3.1.2.1 สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$F = 0.3164\,\mathrm{Re}^{-0.25} \qquad (3.11)$$

3.3.1.2.2 สหสัมพันธ์ของ Kärman-Nikuradse

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = 2.0\log_{10}\left(\mathrm{Re}\sqrt{F}\right) - 0.8 \qquad (3.12)$$

3.3.1.2.3 สหสัมพันธ์ของ Cole-Brook

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = 2.0\log_{10}\left[\frac{\varepsilon / De}{3.71} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{F}}\right] \qquad (3.13)$$

3.3.2 การจำลองเพื่อการคำนวณหาแรงดันตก

ในการจำลองเพื่อการคำนวณหาแรงดันตก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในการจำลองเพื่อการคำนวณนี้ แรงดันตกอันเนื่องมาจากการสูญเสียจากความหนืด จะถูกคำนวณเป็นแรงดันตกภายในแต่ละส่วน แรงดันตกอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิต จะถูกคำนวณเป็นแรงดันตกระหว่างส่วน n และ n+1 ในส่วนของแรงดันเฉพาะที่ $P_{n,1}$ และ $P_{n,2}$ ของ ส่วนที่ n^{th} สามารถที่จะคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Bernoulli ดังนี้

$$P_{n,1} = P_{n-1,2} + \frac{1}{2g}\left(\bar{\rho}_{n-1}v_{n-1}^2 - \bar{\rho}_n v_n^2 - \rho_n \zeta_n \bar{v}_{n+1}^2\right) \qquad (3.14)$$

$$P_{n,2} = P_{n,1} + \bar{\rho}_n\left(L\Delta Z_n - F_n \frac{\Delta Z_n}{De_n}\frac{\bar{v}_n^2}{2g}\right) \qquad (3.15)$$

โดยที่

$\overline{\rho} = \frac{\rho_n + \rho_{n+1}}{2}$ เป็น ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของส่วน n

L เป็น ทิศทางการไหล = -1 : ไหลขึ้น

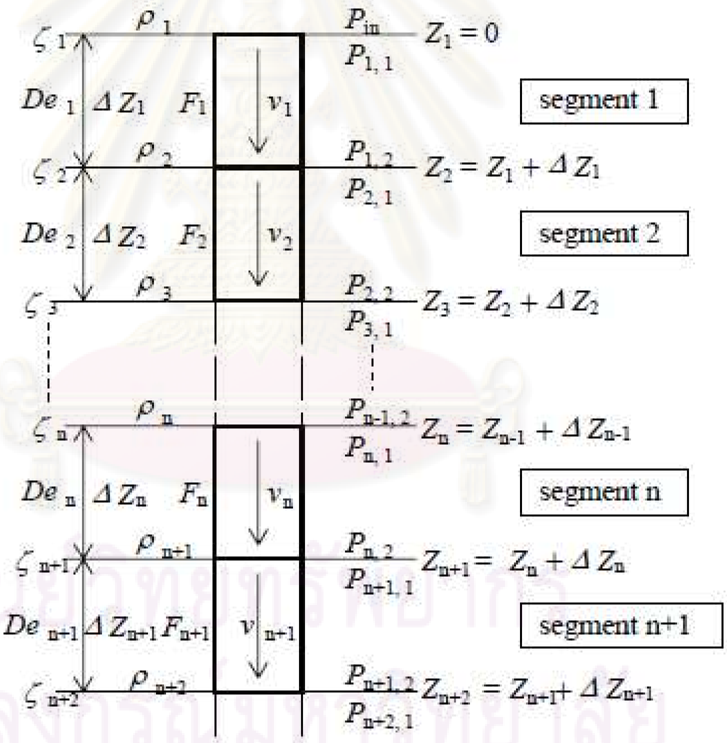
= 0 : ไหลแนวนอน

= 1 : ไหลลง

$$\overline{v} = \max(v_n, v_{n+1})$$

$P_{0,2} = P_{in}$ ซึ่งให้ไว้ในข้อมูลอินพุต

ในส่วนของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน $\rho_n = \rho_{n+1} = \overline{\rho}_n$.



รูปที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์การคำนวณแรงดันตกสำหรับ COOLOD-N2

3.4 **<u>แบบจำลองการคำนวณการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ</u>**[8]

ในการจำลองการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาตินั้น ในรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 จะแทนช่องการไหลที่ได้รับความร้อน(heated channel) ด้วย m และแทนช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน(non-heated channel) ด้วย n

ในการคำนวณการจำลองนี้ จะใช้สมการพื้นฐานซึ่งเป็นสมการของการอนุรักษ์มวลระหว่างช่องการไหลที่ได้รับความร้อนและช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน

ผลรวมของอัตราการไหลของมวล G_j สำหรับช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนจะเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลของมวล G_i สำหรับช่องการไหลที่ได้รับความร้อน

$$\sum_{i=1} G_i = \sum_{j=1} G_j = G_0 \tag{3.16}$$

ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตก(pressure drop) ของช่องการไหลที่ได้รับความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ΔP_{ci} (i=1 ถึง i_{max}), แรงดันตกของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ΔP_{bj} (j=1 ถึง j_{max}), และแรงขับ(driving force) ΔP_{di} (i=1 ถึง i_{max}), เป็นดังนี้

$$\Delta P_{ci}(G_i) + \Delta P_{bj}(G_j) = \Delta P_{di}(G_i) \tag{3.17}$$

$$\Delta P_{bj}(G_j) = \Delta P_b \quad (\text{constant}) \tag{3.18}$$

แรงขับ ΔP_{di} ของการไหลวนโดยธรรมชาติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างความหนาแน่นของน้ำในช่องการไหลที่ได้รับความร้อน ρ'_i และความหนาแน่นของน้ำในช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ρ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta P_{di} &= \int_0^{L_i} (\rho - \rho'_i)dx \\ &= \sum_{m=1}^{m_{max}} (\rho \ell_{im} - \rho'_{im} \ell_{im}) \\ &= \rho L_i - \sum_{m=1}^{m_{max}} \rho'_{im} \ell_{im} \end{aligned} \tag{3.19}$$

โดยที่

L_i เป็น ความยาวของการได้รับความร้อนสำหรับช่องการไหล i^{th} (เมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \sum_{m=1}^{m_{\max}} \ell_{im}$$

ℓ_{im} เป็น ความยาวของการได้รับความร้อนในส่วนของ m สำหรับช่องการไหล i (เมตร)

แรงขับของการไหลสามารถคำนวณได้โดยการกระจายอุณหภูมิของสารระบายความร้อนของช่องการไหลที่ได้รับความร้อนซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

ถ้าเกิด nucleate boiling ด้านขวาของสมการ(3.19) จะเปลี่ยนไปเป็นดังสมการนี้

$$\rho'_{im}\,\ell_{im} = (1-\alpha_{im})\rho_{\ell im}\,\ell_{im}\,. \qquad (3.20)$$

โดยที่ $\rho_{\ell im}$ เป็น ความหนาแน่นอิ่มตัวของน้ำ (kg/m^3)

α_{im} เป็นสัดส่วนช่องว่างในส่วนmของการไหลที่ได้รับความร้อน i

เงื่อนไขสำหรับ ONB กำหนดได้ดังนี้

$$\mathrm{Nu}_B = \frac{q\,De}{K_b(T_S - T_b)} \quad \geq 455 \qquad ; \mathrm{Pe} \leq 7000 \qquad (3.21)$$

$$\mathrm{St}_B = \frac{q}{GCp_b(T_S - T_b)} \quad \geq 0.0065 ; \mathrm{Pe} > 7000 \qquad (3.22)$$

สัดส่วนของช่องว่างสามารถคำนวณได้จากสหสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1 สัดส่วนช่องว่างภายใต้บริเวณ subcooled boiling (สหสัมพันธ์ของ AHMAD)

$$\alpha = \frac{x}{x + s(1-x)\rho_g / \rho_\ell} \qquad (3.23)$$

$$s = \left(\frac{\rho_\ell}{\rho_g}\right)^{0.205} \left(\frac{G\,D}{\mu_\ell}\right)^{-0.016} \qquad (3.24)$$

3.4.2 สัดส่วนช่องว่างภายใต้บริเวณ subcooled boiling (สหสัมพันธ์ของ Zuber)

$$\alpha = \frac{x}{1.13\left(x\dfrac{\rho_\ell - \rho_g}{\rho_\ell} + \dfrac{\rho_g}{\rho_\ell}\right) + C_b \dfrac{\rho_g}{G}\left[\dfrac{\sigma(\rho_\ell - \rho_g)g}{\rho_\ell^2}\right]^{1/4}} \qquad (3.25)$$

3.4.3 สัดส่วนช่องว่างภายใต้บริเวณ subcooled boiling (การจัดกลุ่ม สมการที่ (3.24) และ (3.25))

$G < G_{LIM}$ เมื่อใช้สมการ (3.24)

$G \geq G_{LIM}$ เมื่อใช้สมการ (3.25)

โดยที่ G_{LIM} (kg/s) จะให้ไว้ในข้อมูลขาเข้า

พิสัยของ G_{LIM} คือ 500 - 1500 kg/m^{2}s.

3.4.4 สัดส่วนช่องว่างภายใต้บริเวณ nucleate boiling (สหสัมพันธ์ของ Zuber)

$$\alpha = \frac{x}{1.13\left(x_{eq}\dfrac{\rho_\ell - \rho_g}{\rho_\ell} + \dfrac{\rho_g}{\rho_\ell}\right) + C_b \dfrac{\rho_g}{G}\left[\dfrac{\sigma(\rho_\ell - \rho_g)g}{\rho_\ell^2}\right]^{1/4}} \qquad (3.26)$$

$$x = \frac{x_{eq} - x_{eqB}\, e^{x_{eq}/x_{eqB} - 1}}{1 - x_{eqB}\, e^{x_{eq}/x_{eqB} - 1}}$$

$$x_{eq} = \frac{q_w p_h Z/(G\,A) - Cp_b(T_S - T_{bB})}{h_{fg}}$$

โดยที่ x_{eqB} เป็น ลักษณะที่จุด ONB

T_{bB} เป็น อุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่จุด ONB ($^{\circ}$C)

Z เป็น ระยะทางจากจุด ONB (ม.)

P_h เป็น เส้นรอบวงความร้อน (ม.)

C_b เป็น สัมประสิทธิ์ของ Zuber ซึ่งมีค่าเท่ากับ1.18 หรือ 1.41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1 นั้น จะทำการนำผลที่ได้จากการทดลองวัด มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ซึ่งการทดลองวัดนั้น จะทำการวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง โดยใช้หัววัดอุณหภูมิที่ติดตั้งอยู่ในเชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์การวัด และจะทำการวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อน ซึ่งจะใช้หัววัดอุณหภูมิที่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะ ซึ่งจะทำการวัดในช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิง ภายในแกนปฏิกรณ์ฯ

4.1 การวัดการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

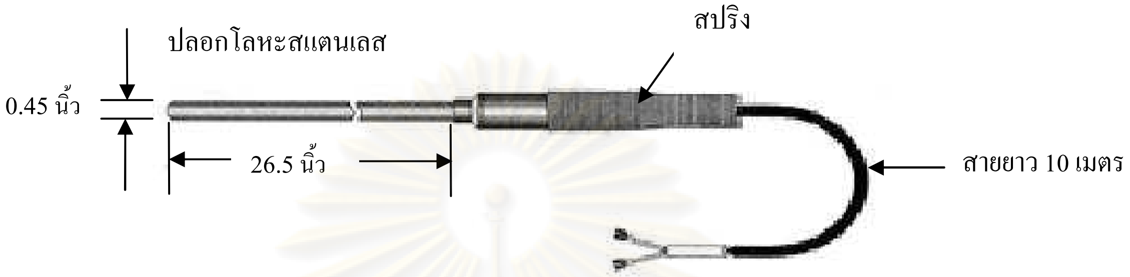
4.1.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

4.1.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข ชนิดใช้กับไฟ 220 โวลท์ โดยสามารถรับข้อมูลขาเข้าได้ 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส และให้ค่ากระแสขาออก 4 – 20 mA(DC)

รูปที่ 4.1 รูปเครื่องวัดอุณหภูมิ

4.1.1.3 หัววัดเทอร์โมคัพเปิ้ลชนิดโครเมียม-อลูมิเนียม เป็นแบบ K

- ย่านการวัด -40 °C – 1,000 °C
- ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1.5 °C
- ความไว 41 μV/°C
- เวลาตอบสนอง 15 วินาที



รูปที่ 4.2 หัววัดอุณหภูมิ

4.1.2 วิธีการวิจัย

4.1.2.1 ทำการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (thermocouple) ลงในช่องการไหลของสารระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งเป็นช่องขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม.

4.1.2.2 ต่อสายสัญญาณหัววัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ

4.1.2.3 วัดค่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อนก่อนการติดเครื่องปฏิกรณ์ฯ และบันทึกค่าที่อ่านได้

4.1.2.4 เปิดระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิขาเข้าของสารระบายความร้อน และบันทึกค่าที่อ่านได้

4.1.2.5 ทำการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ระดับกำลัง 800 kW

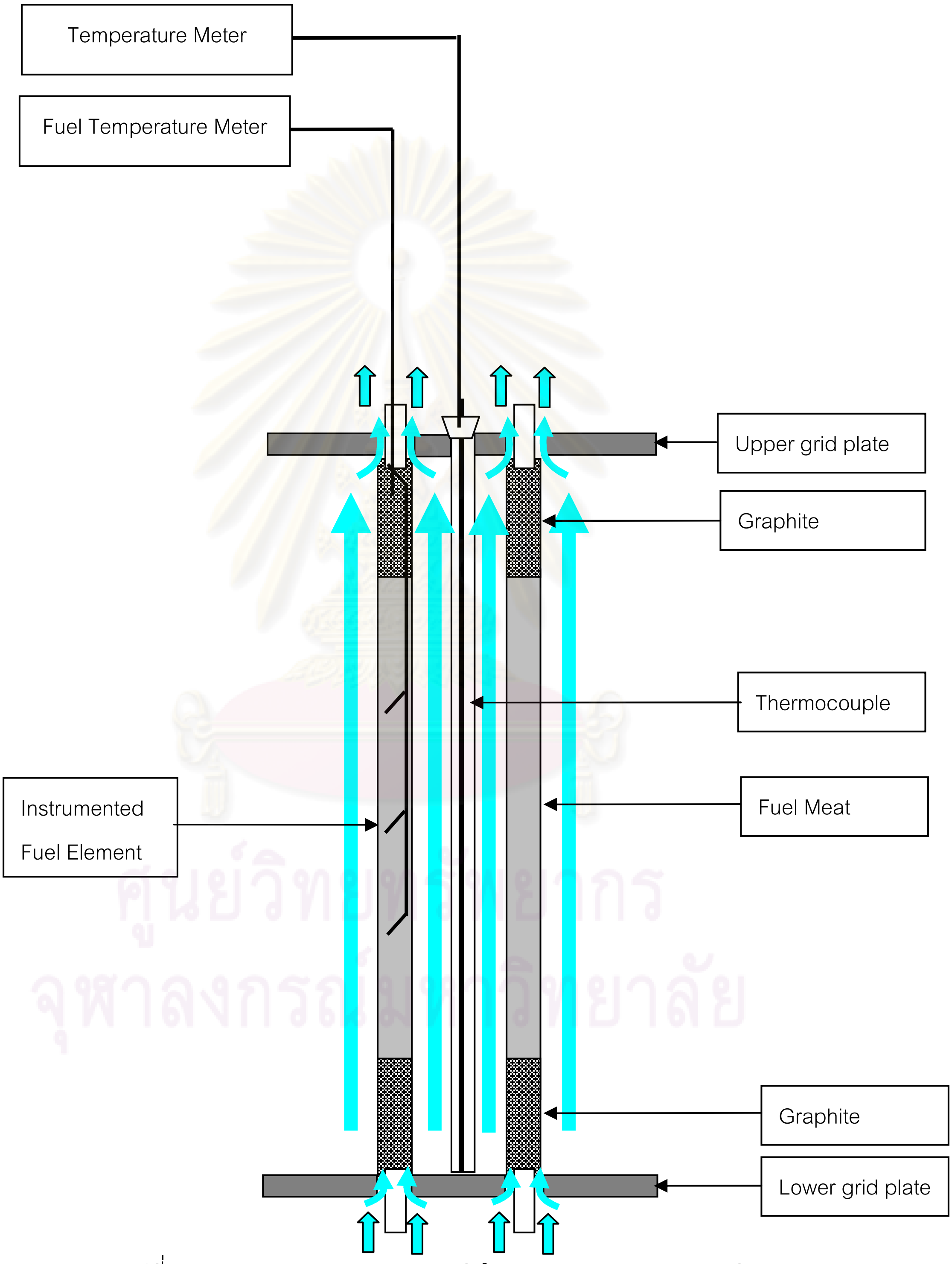
4.1.2.6 ทำการวัดค่าอุณหภูมิของสารระบายความภายในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยเริ่มจากตำแหน่งที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 นิ้ว ตามระดับความสูงของแท่งเชื้อเพลิง และบันทึกค่าอุณหภูมิที่แต่ละระยะเวลา

4.1.2.7 เพิ่มระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เป็น 1,000,1,200 และ 1,500 kW ตามลำดับ และทำเช่นเดียวกันกับข้อ 4.1.2.6

4.1.2.8 นำผลการทดลองที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ

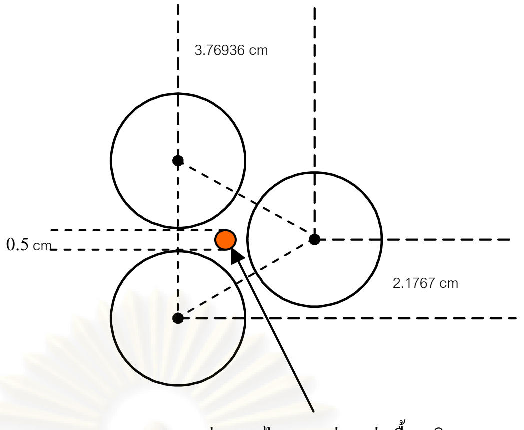
คำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

4.1.2.9 ทำซ้ำตามข้อ 4.1.2.1 - 4.1.2.8 ในตำแหน่งอื่นๆ ที่ต้องการวัด



รูปที่ 4.3 แผนผังของหัววัดอุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิ
ในเนื้อเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิงสำหรับการทดลองวัด

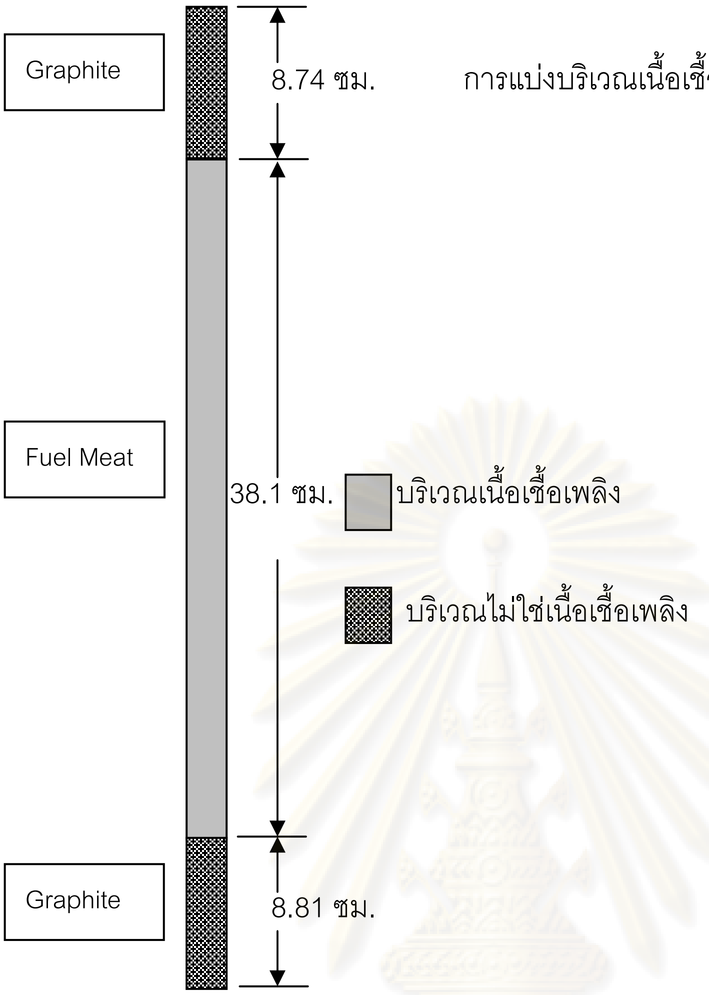
4.2 การคำนวณการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 โดยใช้โปรแกรมคำนวณสำหรับวิเคราะห์ของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณทางเทอร์มัลไฮโดรลิกส์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเมื่อแกนปฏิกรณ์ฯ ปฏิบัติการอยู่ในสภาวะคงตัว

โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มีข้อมูลขาเข้าที่เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

4.2.1 รูปทรงทางเรขาคณิตของแท่งเชื้อเพลิง[1]

รูปทรงทางเรขาคณิตและการแบ่งบริเวณเนื้อเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



(ก)

การแบ่งบริเวณเนื้อเชื้อเพลิง	ระยะเนื้อเชื้อเพลิง(ซม.)
20	38.1
19	36.095
18	34.089
17	32.084
16	30.079
15	28.074
14	26.068
13	24.063
12	22.058
11	20.053
10	18.047
9	16.042
8	14.037
7	12.032
6	10.026
5	8.021
4	6.016
3	4.011
2	2.005
1	0

(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) รูปทรงทางเรขาคณิตของแท่งเชื้อเพลิง

(ข) การแบ่งบริเวณเนื้อเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 สหสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อน (heat transfer correlation)[9]

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ค่าสหสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อน จะใช้ค่าสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ดังสมการที่ (4.1)

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} Pr^{0.4} \qquad (4.1)$$

เมื่อ Nu เป็น เลขนัสเซลล์ (Nusselt number)

Re เป็น เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

Pr เป็น เลขพรันเดิล (Prandtl number)

4.2.3 ตัวประกอบยอดสุดตามแนวแกน (axial peaking factor : Fz)[9]

ค่าตัวประกอบยอดสุดตามแนวแกนนี้จะหาได้จากการคำนวณเชิงนิวตรอน โดยทฤษฎีทรานสปอร์ตของนิวตรอน โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ SRAC

4.2.4 สภาพการนำความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิง[9]

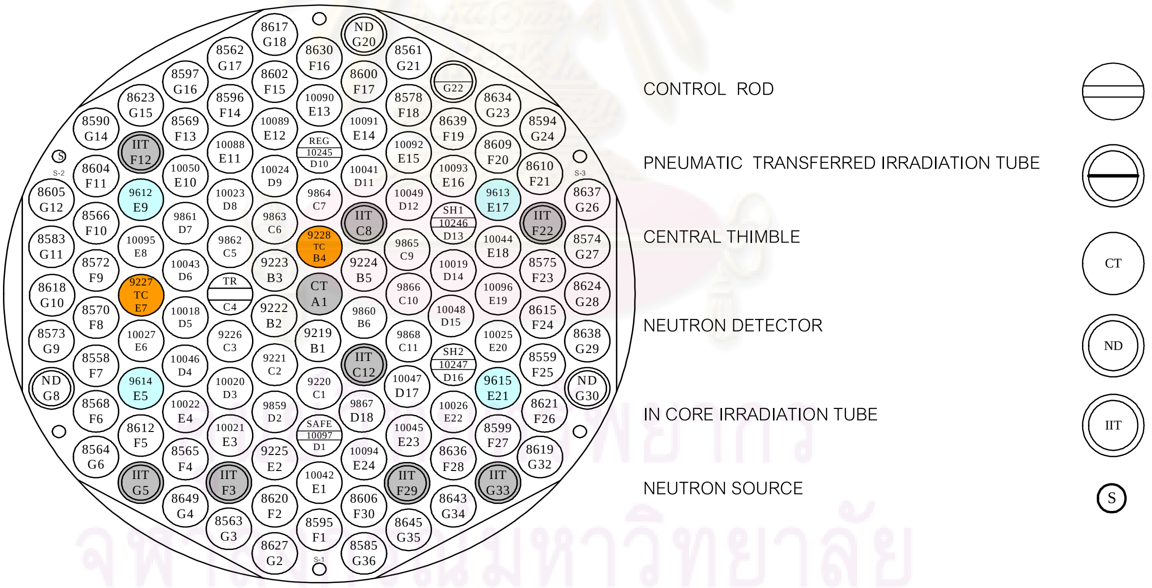
เนื้อเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 เป็น U-ZrH (uranium-zirconium hydride) ซึ่งจะมีสภาพการนำความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงเป็นไปตามสมการที่ (4.2)

$$\bar{k} = 0.175846 + (7.4937 \times 10^{-5})\, T \quad (\text{W/cm. °C}) \qquad (4.2)$$

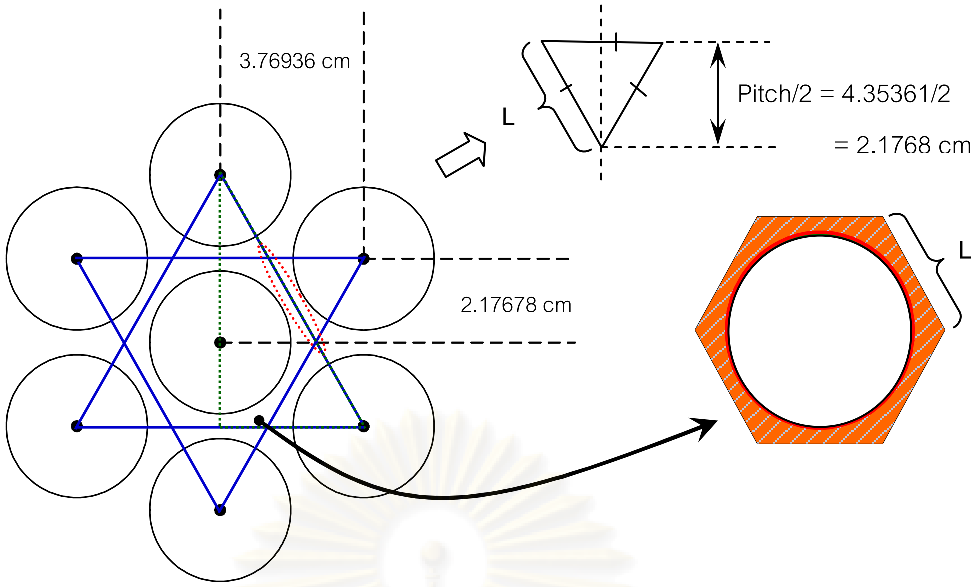
โดย $\bar{k}$ เป็น ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของเนื้อเชื้อเพลิง

T เป็น อุณหภูมิ (°C)

4.2.5 พื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิง[5]



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ผังแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1
(ข) แบบจำลองพื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณ

จากรูปที่ 4.6 (ก) แสดงให้เห็นถึงผังการจัดวางเชื้อเพลิงในแต่ละตำแหน่งภายในแกนปฏิกรณ์ฯ ส่วนรูปที่ 4.6(ข) เป็นแบบจำลองพื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิงเพื่อใช้สำหรับการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

พื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างพื้นที่รูปหกเหลี่ยมและพื้นที่ของรูปวงกลม ซึ่งพื้นที่รูปวงกลมจะแทนด้วยแท่งเชื้อเพลิงนั่นเอง ซึ่งการคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล และพื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พื้นที่การไหลรอบแท่งเชื้อเพลิง $= \frac{3\sqrt{3}}{2} L^2 - \frac{\pi D^2}{4}$

$= \frac{3\sqrt{3}}{2} 2.5136^2 - \frac{\pi x 3.7388^2}{4}$

$= 5.465$ ซม^2.

เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (De) $= 4 \times \frac{5.465}{\pi D}$

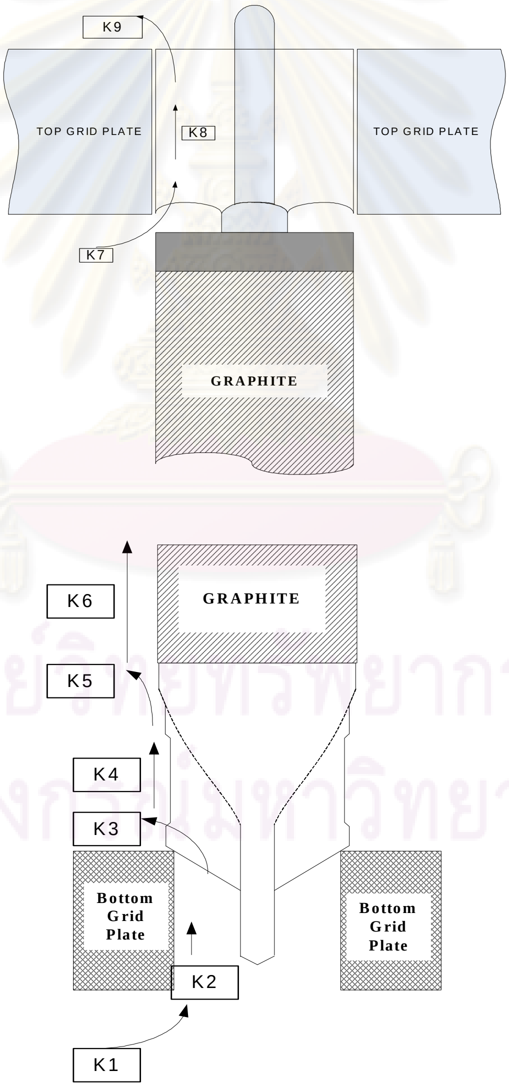
$= 4 \times \frac{5.465}{\pi x 3.7338}$

$= 1.864$ ซม.

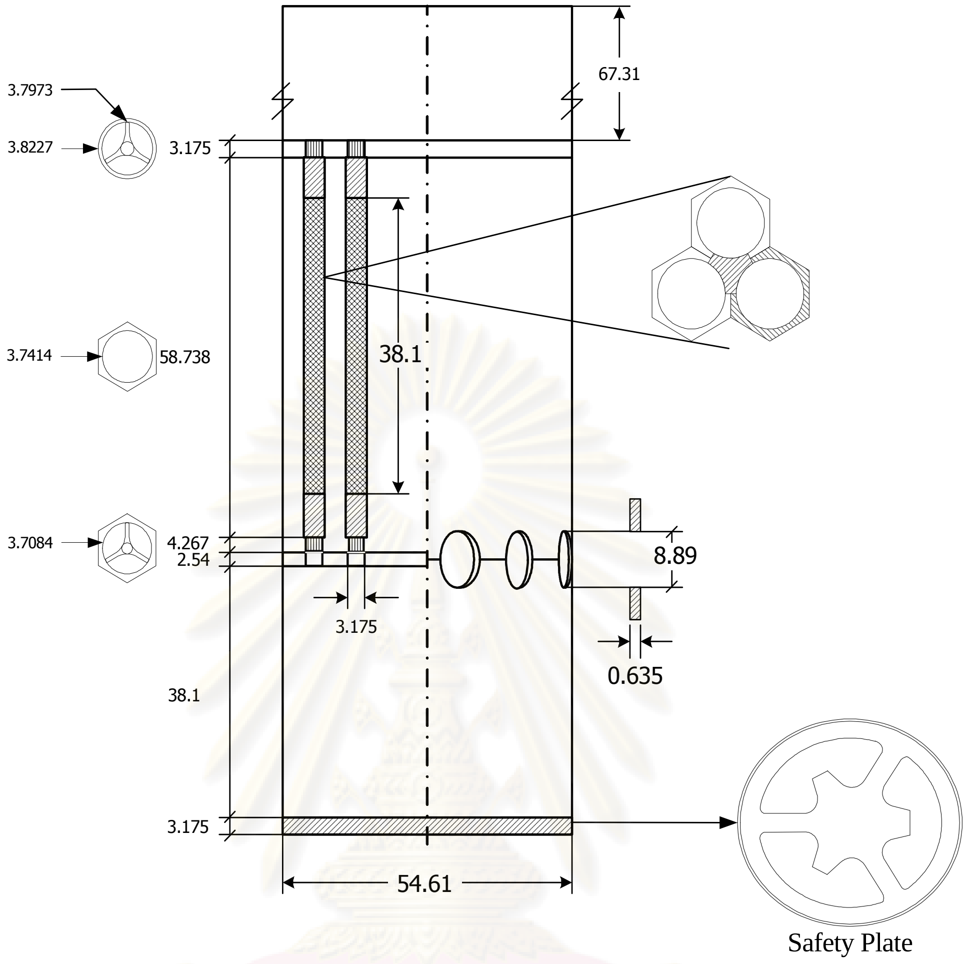
4.2.6 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน (form loss coefficient)[5]

การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ฯ แบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนตามช่องการไหล คือ ช่องการไหลที่ได้รับความร้อน (heated channel) และ ช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน (non-heated channel)

ในส่วนของช่องการไหลที่ได้รับความร้อนจะเป็นบริเวณที่สารระบายความร้อนไหลผ่านตามแนวแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.7 และในส่วนของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนจะเป็นบริเวณแผ่นรองนิรภัย(safety plate) และบริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนที่เกิดขึ้นกับแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน
ที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ฯ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน ณ บริเวณช่องการไหลที่ได้รับความร้อน โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.7 เป็นดังต่อไปนี้

ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (K1, K2, K3) โดยทั้ง 3 ตำแหน่งนี้จะสมมุติว่ามีพื้นที่การไหลที่เท่ากัน ซึ่งมีขนาดเท่ากับพื้นที่ของช่องบนแผ่นรองเชื้อเพลิงด้านล่าง (lower grid plate) (เส้นผ่าศูนย์กลางของช่องบนแผ่นรองเชื้อเพลิงด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีขนาดเท่ากับ 3.175 ซม.)

$$De_{K1} = De_{K2} = De_{K3} = 3.175 \text{ ซม.}$$

ตำแหน่งที่ 4 (K4) เป็นตำแหน่งที่สารระบายความร้อนจะไหลผ่านครีบของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะวางอยู่บนแผ่นรองเชื้อเพลิงด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งในการนี้ได้สมมุติว่าครีบของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีลักษณะเป็นรูป 3 แฉก ให้มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 30 ของพื้นที่การไหลทั้งหมด ดังนั้น พื้นที่การไหลของสารระบายความร้อนจากด้านล่างของครีบ A_{fbf} จะมีค่าเป็น

$$A_{fbf} = 70\% \times \frac{\pi}{4}(3.7084)^2 = 7.56 \text{ ซม.}^2$$

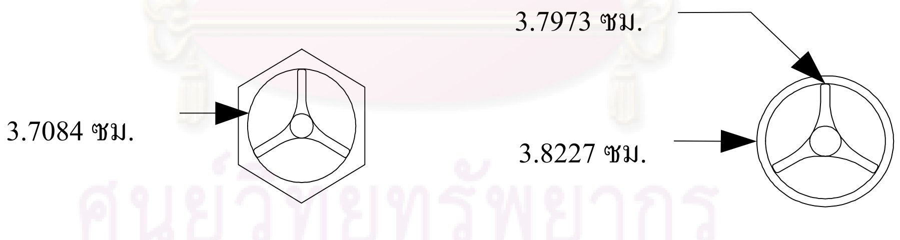
พื้นที่การไหลของตำแหน่งที่ 4 (K4) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของพื้นที่การไหลของสารระบายความร้อนจากด้านล่างของครีบ A_{fbf} และพื้นที่แตกต่างของการไหลในช่องการไหลขนาดหกเหลี่ยม และพื้นที่วงกลมที่เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของครีบทั้ง 3 แฉก

พื้นที่การไหลของตำแหน่งที่ 4 $= 7.56 + 5.388$

$= 12.948$ ซม^2.

$$De_{K4} = 4 \times \frac{12.948}{\pi \times 3.7084}$$

$= 4.446$ ซม.



(ก) (ข)

รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของพื้นที่การไหลของสารระบายความร้อนที่ไหลผ่านครีบของแท่งเชื้อเพลิง

(ก) แผ่นรองแท่งเชื้อเพลิงด้านล่าง (lower grid plate)

(ข) แผ่นรองแท่งเชื้อเพลิงด้านบน (upper grid plate)

ตำแหน่งที่ 5 และ 6 (K5, K6) เป็นตำแหน่งการไหลของสารระบายความร้อนที่ออกจากครีบของแท่งเชื้อเพลิงไหลไปตามแนวแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของตำแหน่ง K5 และ K6 หาได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$De_{K5} = De_{K6} = 4 \text{ X } \frac{5.388}{\pi \times 3.7414} = 1.83 \text{ ซ ม.}$$

ตำแหน่งที่ 7 ถึง 9 (K7, K8, K9) เป็นตำแหน่งการไหลของสารระบายความร้อนบริเวณด้านบนของแท่งเชื้อเพลิง โดยจะไหลผ่านครีบของแท่งเชื้อเพลิงทางด้านบน ดังในรูปที่ 4.9 (ข) โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของครีบด้านบนจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 3.7973 ซม. ในขณะที่แผ่นรองเชื้อเพลิงด้านบน (upper grid plate) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.8227 ซม. ในการนี้จะสมมุติว่าพื้นที่การไหลของครีบด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงมีประมาณร้อยละ 30 ดังนั้นพื้นที่ของครีบด้านบน A_{tf} จะประมาณได้เท่ากับ

$$A_{tf} = 30\% \frac{\pi D_f^{\ 2}}{4} = 0.3 \times \frac{\pi}{4} \times 3.7973^2 = 3.398 \quad \text{ซม.}^2$$

พื้นที่การไหลทั้งหมดของตำแหน่งที่ 7,8 และ9 จะมีค่าเท่ากับ

$$= \frac{\pi D_{uh}^2}{4} - A_{tf} = \frac{\pi}{4} \times 3.8227^2 - 3.398 = 8.08 \quad \text{ซม.}^2$$

ดังนั้นค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล ของตำแหน่งที่ 7,8และ 9 จะมีค่าเท่ากับ

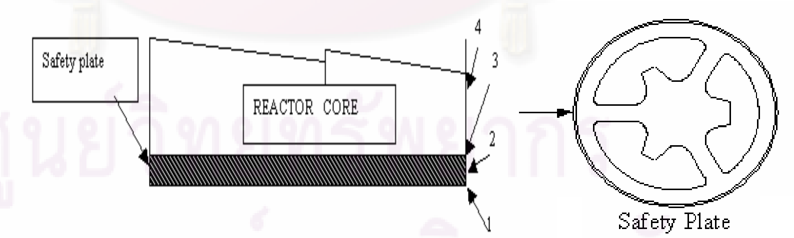
$$De_{K7} = De_{K8} = De_{K9} = 4 \times \frac{8.08}{(\pi \times 3.8227) + (\pi \times 3.7973)} = 1.35 \quad \text{ซม.}$$

จากผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล พื้นที่การไหล และช่วงการไหล ในส่วนของช่องการไหลที่ได้รับความร้อนสามารถแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของการวิเคราะห์บริเวณช่องที่ได้รับความร้อน

บริเวณที่	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน(K)	เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (De) (ซม.)	พื้นที่การไหล (ตร.ซม.)	ความยาวการไหล (ซม.)
1	0.50	3.175	7.917	0.00
2	0.00	3.175	7.917	3.175
3	0.151	3.175	7.917	0.00
4	0.00	4.446	12.948	4.2672
5	0.292	1.830	5.388	0.00
6	0.00	1.830	5.388	58.7375
7	0.111	1.350	8.080	0.00
8	0.00	1.350	8.080	3.175
9	1.00	1.350	8.080	0.00

การคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน ณ บริเวณช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน สามารถสร้างแบบจำลองได้ดังรูป 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ณ บริเวณแผ่นรองนิรภัย (safety plate)

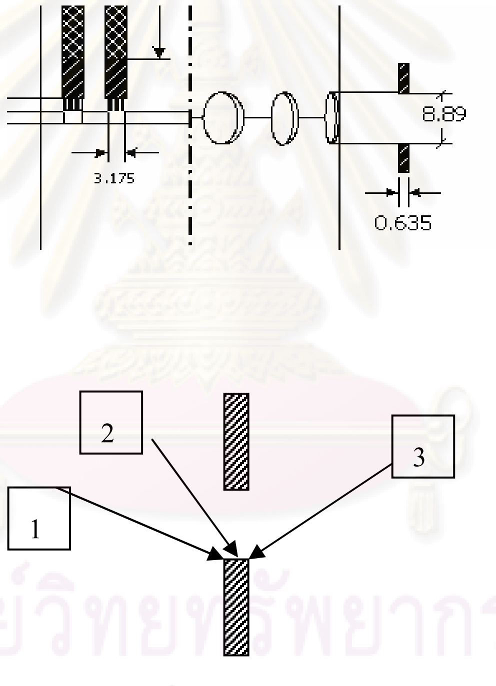
จากรูปที่ 4.10 เป็นแบบจำลองเพื่อการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนบริเวณแผ่นรองนิรภัย (safety plate) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสี่ตำแหน่ง คือ บริเวณที่1,2,3 และ 4 โดยที่ตำแหน่งที่ 1,2 และ 3 จะมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลที่เท่ากันเพราะอยู่บนแผ่นรองนิรภัยตัวเดียวกัน พื้นที่การไหลของแผ่นรอง

นิรภัยจะมีค่าประมาณ 1067.254 ตร.ซม. ในขณะที่เส้นรอบวงของแผ่นรองนิรภัยมีค่าเท่ากับ 286.88 ซม.

ดังนั้น

ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลที่จุด 1, 2 และ 3 $= 4 \times \dfrac{1067.254}{286.88} = 14.88$ ซม.

ในส่วนของจุดที่ 4 สารระบายความร้อนจะไหลผ่านถังแกนปฏิกรณ์ฯ เข้าไปยังแผ่นกริดด้านล่าง ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของจุดที่ 4 จะมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถังแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งเท่ากับ 54.61 ซม. นั่นเอง



รูปที่ 4.11 ช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ณ บริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกนปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.11 เป็นการคำนวณหาการสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน ณ บริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกนปฏิกรณ์ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสามตำแหน่ง คือ บริเวณที่1,2 และ 3 ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องถังแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 8.89 ซม.

จากผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อนเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล พื้นที่การไหล และช่วงการไหล ในส่วนของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อน สามารถแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนบริเวณแผ่นรองนิรภัย

บริเวณที่	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน(K)	เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (De) (ซม.)	พื้นที่การไหล (ตร.ซม.)	ความยาวการไหล (ซม.)
1	0.50	14.88	1067.254	0.00
2	0.00	14.88	1067.254	3.175
3	0.151	14.88	1067.254	0.00
4	0.00	54.61	2342.264	38.10

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ของช่องการไหลที่ไม่ได้รับความร้อนบริเวณช่องด้านข้างทั้ง 10 ช่องของถังแกนปฏิกรณ์ฯ

บริเวณ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรูปทรงของสารระบายความร้อน(K)	เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (De) (ซม.)	พื้นที่การไหล (ตร. ซม.)	ความยาวการไหล (ซม.)
1	0.50	8.89	620.72	0.00
2	0.00	8.89	620.72	0.635
3	1.00	8.89	620.72	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการวิจัย

5.1 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่สภาวะคงตัวในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย –1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

5.1.1 การทดลองวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ

5.1.1.1 การทดลองวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ฯ จะทำการวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง โดยใช้แท่งเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่ง B4 และ E7 ดังรูปที่ 5.2

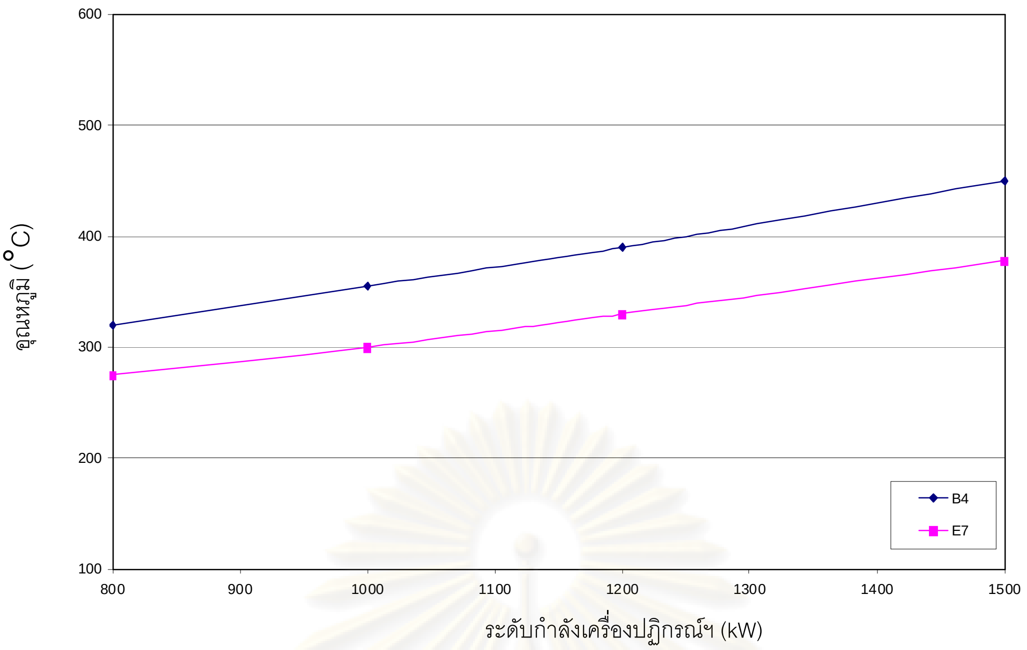
ซึ่งผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่ตำแหน่ง B4 และ E7 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงโดยหัววัดอุณหภูมิที่อยู่ในแท่งเชื้อเพลิง

ตำแหน่งการวัด	อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง (°C)			
	800 kW	1,000 kW	1,200 kW	1,500 kW
B4	320	355	390	450
E7	275	300	330	378

จากตารางที่ 5.1 สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดกับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ได้ดังรูปที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัด กับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ

จากรูปที่ 5.1 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงในตำแหน่ง B4 และ E7ที่ได้จากการวัด กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะเห็นว่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยที่ตำแหน่ง B4 จะให้ค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่สูงกว่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่อยู่ในตำแหน่ง E7 เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง B4 มีค่าพีคกำลังสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง E7

5.1.1.2 การทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 นี้ ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ในสภาวะการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบคงตัว โดยใช้อุปกรณ์วัดทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ของแกนปฏิกรณ์ฯ ตลอดจน ในการวัดการกระจายอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแต่ละตำแหน่งนั้น ได้มีการปรับระยะการวัดตามความสูงของเนื้อเชื้อเพลิงในแนวแกน โดยทำการวัดที่ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันภายในเนื้อเชื้อเพลิง เพื่อจะทำให้ทราบว่าแต่ละระดับความสูงของเนื้อเชื้อเพลิงมีผลต่ออุณหภูมิของสารระบายความร้อนอย่างไร

ในการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยการใช้อุปกรณ์วัดทางอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้ทำการทดลองวัดในช่องการไหลของสารระบายความร้อน ซึ่งอยู่ระหว่างแท่งเชื้อเพลิง โดยทำการทดลองวัดทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 ระหว่างตำแหน่ง C1 C2 และ D2

ตำแหน่งที่ 2 ระหว่างตำแหน่ง D5 D6 และ E7

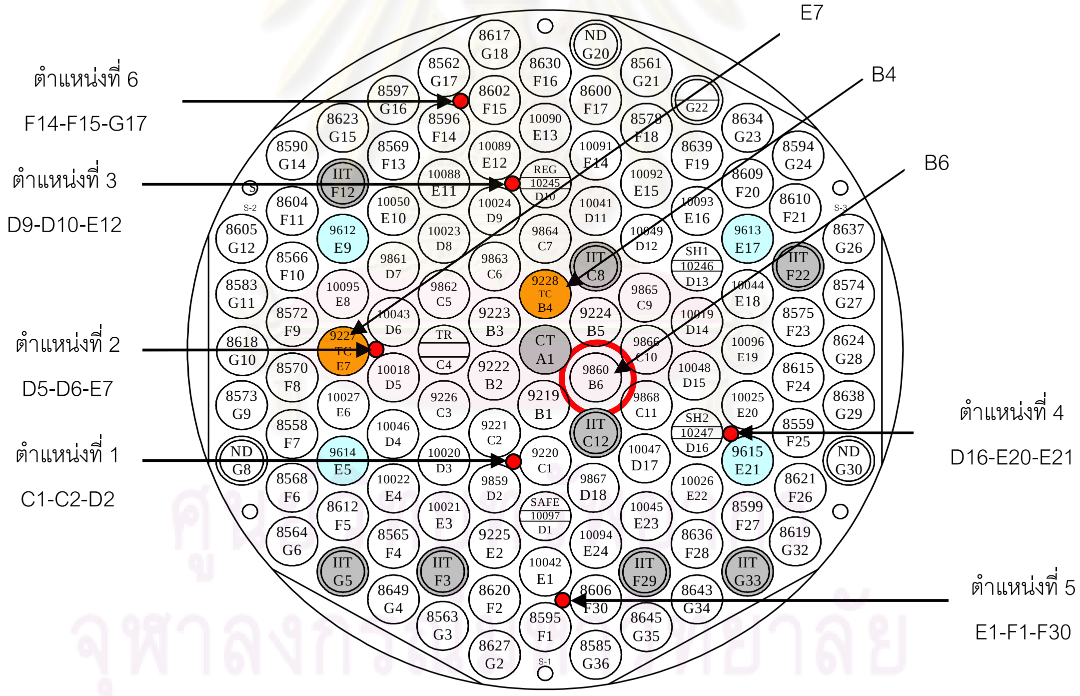
ตำแหน่งที่ 3 ระหว่างตำแหน่ง D9 D10 และ E12

ตำแหน่งที่ 4 ระหว่างตำแหน่ง D16 E20 และ E21

ตำแหน่งที่ 5 ระหว่างตำแหน่ง E1 F1 และ F30

ตำแหน่งที่ 6 ระหว่างตำแหน่ง F14 F15 และ G17

ตำแหน่งการตรวจวัดได้แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อยภายในแกนปฏิกรณ์ฯ

จากการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่แต่ละระยะของเนื้อเชื้อเพลิงที่ระดับกำลังต่างๆ สามารถแสดงผลการวัดได้ดังตารางที่ 5.2 – 5.7

ตารางที่ 5.2 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 1

ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	40.33	0.52
	3	54.67	0.82
	6	59.83	1.17
	9	71.00	0.89
	12	71.17	1.17
	15	71.00	0.89
1,000	0	40.50	0.55
	3	55.00	0.89
	6	62.33	0.82
	9	72.00	0.89
	12	75.50	1.05
	15	74.17	0.75
1,200	0	41.50	0.55
	3	56.00	0.89
	6	58.67	0.82
	9	73.00	0.89
	12	75.83	0.17
	15	77.83	0.75
1,500	0	44.0	0.63
	3	54.7	0.82
	6	65.0	0.89
	9	75.3	1.21
	12	81.3	1.21
	15	87.2	0.75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 2

ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	40.17	0.41
	3	50.17	0.75
	6	55.00	0.89
	9	57.67	1.03
	12	63.50	1.38
	15	63.33	1.63
1,000	0	40.67	0.82
	3	50.33	1.86
	6	55.83	1.17
	9	64.83	1.72
	12	68.33	1.37
	15	69.17	1.17
1,200	0	41.33	0.82
	3	55.50	1.05
	6	57.67	1.51
	9	66.83	1.83
	12	71.17	1.47
	15	72.17	1.60
1,500	0	41.83	0.75
	3	48.67	1.75
	6	61.50	1.38
	9	69.50	1.38
	12	75.50	1.05
	15	76.83	1.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 3

ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	56.50	0.55
	3	40.50	2.81
	6	47.83	1.33
	9	55.67	1.03
	12	64.17	0.41
	15	61.00	1.26
1,000	0	59.33	0.82
	3	43.00	0.89
	6	55.00	1.10
	9	58.83	0.75
	12	67.50	0.84
	15	66.30	0.52
1,200	0	61.83	0.41
	3	45.33	0.82
	6	55.67	2.34
	9	58.33	1.03
	12	68.00	0.00
	15	67.17	1.47
1,500	0	62.17	0.41
	3	46.17	0.41
	6	61.17	1.33
	9	70.33	4.97
	12	75.33	0.82
	15	71.83	0.41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 4

ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	34.50	0.84
	3	48.17	1.17
	6	55.50	1.64
	9	63.17	2.04
	12	66.33	1.37
	15	57.33	1.63
1,000	0	37.17	0.75
	3	48.33	1.21
	6	68.00	1.10
	9	71.17	1.83
	12	66.50	1.76
	15	61.00	1.55
1,200	0	36.50	0.55
	3	52.50	1.87
	6	71.00	2.53
	9	73.67	1.37
	12	74.00	1.41
	15	61.00	1.10
1,500	0	37.67	0.52
	3	57.00	1.26
	6	75.50	2.17
	9	76.33	1.63
	12	74.67	0.82
	15	65.67	1.03

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 5

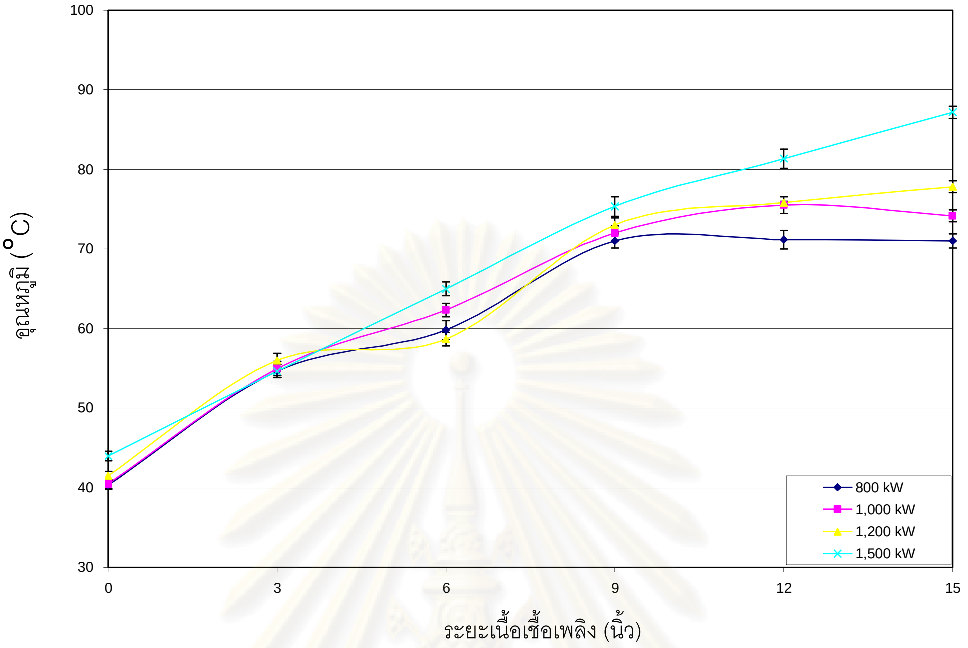
ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	45.83	0.41
	3	50.83	0.98
	6	58.17	1.60
	9	55.33	1.63
	12	52.50	1.05
	15	48.83	0.98
1,000	0	46.50	1.52
	3	51.50	0.84
	6	62.17	0.41
	9	61.67	1.37
	12	61.33	1.75
	15	49.50	1.52
1,200	0	47.83	0.41
	3	55.17	0.98
	6	65.33	1.51
	9	66.17	1.33
	12	62.17	1.33
	15	55.17	1.47
1,500	0	48.67	1.21
	3	58.00	0.63
	6	67.17	1.33
	9	67.67	1.86
	12	65.50	2.59
	15	56.00	1.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

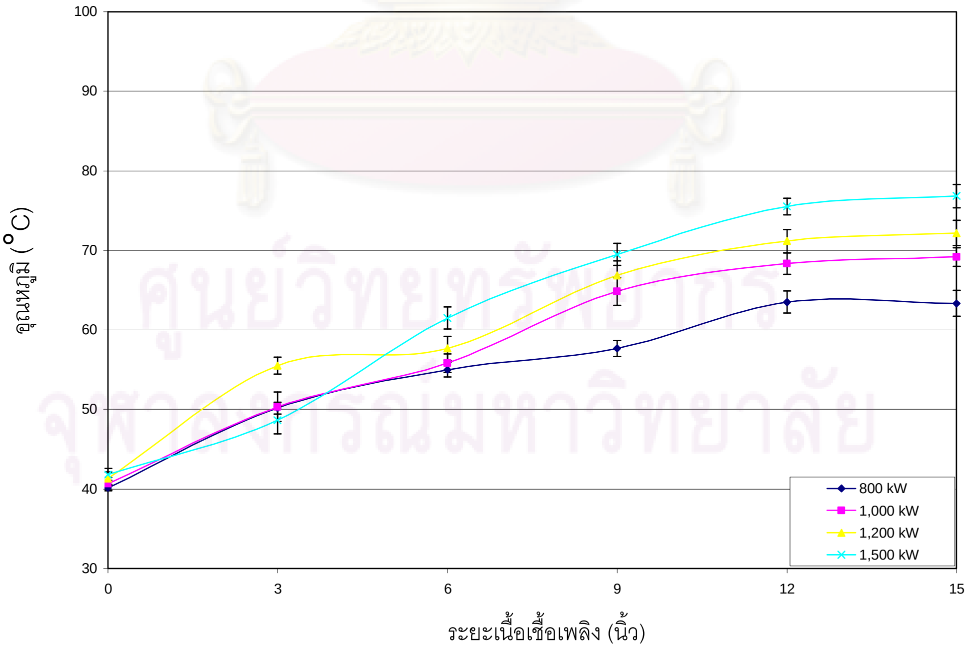
ตารางที่ 5.7 แสดงผลอุณหภูมิสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด ในตำแหน่งที่ 6

ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)	ระยะของเนื้อเชื้อเพลิง (นิ้ว)	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารระบายความร้อน (°C)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
800	0	48.50	0.55
	3	52.67	2.73
	6	55.17	1.17
	9	55.83	0.98
	12	55.67	0.82
	15	51.17	1.72
1,000	0	49.83	1.60
	3	50.00	0.63
	6	53.67	1.37
	9	58.67	1.75
	12	58.50	2.17
	15	50.67	1.03
1,200	0	50.17	1.47
	3	51.33	1.21
	6	54.83	1.60
	9	59.83	1.47
	12	57.67	1.21
	15	52.33	1.37
1,500	0	53.50	0.84
	3	54.33	1.21
	6	56.33	1.03
	9	63.50	1.38
	12	62.67	1.75
	15	55.83	1.60

จากผลการวัดที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2 – 5.7 สามารถที่จะนำมาแสดงผลในรูปของแผนภูมิเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแต่ละระยะความสูงของเนื้อเชื้อเพลิงกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 – 5.8

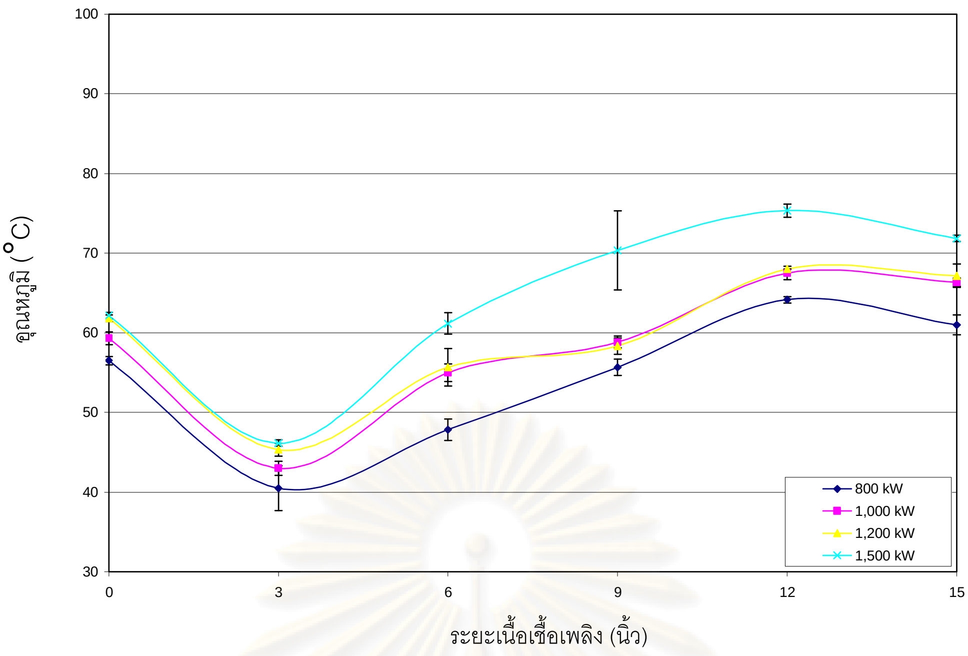


รูปที่ 5.3 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 1 ในแกนปฏิกรณ์ฯ

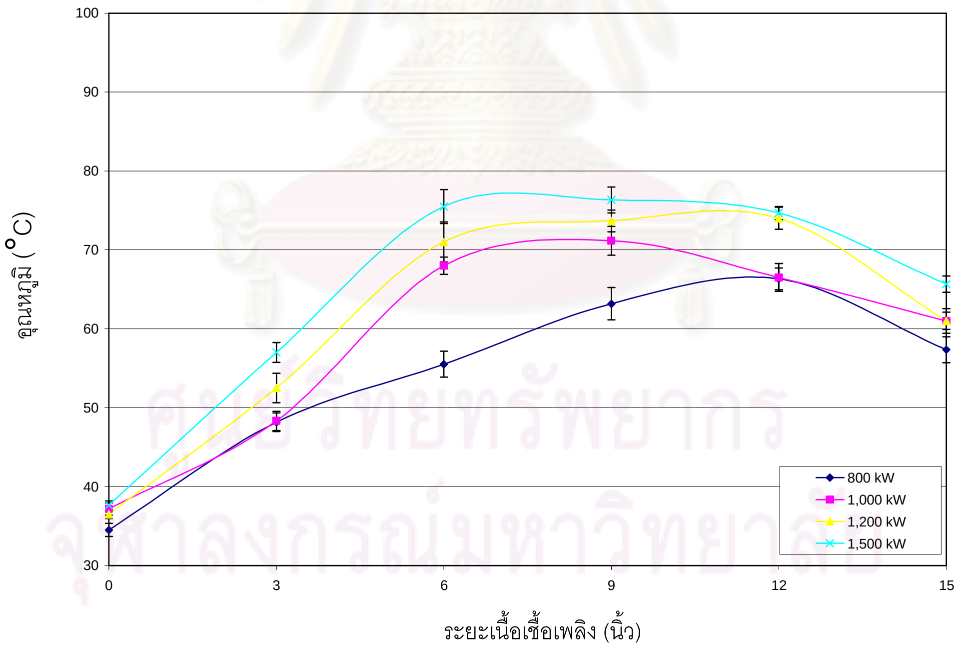


รูปที่ 5.4 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 2 ในแกนปฏิกรณ์ฯ

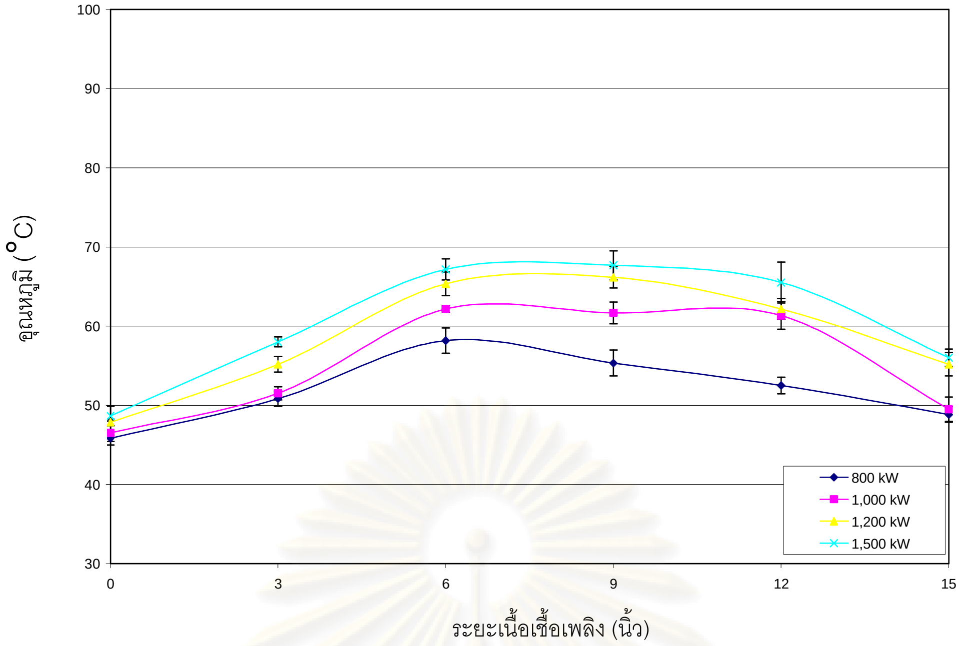
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



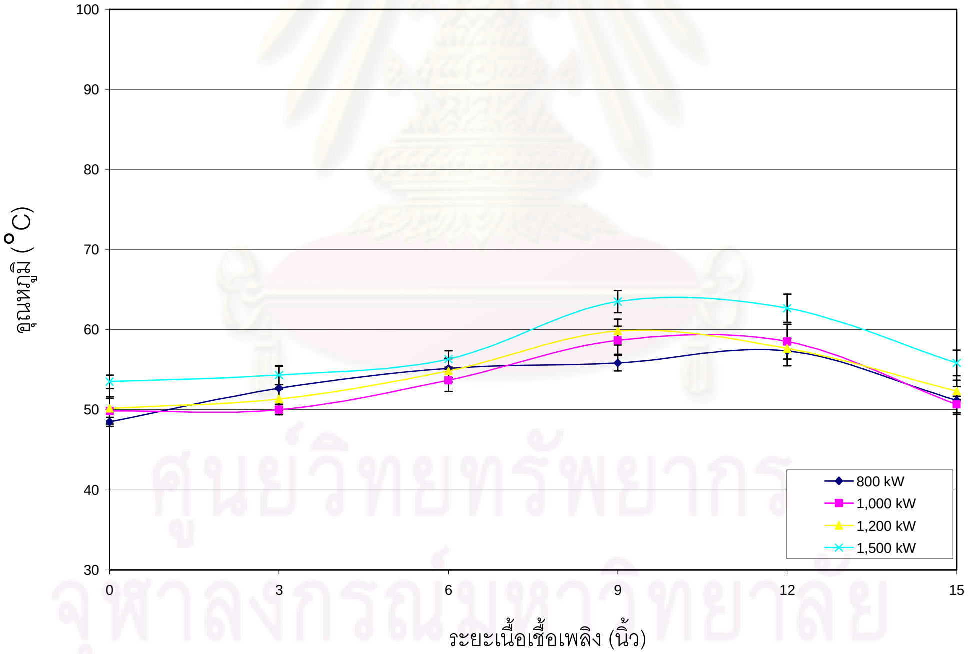
รูปที่ 5.5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 3 ในแกนปฏิกรณ์ฯ



รูปที่ 5.6 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 4 ในแกนปฏิกรณ์ฯ



รูปที่ 5.7 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 ในแกนปฏิกรณ์ฯ



รูปที่ 5.8 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ ตำแหน่งที่ 6 ในแกนปฏิกรณ์ฯ

จากรูปที่ 5.3 – 5.8 (ยกเว้นรูปที่ 5.5) ซึ่งแสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิและการระบายความร้อน ณ แต่ละตำแหน่งในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่ได้ทำการวัดในระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯที่แตกต่างกัน จะแสดงให้เห็นว่า บริเวณเริ่มต้นของระยะเชื้อเพลิง (ที่ระยะ 0 นิ้ว ของการทดลอง) อุณหภูมิของสารระบายความร้อนจะมีค่าต่ำสุด เพราะเป็นจุดที่เริ่มได้รับความร้อน

จากเนื้อเชื้อเพลิง เมื่อมีการปรับระยะการวัดให้สูงขึ้นตามระยะความยาวของเนื้อเชื้อเพลิง สารระบายความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนที่มีการถ่ายเทออกมาจากเนื้อเชื้อเพลิง และการลอยตัวของสารระบายความร้อนก็จะเป็นไปตามลักษณะการระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งเป็นลักษณะการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ กล่าวคือสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงก็จะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนและได้รับความร้อนสะสมจากการถ่ายเทมาจากเชื้อเพลิงตามระยะการลอยตัวของสารระบายความร้อน จนใกล้ระยะทางออกของสารระบายความร้อนที่จะออกจากแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่บริเวณใกล้ทางออกของสารระบายความร้อนที่จะออกจากแกนปฏิกรณ์ฯ จะเริ่มมีค่าลดลงอันเนื่องมาจาก จุดที่ทำการทดลองวัดนั้น เป็นช่องขนาด 5 มม. ในขณะที่หัววัดอุณหภูมิมีขนาด 4.5 มม.ทำให้สารระบายความร้อนไหลออกไปทางด้านครีบด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดช่องการไหลที่สะดวกมากกว่า จึงทำให้อุณหภูมิของสารระบายความร้อน ณ บริเวณนี้มีค่าลดลงนั่นเอง

ในกรณีของรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ 3 โดยอยู่ระหว่างตำแหน่ง D9 D10 และ E12 โดยตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่อยู่ติดกับตำแหน่งของแท่งควบคุม (D10 เป็นตำแหน่งของแท่งควบคุมเร็กกูเลติ้ง (Regulating)) ซึ่งแท่งเร็กกูเลติ้งจะเป็นแท่งควบคุมที่ใช้ปรับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยอัตโนมัติ เมื่อเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ในรูปแบบอัตโนมัติ แท่งควบคุมนี้จะมีสารดูดจับนิวตรอนอยู่ส่วนบนและส่วนล่างจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ตำแหน่งนี้ ที่จุดเริ่มต้น (0นิ้ว) อุณหภูมิของสารระบายความร้อนจะมีค่าไม่ต่ำสุด อันเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนจากเนื้อเชื้อเพลิงที่อยู่ส่วนล่างของแท่งควบคุมนี้นั่นเอง

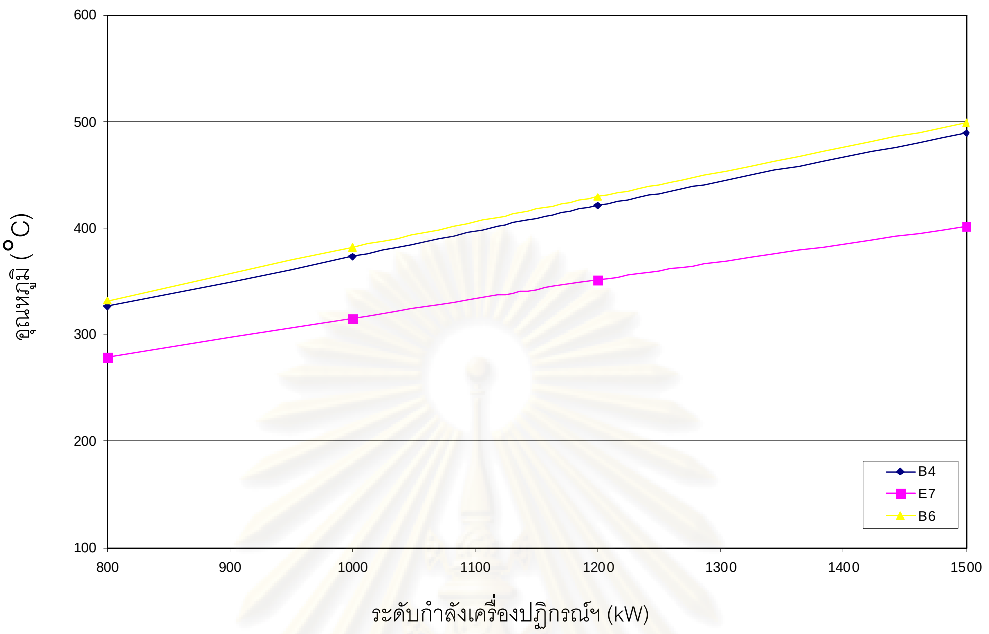
5.1.2 การคำนวณอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

5.1.2.1 การคำนวณอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง ได้ทำการคำนวณอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงในตำแหน่ง B4 E7 และ B6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าพีคกำลังสูงสุดของแกนปฏิกรณ์ฯ (hottest channel)[10] ซึ่งผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่5.8ข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ตำแหน่งการคำนวณ	อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง (°C)			
	800 kW	1,000 kW	1,200 kW	1,500 kW
B4	326.36	373.15	421.32	489.26
E7	279.03	315.28	351.59	401.68
B6	332.11	381.86	429.46	499.03

จากตารางที่ 5.8 สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงกับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ ได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 กับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ฯ

5.1.2.2 การคำนวณอุณหภูมิของสารระบายความร้อน จะคำนวณจากตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าพีคกำลังสูงสุดของบริเวณช่องการไหลที่ได้ทำการทดลองวัดในตำแหน่งที่ 1 ถึง 6 ซึ่งเป็นดังต่อไปนี้

ตำแหน่งการวัดที่ 1 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง C2

ตำแหน่งการวัดที่ 2 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง D6

ตำแหน่งการวัดที่ 3 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง D9

ตำแหน่งการวัดที่ 4 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง

E 20 สำหรับระดับกำลัง 800 kW 1,000 kW และ 1,200 kW

D16 สำหรับระดับกำลัง 1,500 kW

ตำแหน่งการวัดที่ 5 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง E1

ตำแหน่งการวัดที่ 6 มีค่าพีคกำลังสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งแท่งเชื้อเพลิง F14

ซึ่งตำแหน่งต่างๆ ของแผนผังแกนปฏิกรณ์ฯ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2

ผลการคำนวณอุณหภูมิของสารระบายความร้อนจะกล่าวอยู่ในส่วนของการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่1 ที่ได้ จากการวัดกับผลการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

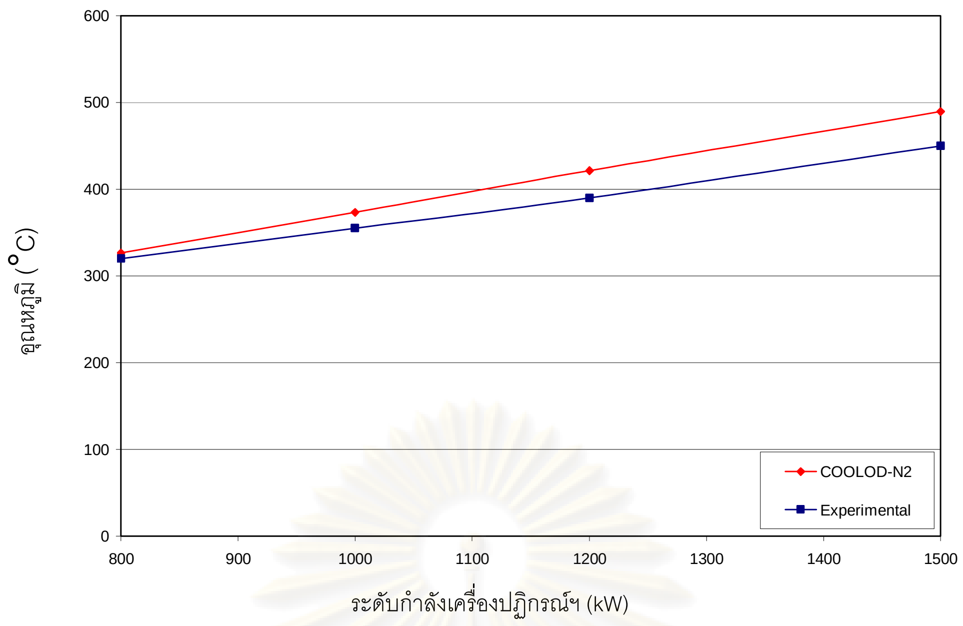
5.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่1 ที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ในการวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ปปว -1/1 นี้ ได้ทำการวัดค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงโดยวัดจากเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ตำแหน่งคือ B4 และ E7 และการวัดอุณหภูมิของน้ำซึ่งเป็นสารระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่มีการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 โดยทำการเดินเครื่องฯ ที่ระดับกำลังต่างๆ คือ 800 kW, 1,000 kW, 1,200 kW และ1,500 kW ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว -1/1 จะมีระดับกำลังสูงสุดที่อยู่ 2,000 kW ในการเดินเครื่องฯแบบคงตัว ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว -1/1 จะมีการเดินเครื่องฯ อยู่ที่ระดับกำลัง 1,200 kW ดังนั้นการวิเคราะห์นี้จึงมุ่งเน้นวิเคราะห์ในส่วนของการเดินเครื่องฯที่ระดับกำลังสูงเท่านั้น

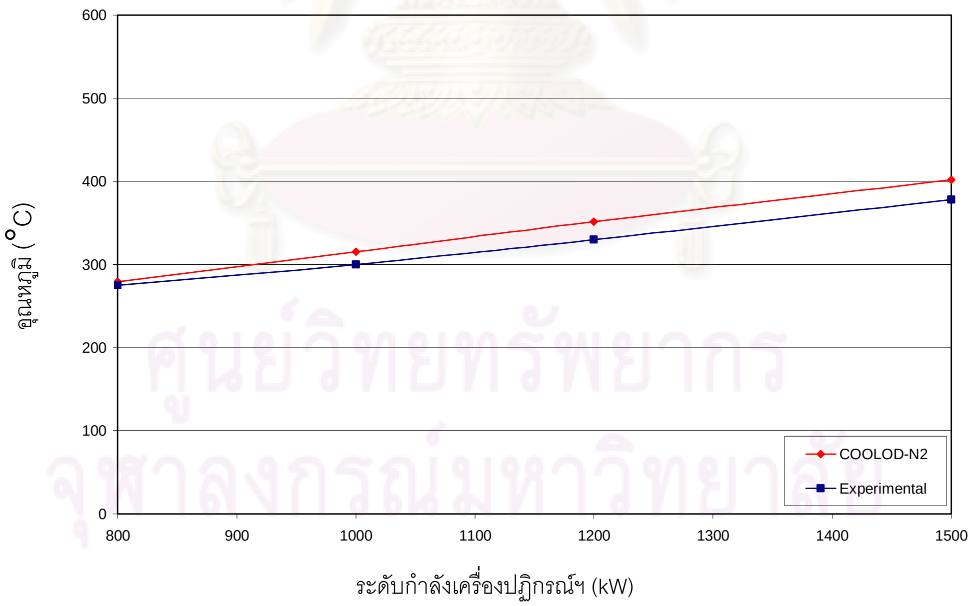
5.2.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดในเนื้อเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดอุณหภูมิบรรจุอยู่ภายในทั้ง 2 ตำแหน่ง คือที่ตำแหน่ง B4 และ E7 กับผลการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ที่ระดับกำลังต่างกัน แสดงไว้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดจากเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดบรรจุอยู่ใน ตำแหน่ง B4 กับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดจากเชื้อเพลิงชนิดที่มีหัววัดบรรจุอยู่ใน ตำแหน่ง E7 กับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.10 และ 5.11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 นั้น จะเห็นได้ว่าที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ 800 kW อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่หากเพิ่มระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างการทดลองกับการคำนวณมีค่าแตกต่างมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อเชื้อเพลิงจะทำให้ระยะช่องว่างระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงและเปลือกหุ้ม มีค่าลดลง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนจากเนื้อเชื้อเพลิงสู่สารระบายความร้อน สามารถถ่ายเทได้ดีขึ้น จึงทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากค่าของการทดลองมากขึ้น และส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างการทดลองกับการคำนวณมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับกำลังสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการแบ่งชั้นของเนื้อเชื้อเพลิงเพื่อการคำนวณ ที่ยังไม่ละเอียดพอ หรืออาจจะเป็นเพราะความคลาดเคลื่อนจากระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯในขณะที่ทำการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นค่าใช้งานจริง มีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณที่ทำการประเมินด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 เสมอ

และจากรูปที่ 5.10 และ 5.11 สามารถที่จะสร้างเป็นสมการโพลิโนเมี่ยนกำลังสองเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ[11] ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการหาค่าอุณหภูมิในเนื้อเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นจากการทดลองหรือการคำนวณที่ระดับกำลังต่างๆ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (5.1) ถึง (5.4) ดังนี้

$$F_1(P) = 208.97 + 0.1146P + (3 \times 10^{-5})P^2 \quad : \text{(B4, Experimental)} \quad (5.1)$$

$$F_2(P) = 126.33 + 0.2585P - (1 \times 10^{-5})P^2 \quad : \text{(B4, COOLOD-N2)} \quad (5.2)$$

$$F_3(P) = 200.37 + 0.0638P + (4 \times 10^{-5})P^2 \quad : \text{(E7, Experimental)} \quad (5.3)$$

$$F_4(P) = 117.29 + 0.216P - (2 \times 10^{-5})P^2 \quad : \text{(E7, COOLOD-N2)} \quad (5.4)$$

โดยที่

$F_{1\text{-}4}(P)$ เป็น อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง (°C)

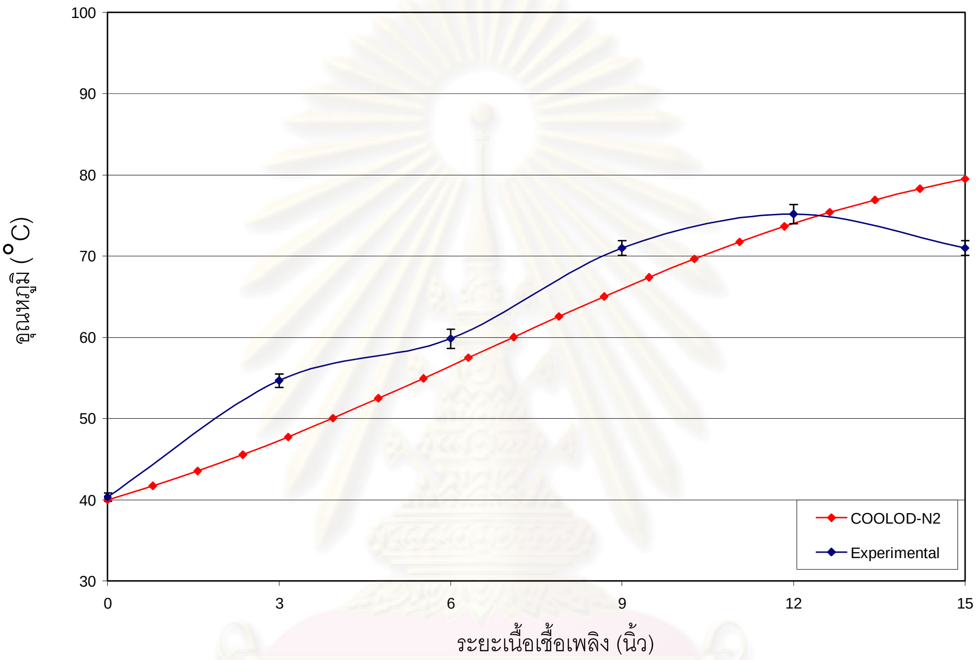
P เป็น กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)

โดยช่วงเขตของความสัมพันธ์ของสมการที่ (5.1) ถึง (5.4) จะอยู่ในช่วงระดับกำลัง 800 kW ถึงระดับกำลัง 1,500 kW

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

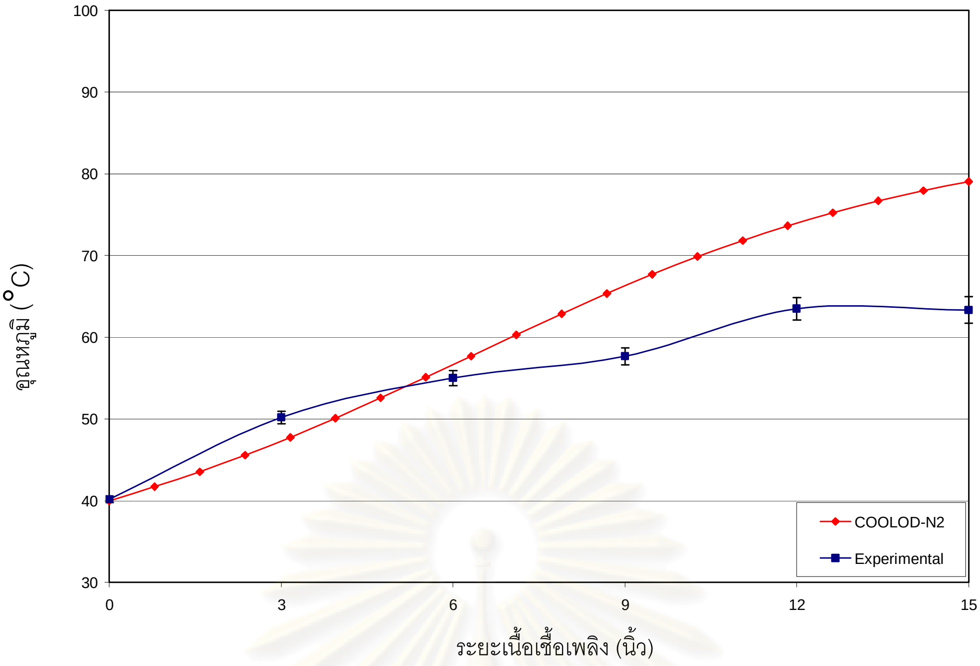
5.2.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัดกับผลการคำนวณโดยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ที่แต่ละตำแหน่งของการวัด และที่ระดับกำลังต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 – 5.35

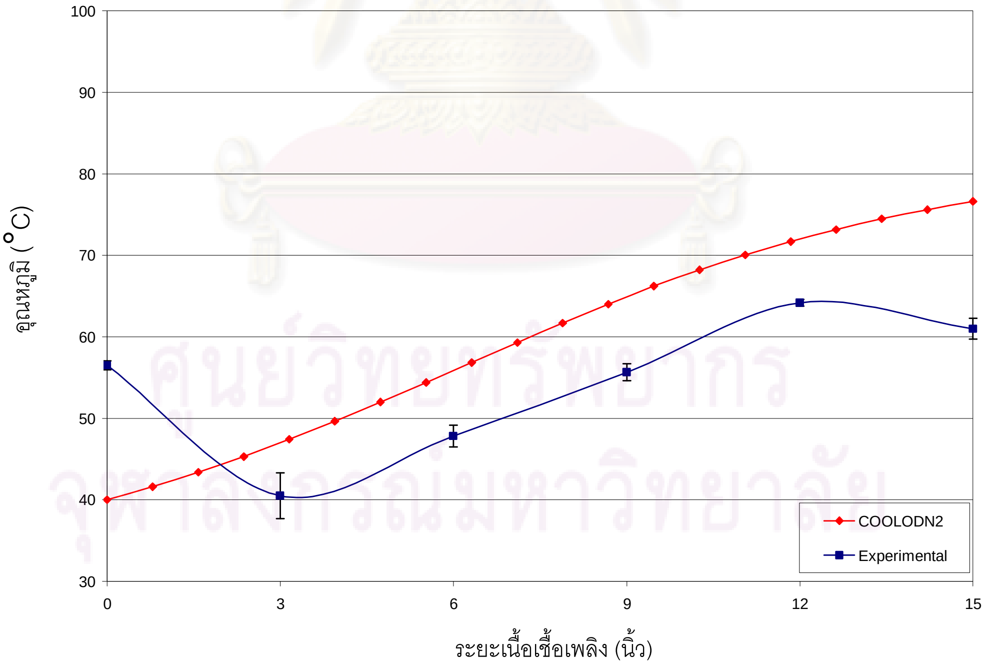


รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 800 kW

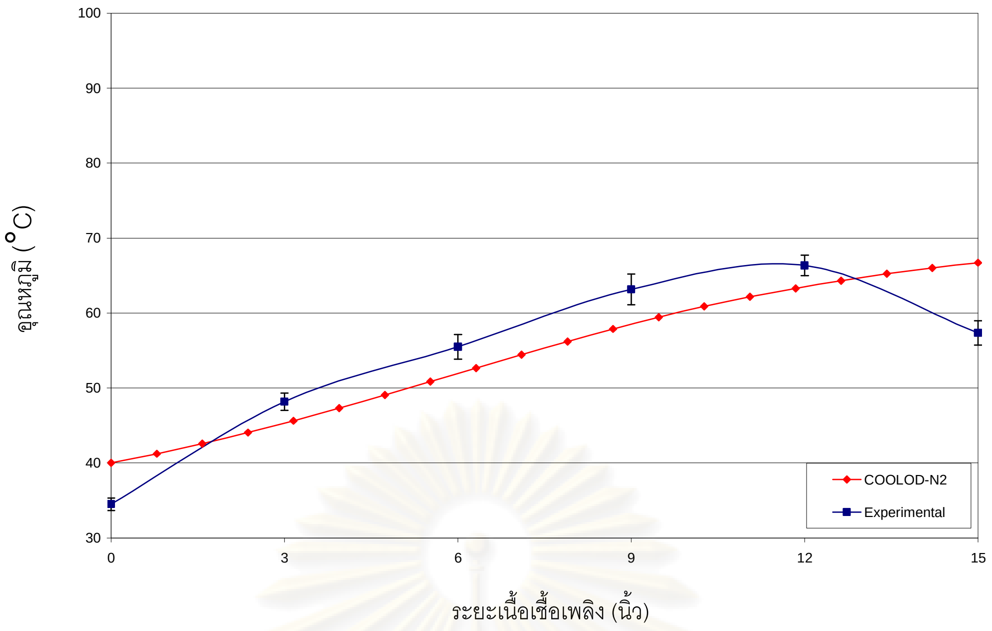
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



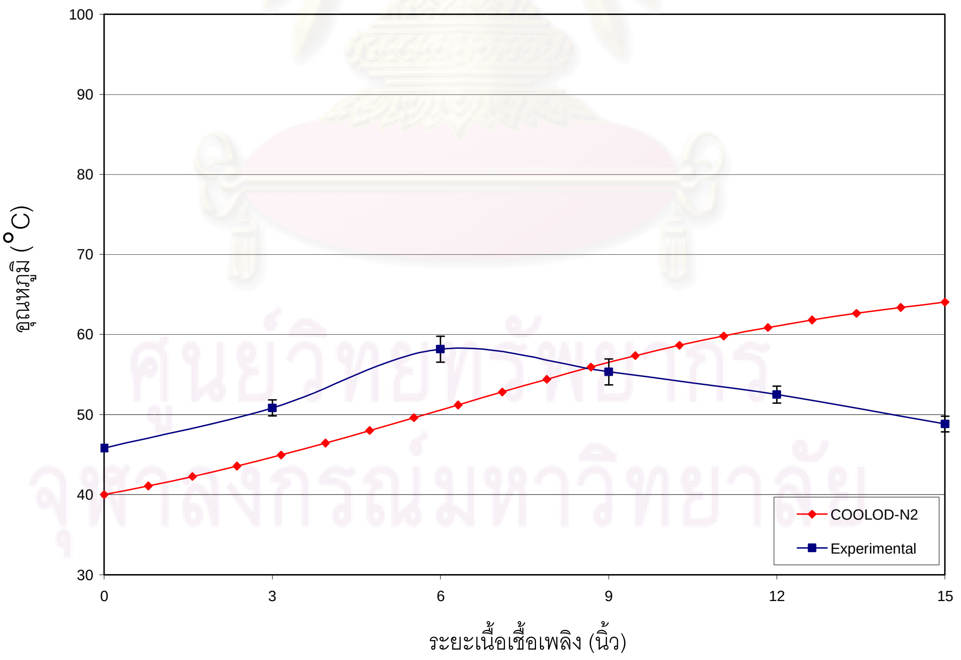
รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 800 kW



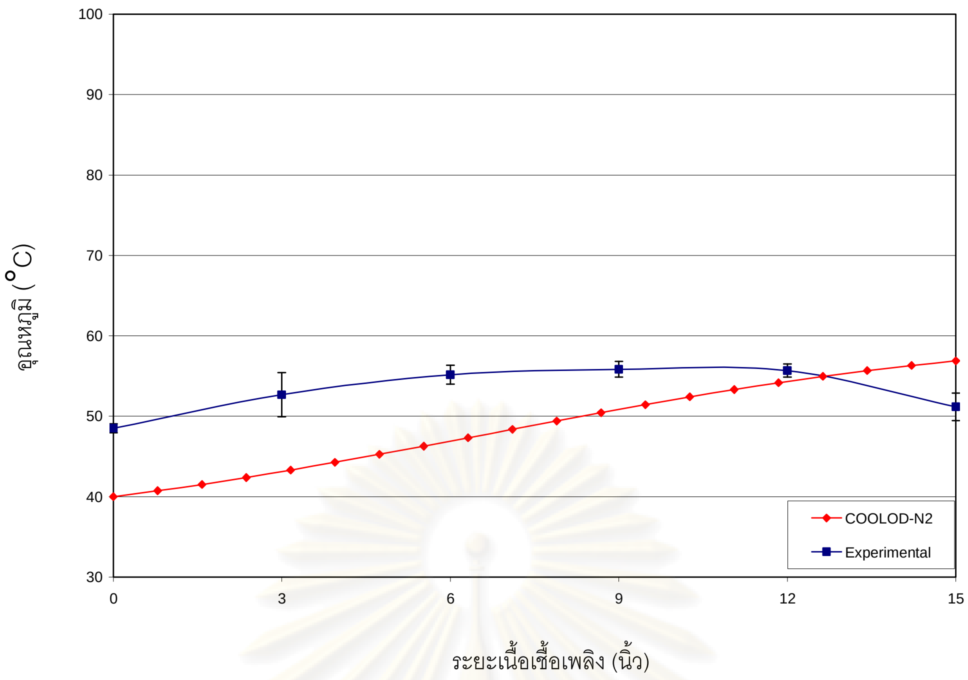
รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 800 kW



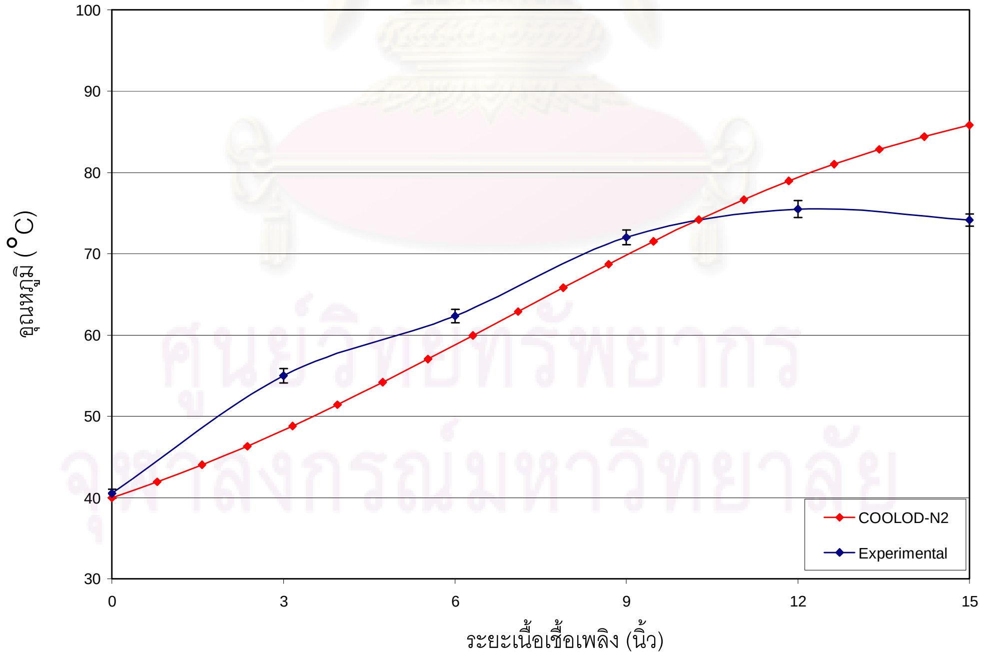
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 800 kW



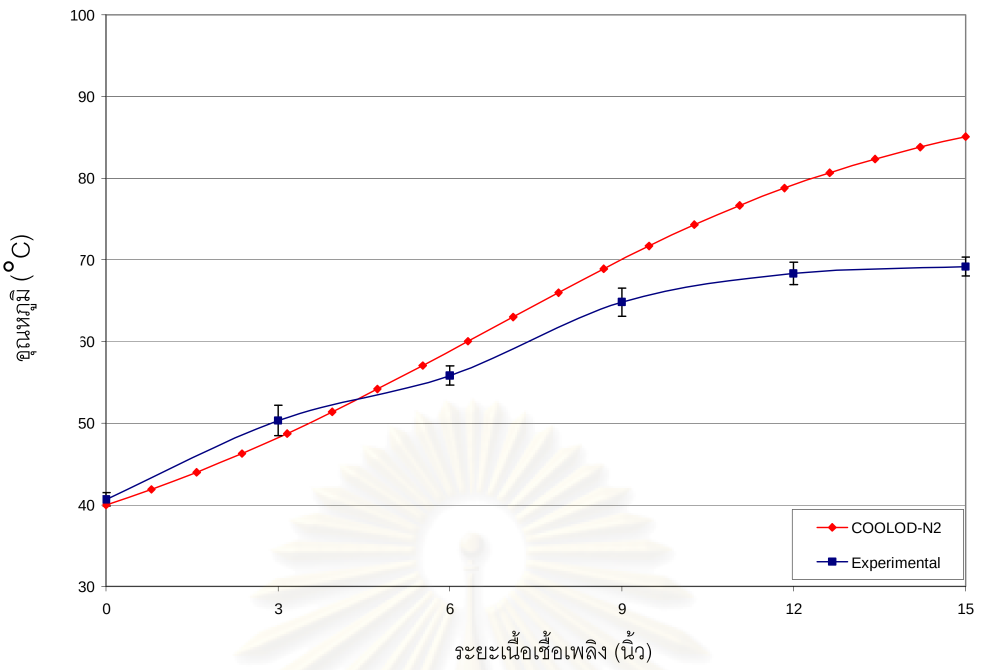
รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 800 kW



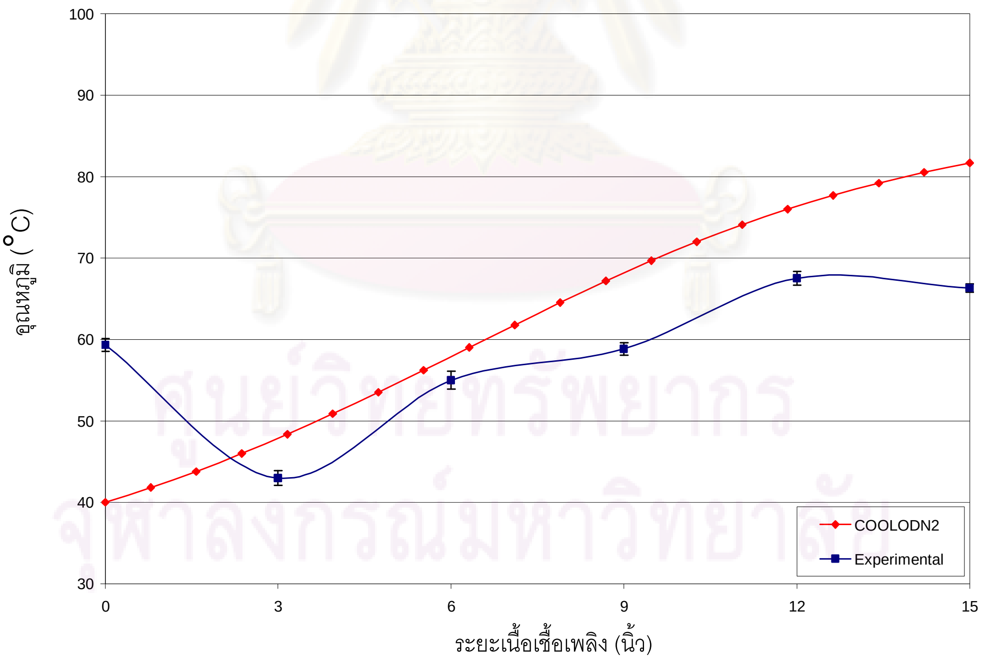
รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 800 kW



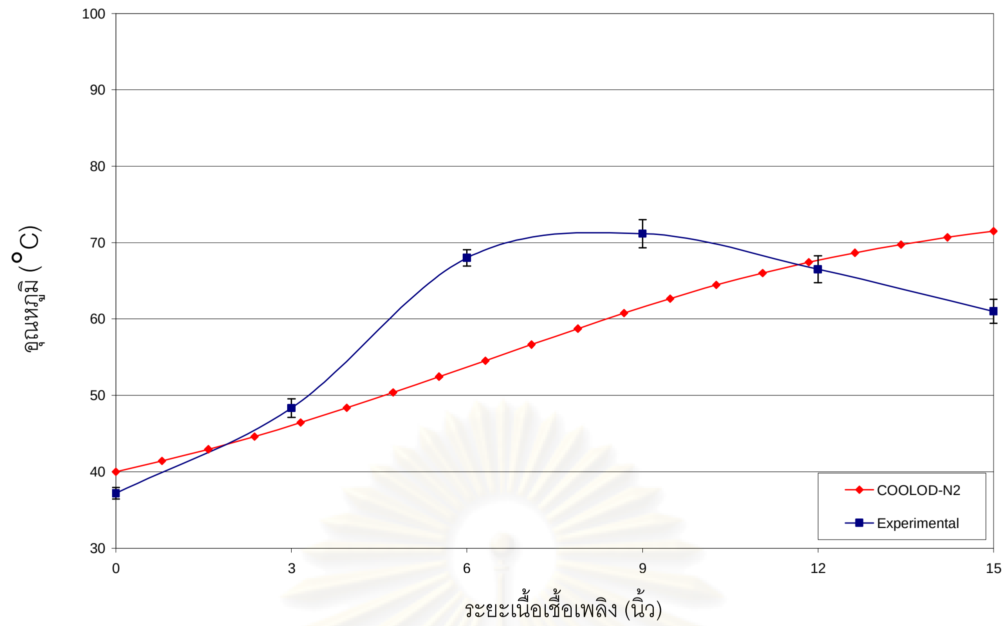
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW



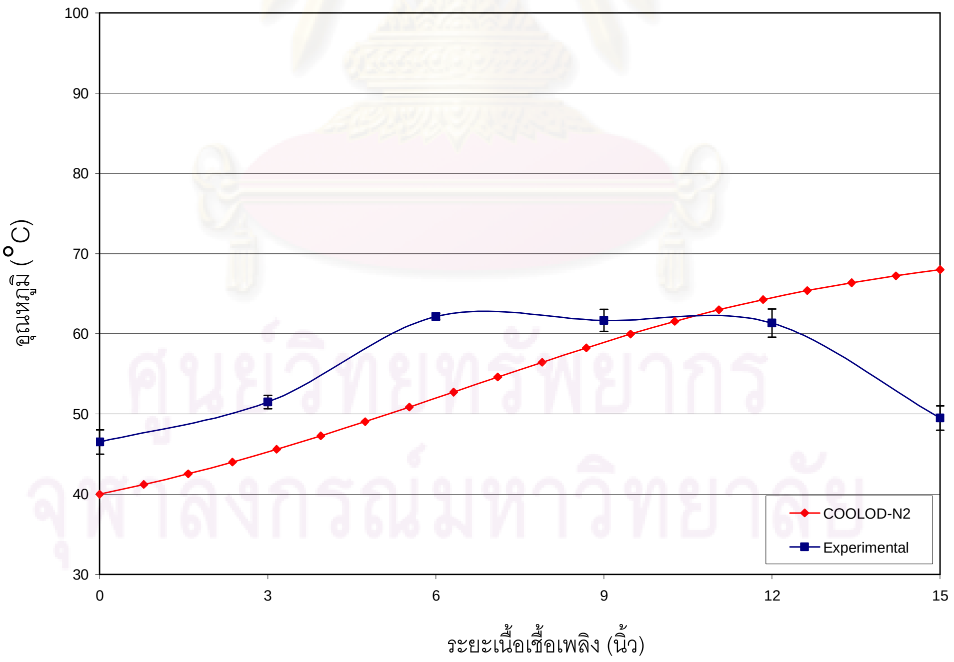
รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW

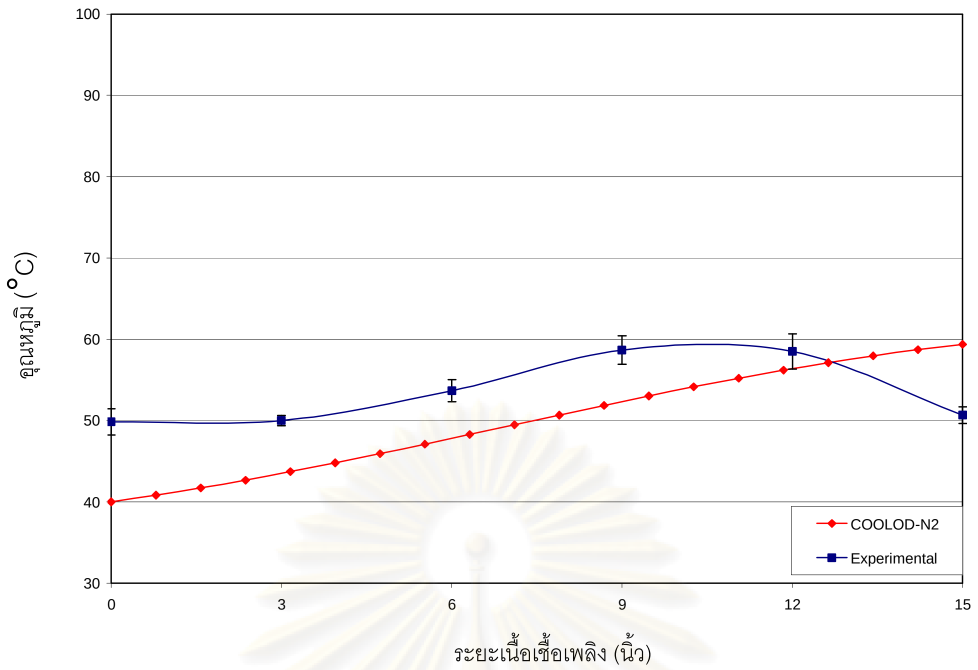


รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW

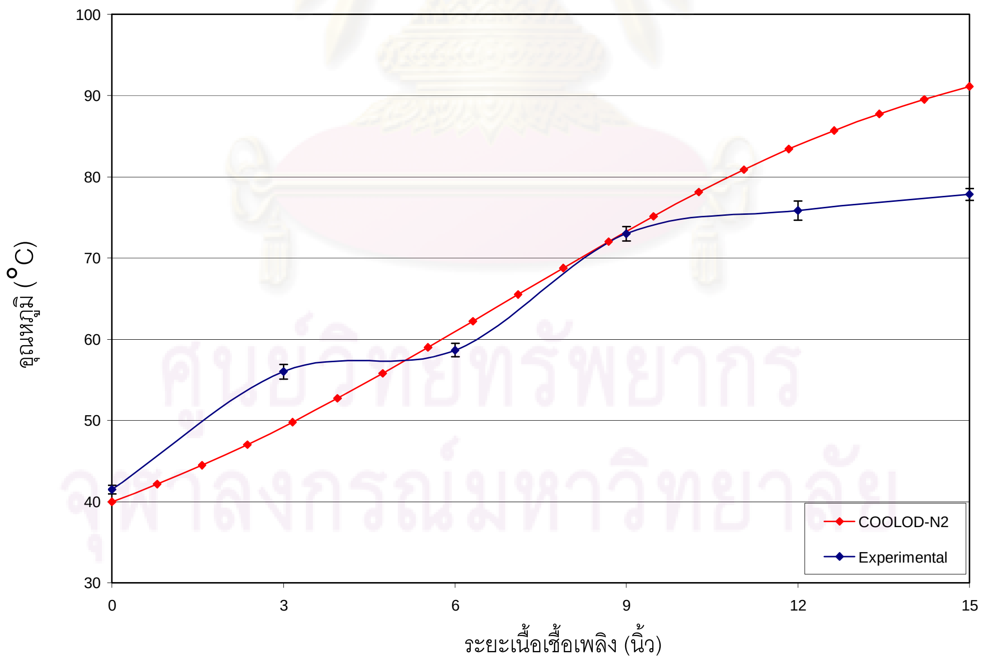


รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW

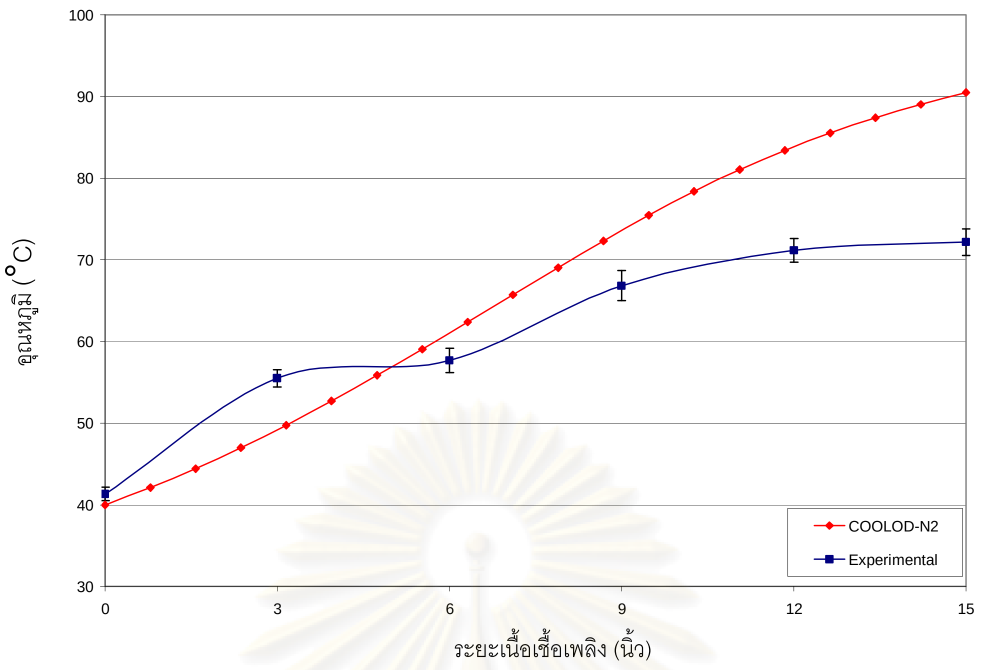
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



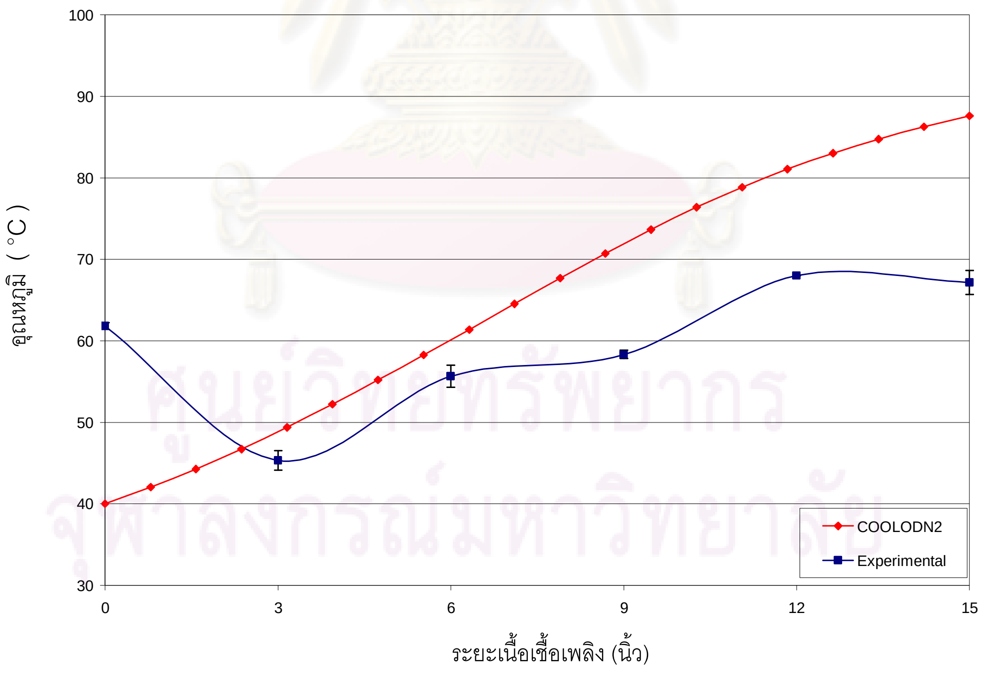
รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,000 kW



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW

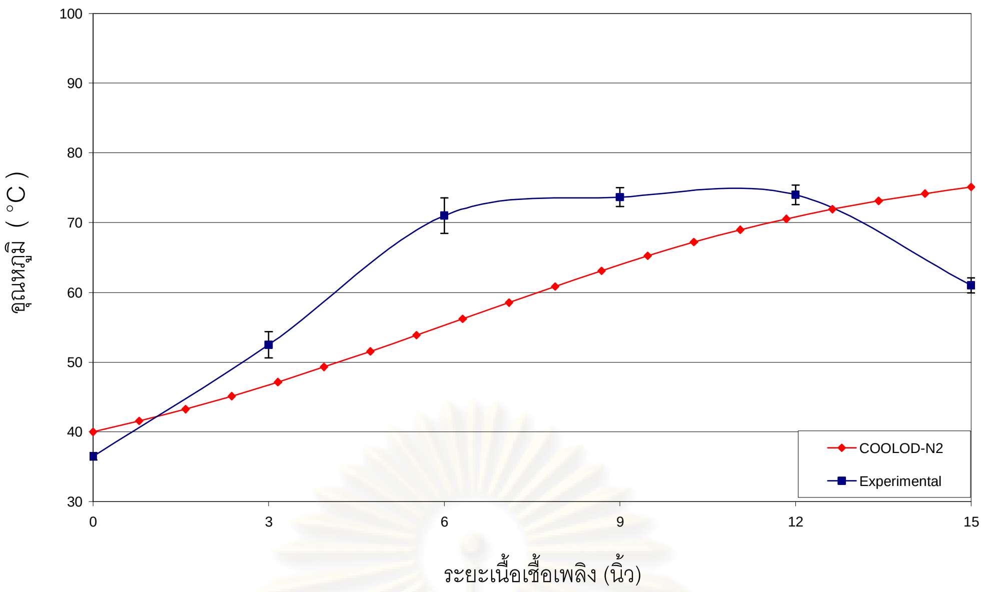


รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW

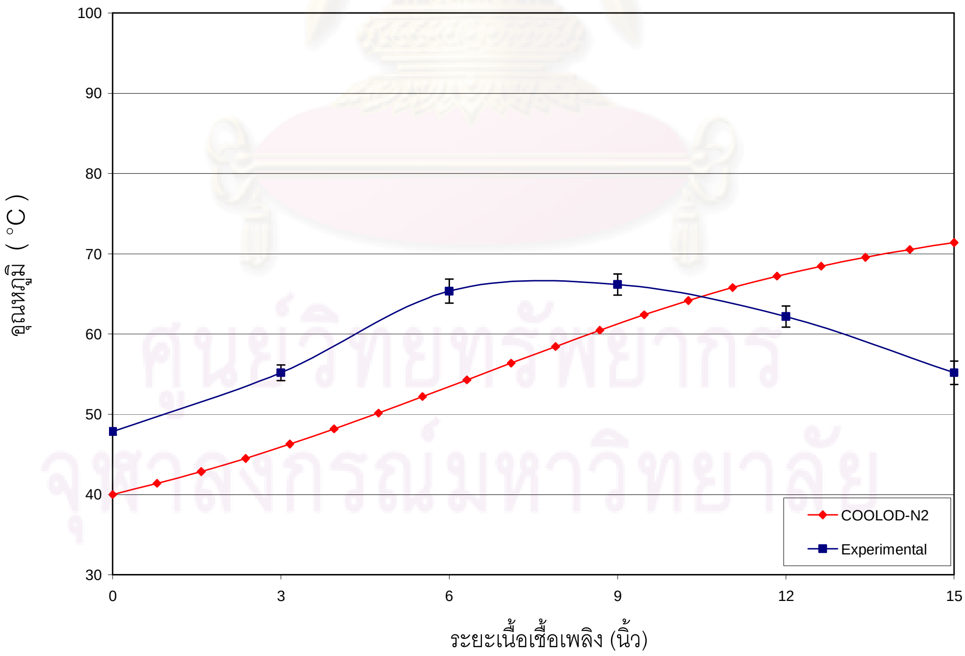


รูปที่ 5.26 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW

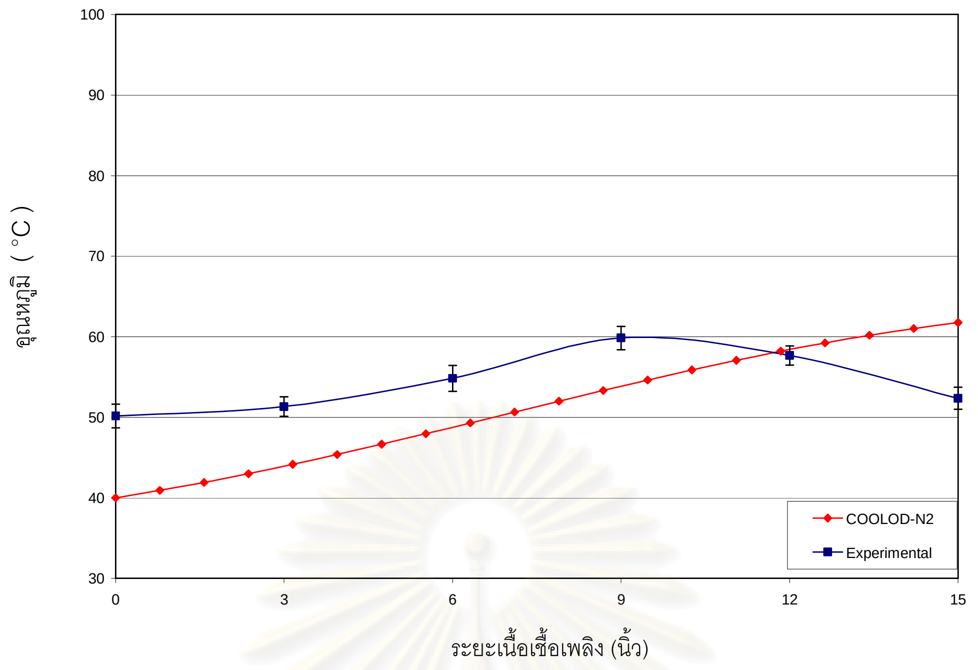
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



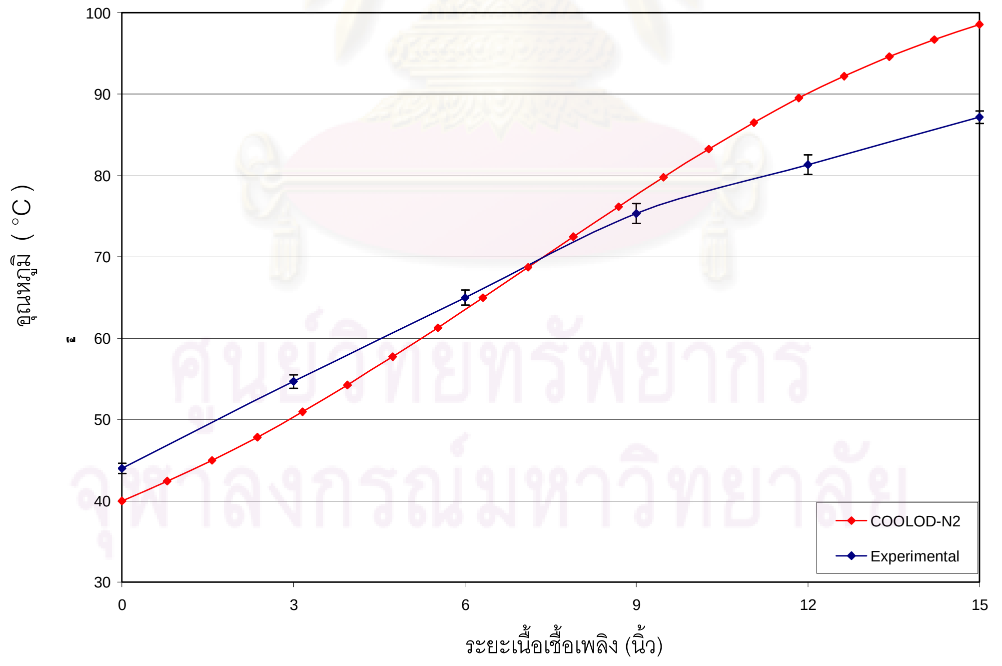
รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW

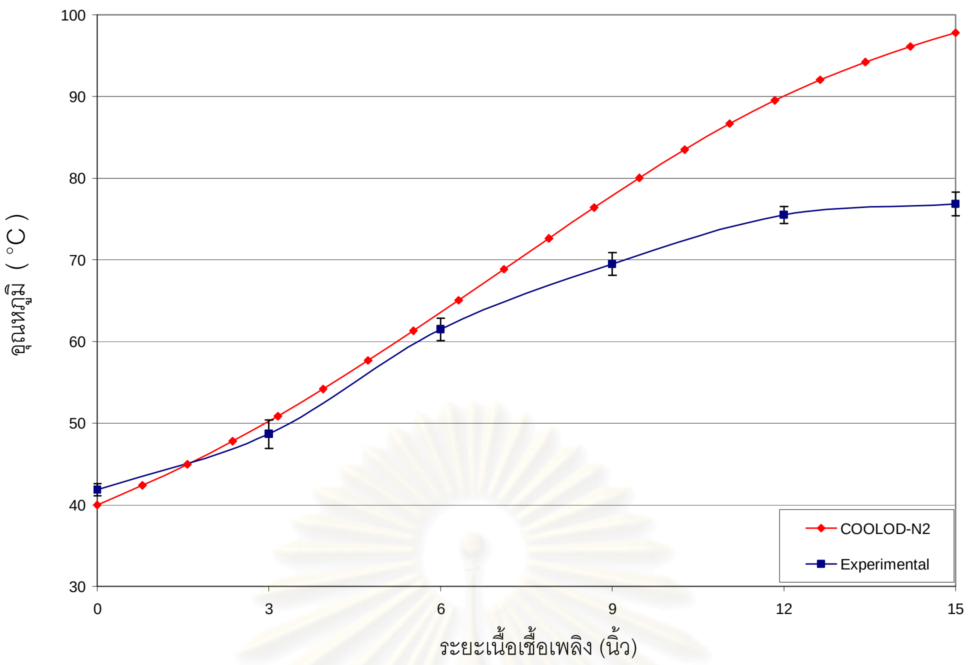


รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW

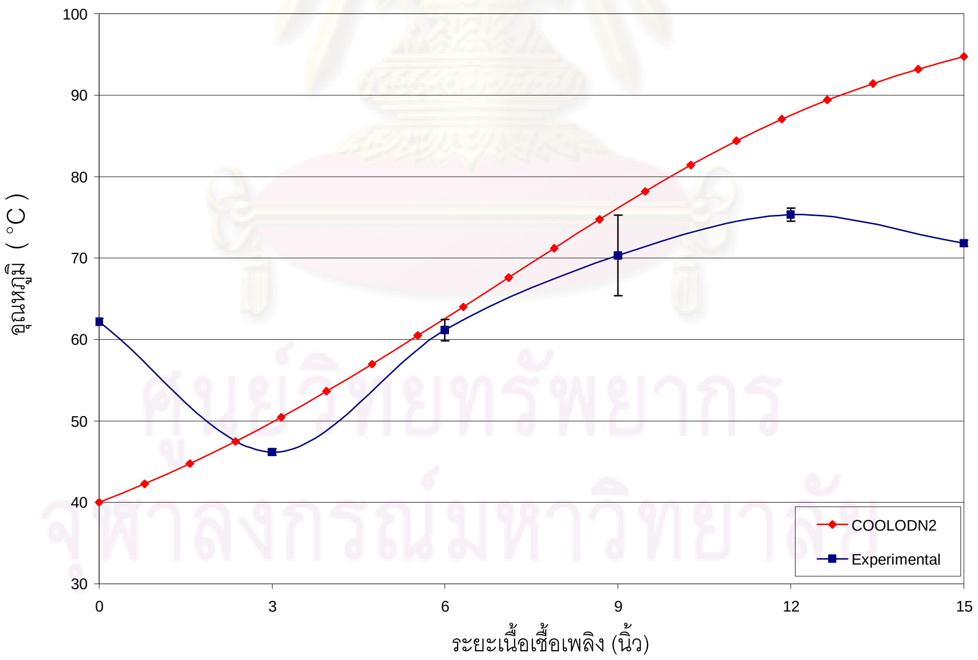


รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW

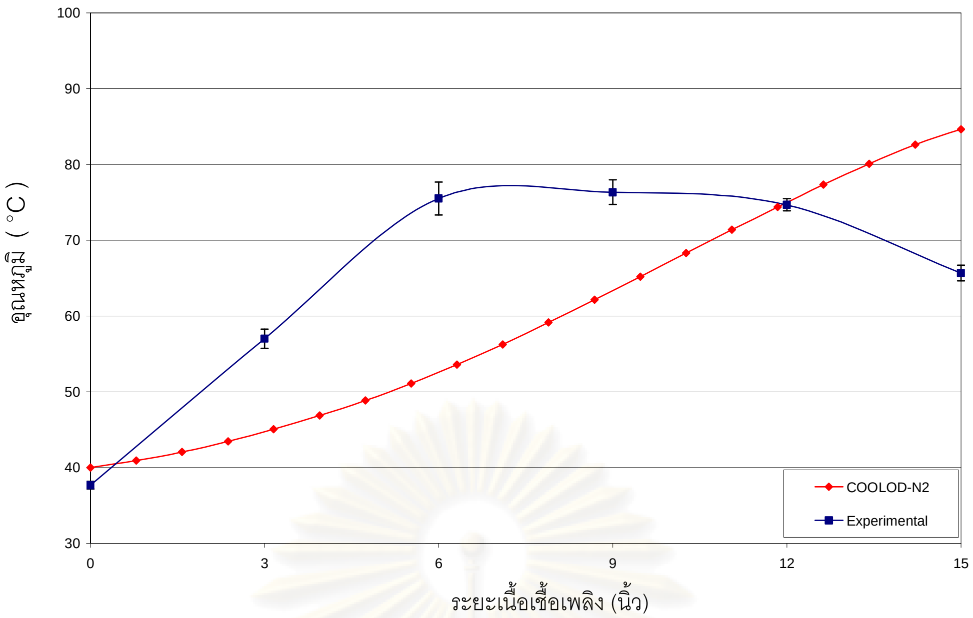
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



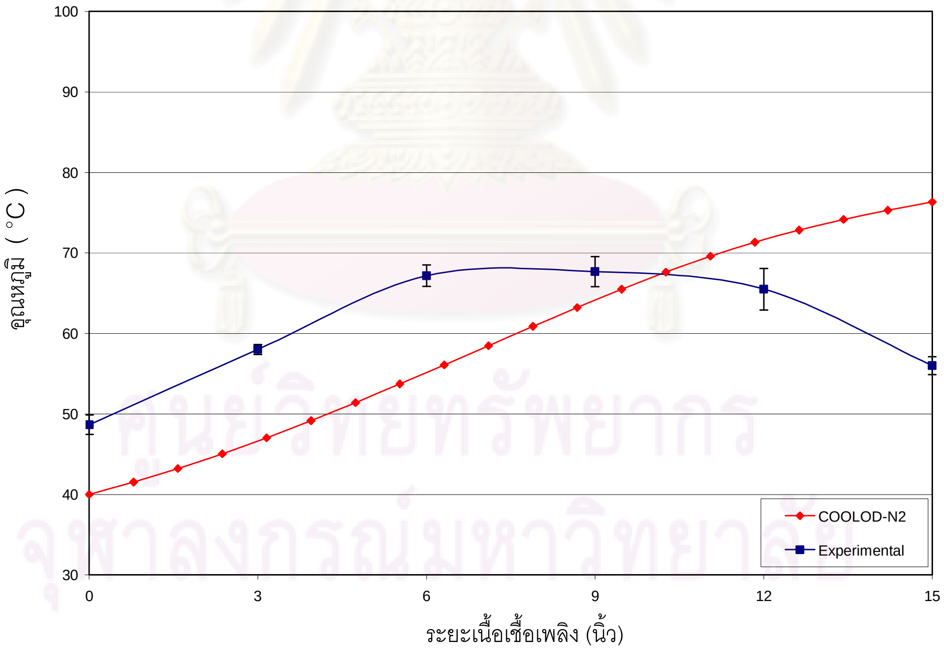
รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW



รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW

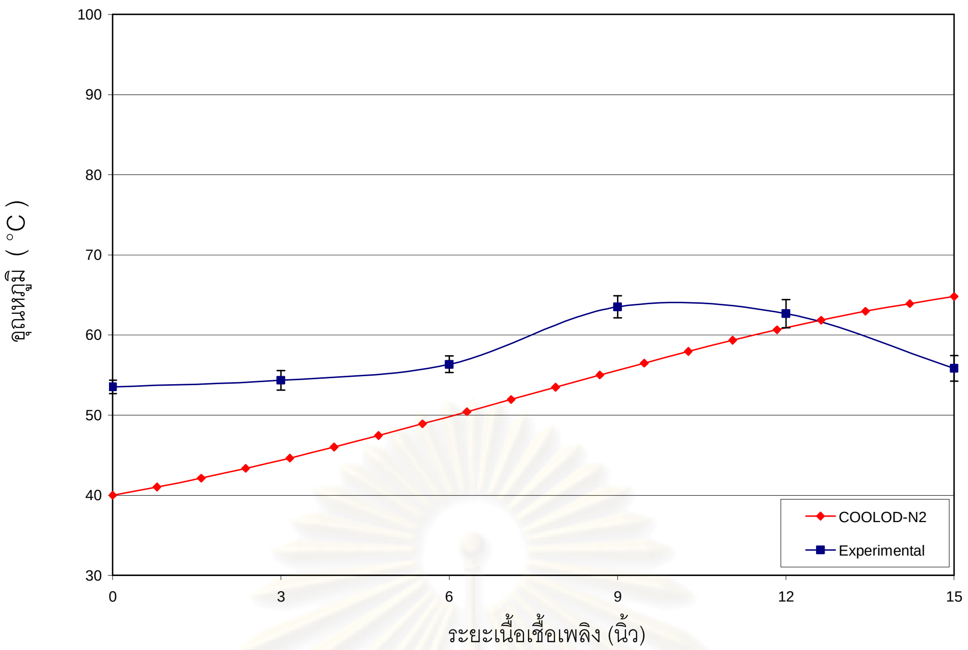


รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW



รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW

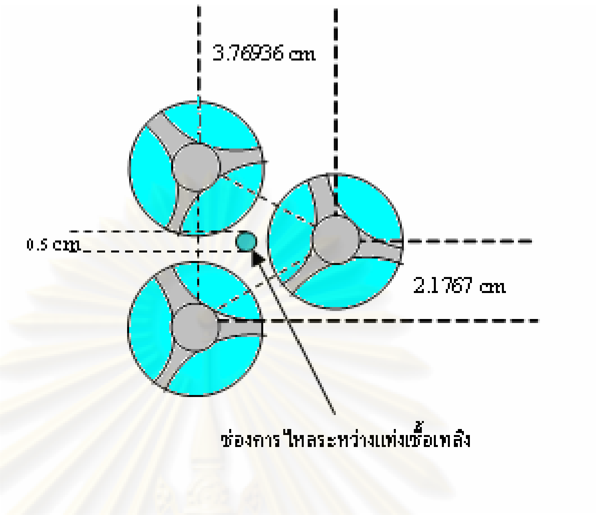
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.35 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6 ที่ระดับกำลัง 1,500 kW

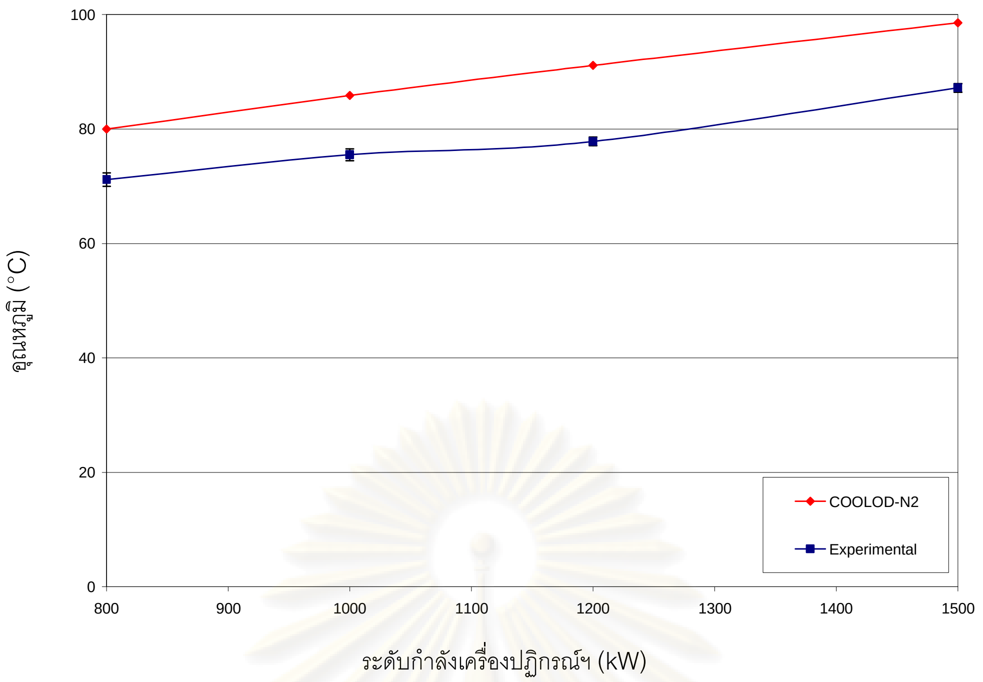
จากรูปที่ 5.12 – 5.35 ผลการคำนวณอุณหภูมิของสารระบายความร้อน โดยการใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2นั้น จะเป็นการคำนวณในลักษณะ1ช่องการไหล และเป็นแบบ1มิติ อุณหภูมิของสารระบายความร้อนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะความสูงของเนื้อเชื้อเพลิง ซึ่งได้ปลดปล่อยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันภายในเนื้อเชื้อเพลิงนั่นเอง และถ่ายเทความร้อนนั้นสู่สารระบายความร้อน สารระบายความร้อนเมื่อได้รับความร้อนก็จะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนและรับความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นตามแนวระยะของเนื้อเชื้อเพลิงที่ถ่ายเทความร้อนออกมา แล้วสารระบายความร้อนดังกล่าวก็จะไหลออกนอกแกนปฏิกรณ์ฯ ตามช่องว่างการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิง ในส่วนของการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนภายในช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นช่องขนาด 5 มม. อยู่กึ่งกลางระหว่างแท่งเชื้อเพลิงที่ล้อมรอบ ดังรูปที่ 5.36 นั้น ผลที่ได้จากการทดลองจะคล้ายกับผลจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในช่วงเริ่มต้นของระยะเนื้อเชื้อเพลิง แต่พอระยะความสูงของเนื้อเชื้อเพลิงมากขึ้น อุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าผลจากการคำนวณ เนื่องจากในสภาวะการไหลของสารระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ฯ จะมีการถ่ายเทความร้อนไปยังบริเวณอื่นๆที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีการรับความร้อนจากบริเวณอื่นที่มีอุณหภูมิสูงกว่า แต่ในการคำนวณจะไม่มีการคิดการสูญเสียความร้อนดังกล่าว ทำให้สารระบายความร้อนมีการสูญเสียความร้อนไปส่วนหนึ่ง อีกประการหนึ่ง จุดที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อน เป็นจุดบริเวณกึ่งกลางระหว่างแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 แท่ง ซึ่งการไหลของสารระบายความร้อนรอบๆแท่งเชื้อเพลิงจะไหลอยู่

บริเวณโดยรอบ และไหลออกทางครีบด้านบนของแต่ละแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องการไหลที่มีการไหลสะดวกกว่าจุดที่ได้ทำการทดลอง จึงทำให้อุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่วัดได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผลจากการคำนวณนั่นเอง

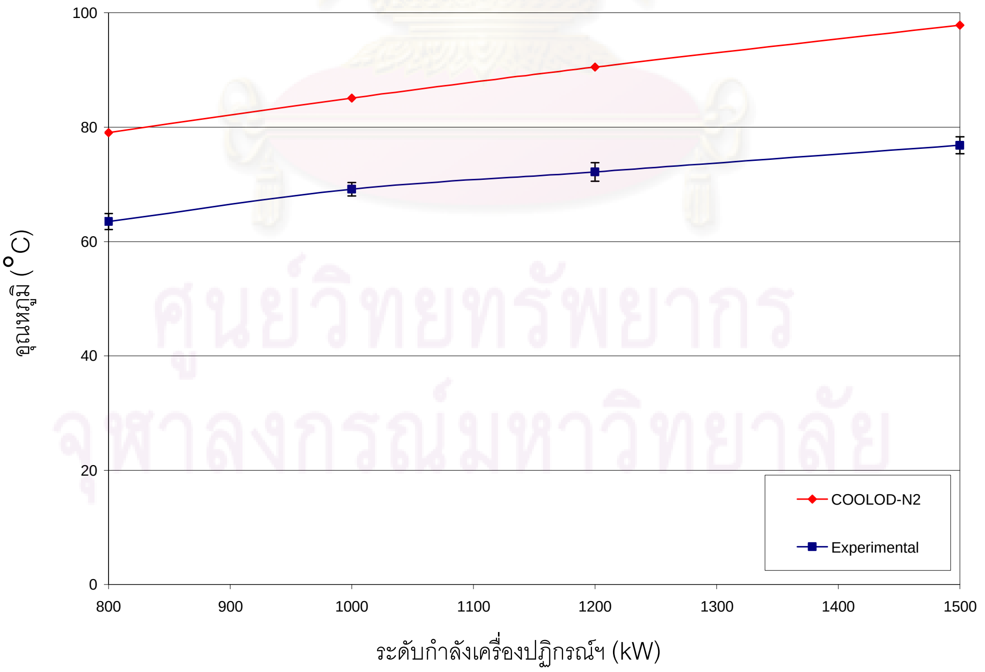


รูปที่ 5.36 ช่องการไหลระหว่างแท่งเชื้อเพลิง

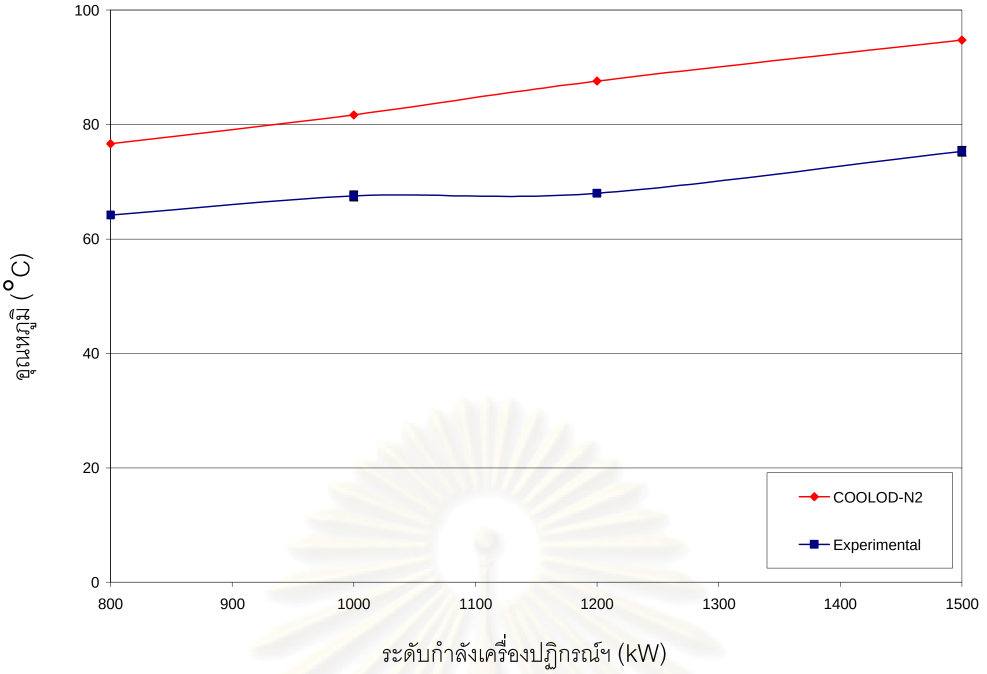
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.12 – 5.35 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1-6 ภายใต้สภาวะการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ที่ระดับกำลังต่างๆกันนั้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณสูงสุดของระยะเชื้อเพลิง (ที่ระยะ 15นิ้ว) อันเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนสะสมตามแนวแกนและแนวทิศทางการไหล ส่วนอุณหภูมิของสารระบายความร้อนที่ได้จากการวัด จะมีค่าสูงสุดในบริเวณก่อนจุดสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงนำค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนซึ่งเป็นค่าที่มีนัยสำคัญสูงสุด มาเปรียบเทียบกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.37 – 5.42



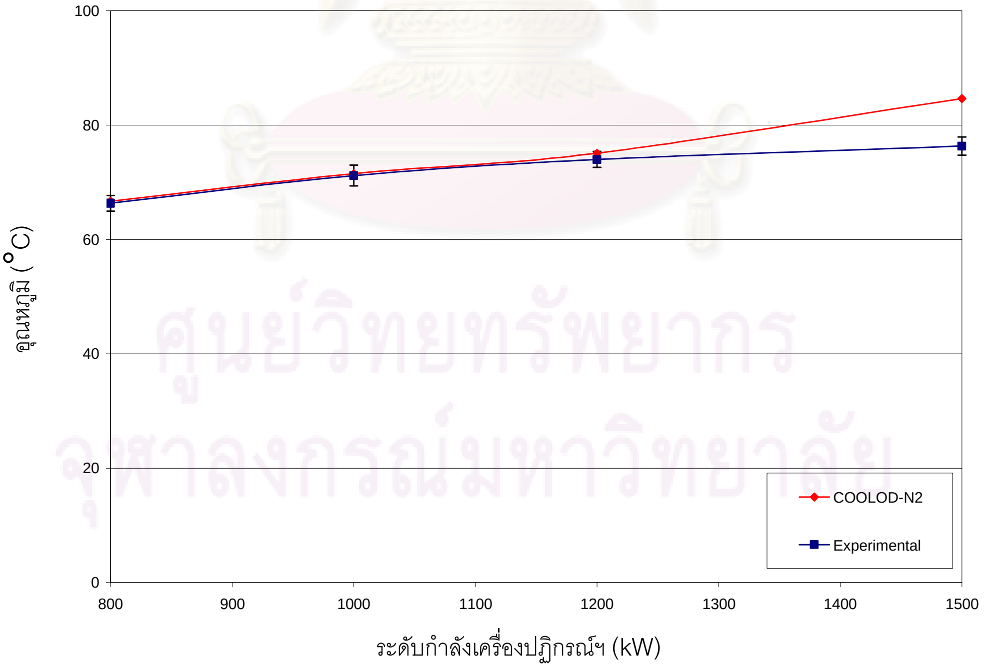
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 2

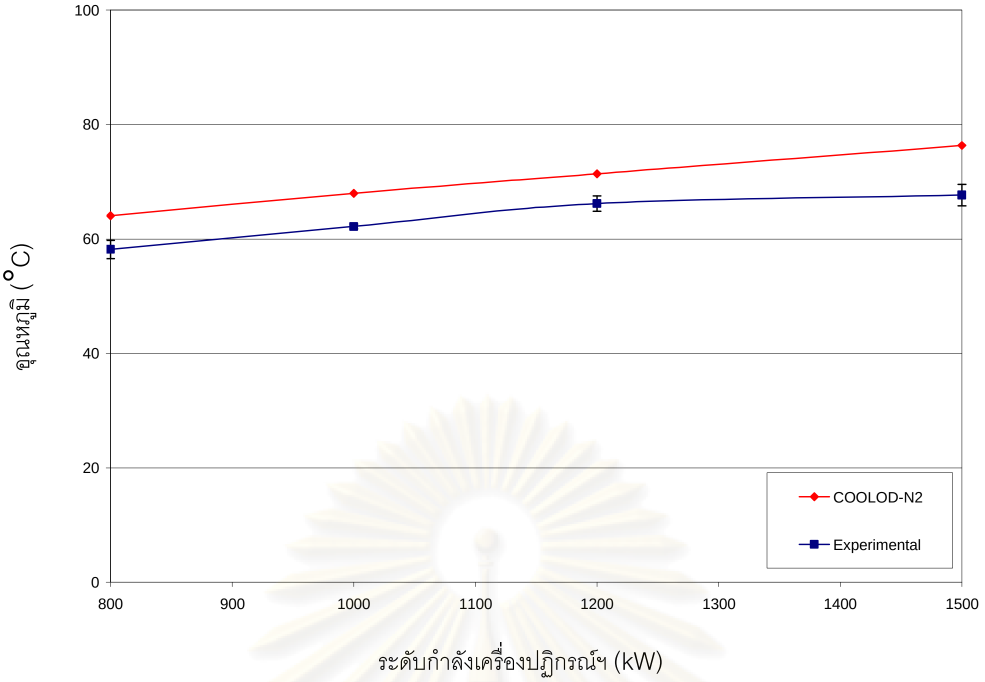


รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 3

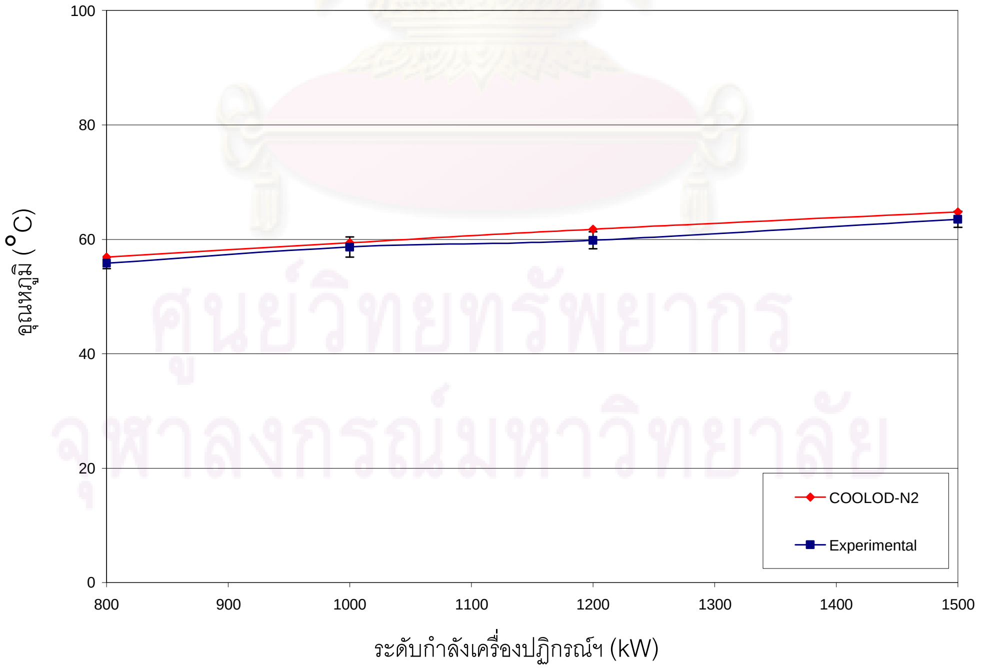


รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.37 - 5.42 ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่งที่1 ถึง 6 ภายใต้สภาวะการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาตินั้น สามารถที่จะสร้างเป็นสมการโพลิโนเมี่ยนกำลังสอง เพื่อแสดงเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ[11] ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการหาค่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อน ไม่ว่าจะเป็นจากการทดลองหรือจากการคำนวณที่ระดับกำลังต่างๆ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (5.5) ถึง (5.16) ดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 (C1-C2-D2)

$F_5(P) = 71.035 + 0.0109P + (1 \times 10^{-5})P^2$: (Experimental) (5.5)

$F_6(P) = 53.244 + 0.0372P - (5 \times 10^{-6})P^2$: (COOLOD-N2) (5.6)

ตำแหน่งที่ 2 (D5-D6-E7)

$F_7(P) = 34.079 + 0.0468P - (1 \times 10^{-5})P^2$: (Experimental) (5.7)

$F_8(P) = 50.277 + 0.0409P - (6 \times 10^{-6})P^2$: (COOLOD-N2) (5.8)

ตำแหน่งที่ 3 (D9-D10-E12)

$F_9(P) = 68.471 + 0.0154P + (1 \times 10^{-5})P^2$: (Experimental) (5.9)

$F_{10}(P) = 52.179 + 0.0327P - (3 \times 10^{-6})P^2$: (COOLOD-N2) (5.10)

ตำแหน่งที่ 4 (D16-E20-E21)

$F_{11}(P) = 34.032 + 0.0545P - (2 \times 10^{-5})P^2$: (Experimental) (5.11)

$F_{12}(P) = 60.119 - 0.0003P - (1 \times 10^{-5})P^2$: (COOLOD-N2) (5.12)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งที่ 5 (E1-F1-F30)

$F_{13}(P) = 24.785 + 0.0562P - (2 \times 10^{-5})P^2$: (Experimental) (5.13)

$F_{14}(P) = 46.03 + 0.0253P - (3 \times 10^{-6})P^2$: (COOLOD-N2) (5.14)

ตำแหน่งที่ 6 (F14-F15-G17)

$F_{15}(P) = 47.296 + 0.0111P - (2 \times 10^{-7})P^2$: (Experimental) (5.15)

$F_{16}(P) = 44.502+ 0.0177P - (3 \times 10^{-6})P^2$: (COOLOD-N2) (5.16)

โดยที่

$F_{5\text{-}16}(P)$ เป็น ค่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อน (°C)

P เป็น กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ (kW)

โดยช่วงเขตของความสัมพันธ์ของสมการที่ (5.5) ถึง (5.16) จะอยู่ในช่วงระดับกำลัง 800 kW ถึงระดับกำลัง 1,500 kW

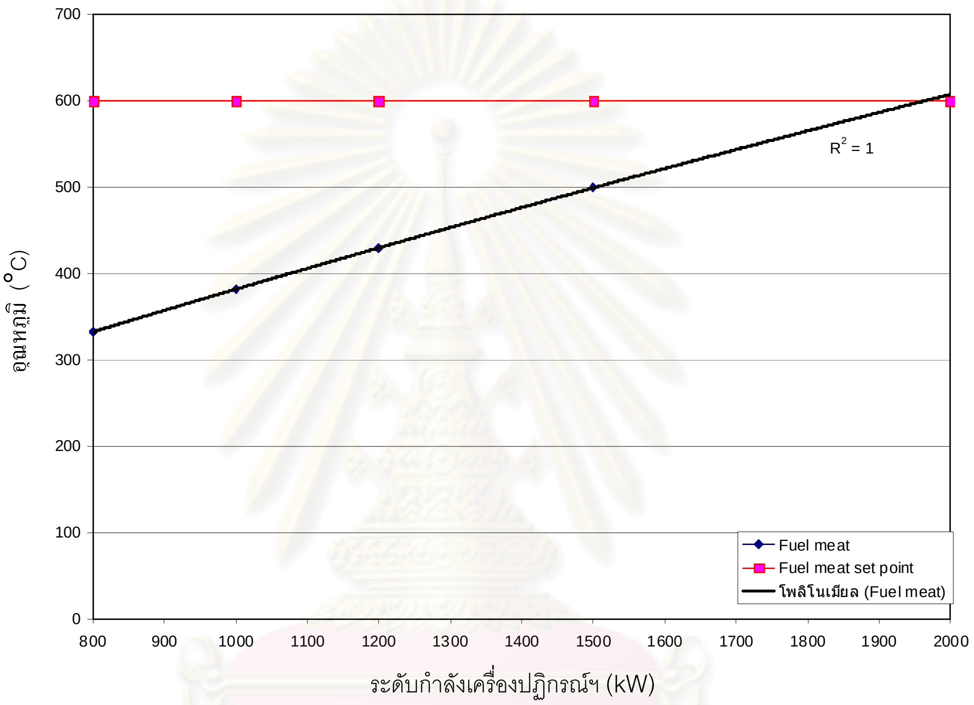
5.3 การวิเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ตามข้อกำหนดด้านวิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

ในการเคราะห์การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ตามข้อกำหนดด้านวิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1จะทำการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของสารระบายความร้อน โดยให้เกณฑ์อ้างอิงทางด้านวิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1[3] ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงจะต้องไม่เกิน 600 °C และสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ต้องไม่เกิดการเดือด

ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของสารระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มาทำการคำนวณ โดยจะคำนวณจากบริเวณที่มีค่าพีคกำลังสูงสุดในแกนปฏิกรณ์ฯ คือที่ตำแหน่ง B6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าพีคกำลังสูงสุดของแกนปฏิกรณ์ฯ หมายเลข 17 (hottest channel) ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งผลของการคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุดในเนื้อเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง B6 ได้แสดงดังรูปที่ 5.9 และจากรูปที่ 5.9 จะ

เห็นได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง B6 นั้น จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 500 °C ในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ระดับกำลัง 1,500 kW

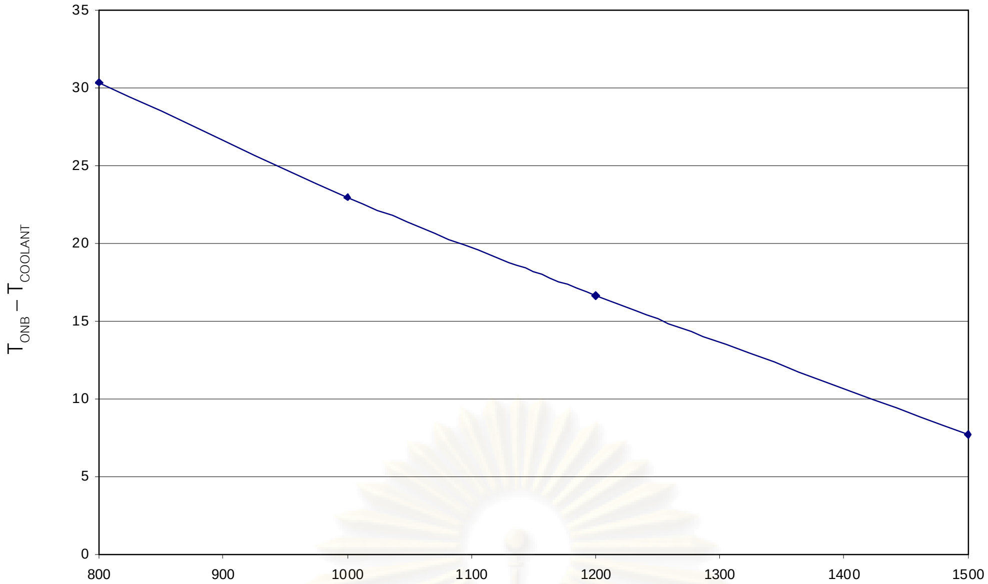
จากรูปที่ 5.9 พิจารณาเพื่อหาระดับกำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงในตำแหน่งดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 600 °C ซึ่งเป็นเกณฑ์วิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 โดยการสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อทำการประเมินหาค่าดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 แสดงการประเมินหาค่ากำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯที่ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงเท่ากับ 600 °C

จากรูปที่ 5.43 ซึ่งแสดงการประเมินหาค่าระดับกำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯที่ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงเท่ากับ 600 °C โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มาคำนวณในตำแหน่ง B6 นั้น ทำให้ทราบว่า ที่ระดับกำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของเนื้อเชื้อเพลิงเท่ากับ 600°C อยู่ที่ระดับกำลัง 1,960 kW

การคำนวณเพื่อประเมินด้านวิศวกรรมความปลอดภัยในส่วนของค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในตำแหน่ง B6 ซึ่งคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.44

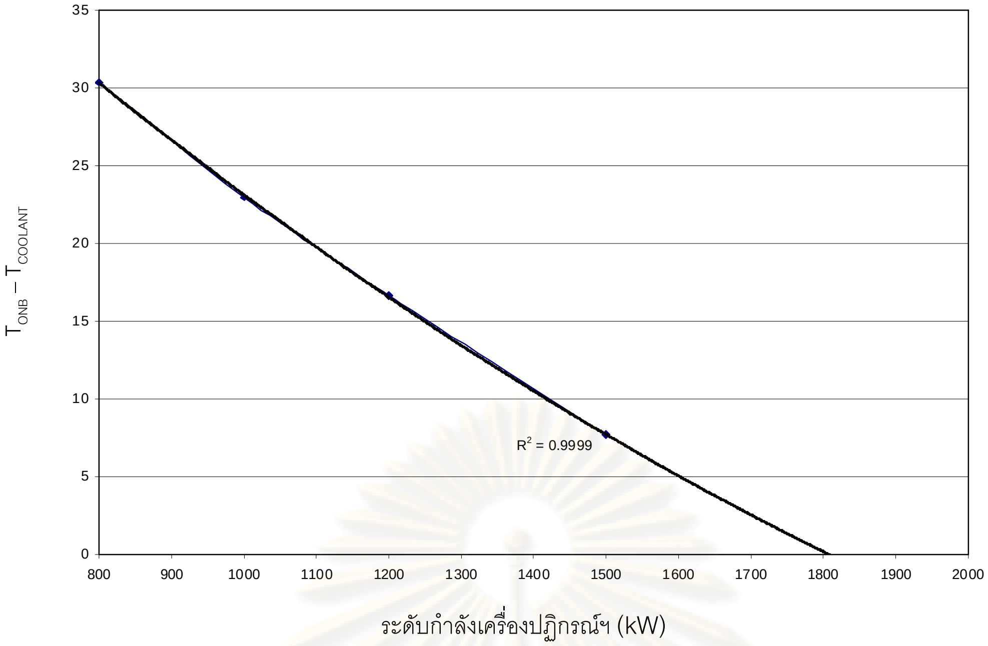


รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิ ONBและอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน ต่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

จากรูปที่ 5.44 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิที่เริ่มทำให้เกิดการเดือดที่ผิวของเปลือกหุ้ม(ONB) และอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน ต่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ในตำแหน่ง B6 นั้น แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับกำลังสูงสุดของการคำนวณ คือที่ 1,500 kW ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่เริ่มทำให้เกิดการเดือดที่ผิวของเปลือกหุ้ม(ONB) และอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน มีค่าเท่ากับ 7.66 °C ซึ่งเกณฑ์วิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ได้กำหนดไว้ว่า จะไม่เกิดการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งก็หมายความว่าค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่เริ่มทำให้เกิดการเดือดที่ผิวของเปลือกหุ้ม(ONB) กับอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนจะต้องมีค่ามากกว่า 0 °C

จากเกณฑ์วิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ที่ได้กำหนดไว้ไม่ให้เกิดการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ จึงได้ทำการประเมินการเกิดการเดือดของสารระบายความร้อนในตำแหน่ง B6 โดยการสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อทำการประเมินหาค่าดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.45

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.45 แสดงการประเมินเพื่อหาการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ

จากรูปที่ 5.45 ซึ่งแสดงการประเมินเพื่อหาการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ (T_{ONB} – $T_{COOLANT}$ = 0 °C) ซึ่งจะเห็นว่าสารระบายความร้อนในตำแหน่งการคำนวณดังกล่าวจะเริ่มเกิดการเดือดบริเวณผิวของเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ 1,800 kW

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 การกระจายอุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

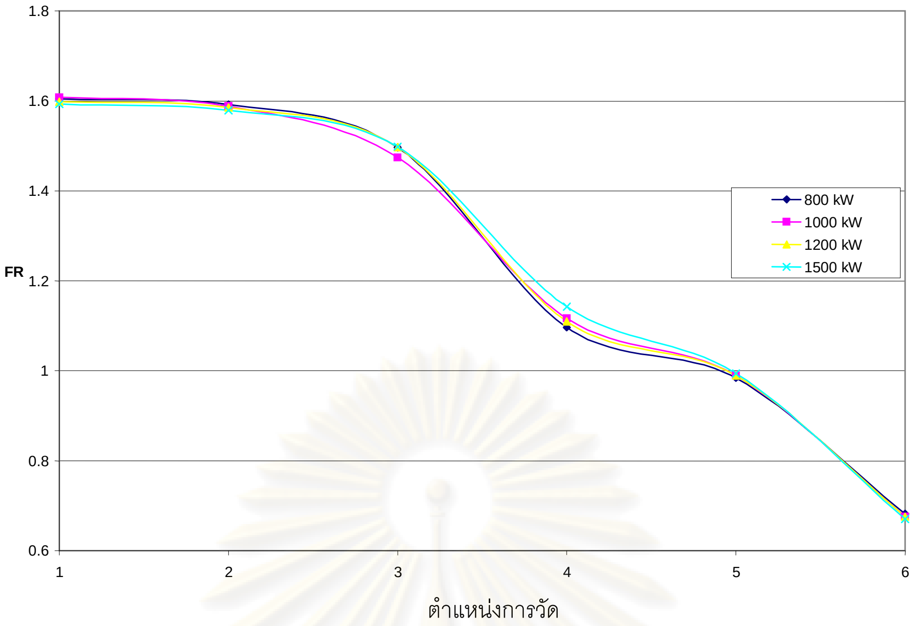
6.1.1.1 การกระจายอุณหภูมิในแนวแกน (axial temperature distribution)

ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแนวแกนปฏิกรณ์ฯ มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามแนวระดับความสูงของเนื้อเชื้อเพลิง โดยเมื่อสารระบายความร้อนไหลเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ฯ เข้าสู่บริเวณของเนื้อเชื้อเพลิง สารระบายความร้อนก็จะรับความร้อนที่เกิดขึ้นจากเนื้อเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาฟิชชัน และความร้อนจากเนื้อเชื้อเพลิงนั้น จะถูกถ่ายเทออกมาผ่านเนื้อเชื้อเพลิง ผ่านช่องว่าง และผ่านเปลือกหุ้มเชื้อเพลิง ก่อนจะถ่ายเทสู่สารระบายความร้อน ทำให้สารระบายความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้สารระบายความร้อนนั้นมีค่าความหนาแน่นลดลง จึงทำให้สารระบายความร้อนลอยตัวขึ้น อันเป็นผลจากค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของสาระบายความร้อน เมื่อสารระบายความร้อนลอยตัวสูงขึ้น ก็จะรับความร้อนที่ถ่ายเทออกมาจากเชื้อเพลิงมากขึ้นตามระยะของเนื้อเชื้อเพลิง จึงทำให้สารระบายความร้อนมีอุณหภูมิสะสมสูงขึ้นตามทิศทางการลอยตัว ซึ่งอุณหภูมิของสารระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณส่วนบนของเนื้อเชื้อเพลิง

6.1.1.2 การกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบ (radial temperature distribution)

อุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ในแต่ละตำแหน่งของการจัดเรียงเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 มีลักษณะการจัดเรียงเชื้อเพลิงในแบบหกเหลี่ยม โดยหากจะแบ่งตามวงรอบการจัดเรียง ก็จะสามารถแบ่งได้เป็นหกวงรอบคือ วงรอบ B เป็นวงรอบด้านในสุดของแกนปฏิกรณ์ฯ ถัดออกมาคือวงรอบ C D E F และ G ซึ่งเป็นวงรอบนอกสุดของแกนปฏิกรณ์ฯ

หากจะพิจารณาการกระจายความร้อนในแนวระนาบ สามารถที่จะพิจารณาได้จากค่าพีคกำลังในแนวระนาบ (radial power peaking : F_R) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังสูงสุดในแท่งเชื้อเพลิงในแนวระนาบต่อค่ากำลังเฉลี่ยทั้งแกนปฏิกรณ์ฯ ซึ่งค่าพีคกำลังในแนวระนาบของแกนปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1

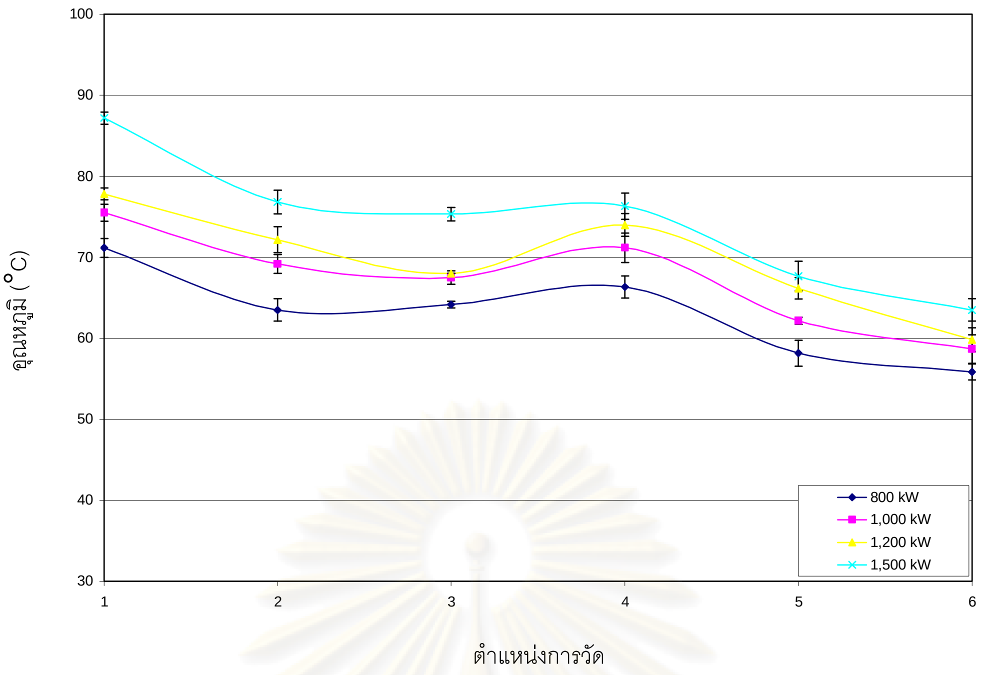


รูปที่ 6.1 แสดงค่าพีคกำลังในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัดต่างๆ

จากรูปที่ 6.1 ซึ่งแสดงค่าพีคกำลังในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัดที่ 1 ถึง 6 ซึ่งได้มาจากการคำนวณเชิงนิวตรอนด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ SRAC จะเห็นได้ว่าการกระจายกำลังในแนวระนาบที่วงรอบในสุดของการทดลองวัดในแกนปฏิกรณ์ฯ (ตำแหน่งการวัดที่ 1) มีค่าระดับพีคกำลังสูงกว่าวงรอบถัดออกไป แต่หากจะพิจารณาในลักษณะของการกระจายความร้อนในแนวระนาบของแกนปฏิกรณ์ฯแล้ว ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการกระจายกำลังในแนวระนาบ เพราะว่าค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามระดับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

ในส่วนของผลการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.2 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัดต่างๆ

จากรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในแนวระนาบที่ตำแหน่งการวัด 1 ถึง 6 จะเห็นได้ว่าหากมองในแนวรัศมีตามวงรอบของการจัดวางเชื้อเพลิงแล้ว ทำให้ทราบได้ว่า วงรอบด้านในของการทดลองวัดในแกนปฏิกรณ์ฯ จะให้ค่าอุณหภูมิของสาระบายความร้อนที่สูงกว่าวงรอบด้านนอก ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการพิจารณาค่าการกระจายกำลังที่ได้กล่าวไปตอนต้น

6.1.2 การระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

จากการทดลองแม้ว่าจะยังไม่มีการติดเครื่องปฏิกรณ์ฯ แต่อุณหภูมิของสารระบายความร้อนภายในช่องการไหลที่วัดได้มีค่าเริ่มต้นประมาณ 40 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อนโดยรวมของบ่อ (bulk water temperature) ซึ่งปกติจะมีค่าอุณหภูมิประมาณ 35 °C (ที่ระดับกำลัง 1,200 kW) ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากภายในแกนปฏิกรณ์ฯ มีพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสลายตัวของฟิชชันโปรดักส์ที่เกิดขึ้นหลังจากการดับเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยพลังงานที่ปลดปล่อยจากฟิชชันโปรดักส์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปรังสีเบตาและรังสีแกมมา ซึ่งเมื่อรังสีดังกล่าวชนกับเปลือกหุ้มเชื้อเพลิง(cladding) ก็จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด

เมื่อทำการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ อุณหภูมิของสารระบายความร้อนช่วงก่อนจะเข้าบริเวณเนื้อเชื้อเพลิงจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะบริเวณดังกล่าวไม่มีการผลิตความร้อน จึงเป็นบริเวณที่การไหลของสารระบายความร้อนจะไม่ได้รับความร้อน

สารระบายความร้อนจะเริ่มได้รับความร้อนที่ถ่ายเทออกมาจากเนื้อเชื้อเพลิงเมื่อเริ่มเข้าสู่บริเวณเนื้อเชื้อเพลิง เมื่อสารระบายความร้อนดังกล่าวได้รับความร้อน จะทำให้มีค่าความหนาแน่นลดลง ทำให้ลอยตัวสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของสารระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิต่างกัน ขณะที่สารระบายความร้อนลอยตัวสูงขึ้นตามแนวแกนปฏิกรณ์ฯ ก็จะรับความร้อนที่ถ่ายเทออกมาจากเนื้อเชื้อเพลิงตามระยะทางการไหลที่ไหลผ่านบริเวณเนื้อเชื้อเพลิง สารระบายความร้อนก็จะได้รับความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นตลอดระยะทางการไหล ก่อนที่จะไหลออกสู่ด้านบนของแกนปฏิกรณ์ฯ และไปผ่านกระบวนการระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ต่อไป ซึ่งกระบวนการระบายความร้อนดังกล่าวที่เกิดขึ้น ในแกนปฏิกรณ์ฯ จึงมีลักษณะเป็นการระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ

จากผลของการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ทำให้ทราบค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนต่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบได้ว่า ที่ระดับกำลัง 1,500 kW จะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนเท่ากับ 87.2 °C ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1 แต่ทั้งนี้การทดลองดังกล่าว ไม่สามารถที่จะทำการทดลองวัดค่าอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในบริเวณที่ร้อนที่สุดในแกนปฏิกรณ์ฯได้ (บริเวณที่มีค่าพีคกำลังสูงสุด : B6) เพราะข้อจำกัดทางโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1

ในส่วนของการประเมินหาระดับกำลังสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่สามารถเดินเครื่องฯได้ โดยไม่ก่อให้เกิดการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ณ ตำแหน่งที่มีค่าพีคกำลังสูงสุด ทำให้ทราบว่า จะเริ่มเกิดการเดือดของสารระบายความร้อน ณ บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกหุ้มเชื้อเพลิง ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ 1,800 kW และจากข้อกำหนดด้านวิศวกรรมความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ที่จะไม่ให้เกิดการเดือดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 จึงบ่งชี้ว่า เครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 สามารถเดินเครื่องฯ ที่ระดับกำลังสูงสุดเท่ากับ 1,800 kW

แต่ทั้งนี้ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 นั้น จะให้ค่าการประเมินที่สูงกว่าค่าใช้งานจริง

6.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

การคำนวณอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของสารระบายความร้อน ในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 ที่ระดับกำลัง 800 kW ถึง 1,500 kW และนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1.3.1 อุณหภูมิของสารระบายความร้อนมีแนวโน้มของลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและการระบายความร้อนที่คล้ายกันสำหรับทุกระดับกำลังและทุกตำแหน่งในแกนปฏิกรณ์ฯ (ยกเว้นบริเวณใกล้แท่งควบคุมชนิดที่มีเนื้อเชื้อเพลิงอยู่ส่วนล่าง ซึ่งจะมีผลของความร้อนที่เกิดจากเนื้อเชื้อเพลิงที่อยู่ส่วนล่างของแท่งควบคุมด้วย)

6.1.3.2 บริเวณใกล้ช่องทางออกของสารระบายความร้อน อุณหภูมิของสารระบายความร้อนค่อนข้างจะคงที่

6.1.3.3 การคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 จะให้ผลการประเมินที่มีค่าสูงกว่าค่าใช้งานจริง (overestimate) ทั้งค่าอุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของสารระบายความร้อน

6.1.3.4 การคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 มีลักษณะการคำนวณเป็นแบบอนุรักษ์นิยม (conservative) กล่าวคือจะให้ค่าการประเมินที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้งานจริง

6.1.3.5 รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถที่จะใช้เพื่อการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ได้ ซึ่งก็หมายความว่า การที่ค่าจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 ทำงานอยู่ภายใต้สภาวะความปลอดภัยแล้ว การปฏิบัติงานจริงก็ย่อมมีความปลอดภัยอย่างแน่นอน

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลอง

6.2.1.1 ในการทดลองเพื่อที่ทำให้ทราบถึงการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี ที่ชัดเจนมากขึ้น ควรจะทำการทดลองวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในแนวรัศมีเดียวกันทุกวงรอบ

6.2.1.2 หากทำการวัดอุณหภูมิของสารระบายความร้อนในทุกตำแหน่ง ทั่วทั้งแกนปฏิกรณ์ฯ จะทำให้ทราบลักษณะการกระจายความร้อนทั้งหมดในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่มีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ และสามารถนำผลดังกล่าวที่ได้ ไปยืนยันการคำนวณหาค่าพีคกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้มาจากการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ SRAC ต่อไป

6.2.1.3 ควรปรับระยะของการวัดแต่ละระดับให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อจะทำให้ทราบจุดที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนที่แน่นอน

6.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการคำนวณโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์

6.2.2.1 ควรจะนำรหัสคอมพิวเตอร์ชนิดอื่น มาทำการเปรียบเทียบกับการใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 อาทิเช่น รหัสคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณการไหลในลักษณะที่มากกว่า 1 มิติ หรือ รหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ช่องการไหลย่อย (sub channel analysis) เป็นต้น

6.2.3 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบระบายความร้อนออกจากแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1

6.2.3.1 จากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนัง[7] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6.1)

$$q'' = h_s (T_s - T_{fl}) \qquad (6.1)$$

เมื่อ q'' เท่ากับ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังของแท่งเชื้อเพลิง

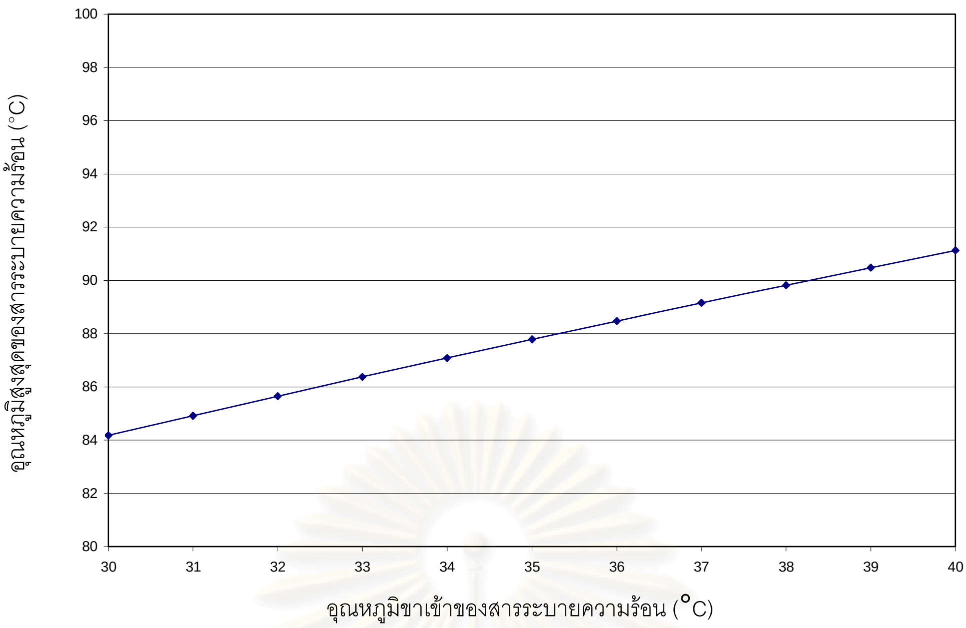
h_s เท่ากับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารระบายความร้อน

T_s เท่ากับ อุณหภูมิที่ผิวผนังของแท่งเชื้อเพลิง

T_{fl} เท่ากับ อุณหภูมิขาเข้าของสารระบายความร้อน

จากความสัมพันธ์ ตามสมการที่ (6.1) จะเห็นได้ว่า สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 มีเพียงปัจจัยเดียวที่สามารถปรับได้ ในกรณีที่มีต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1 นั่นก็คือการปรับลดอุณหภูมิขาเข้าของสารระบายความร้อน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของแกนปฏิกรณ์ฯ ดีขึ้นรองรับต่อการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ระดับกำลังสูงขึ้นได้ ซึ่งตัวอย่างผลที่ได้จากการลดอุณหภูมิขาเข้าของสารระบายความร้อน ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW จะมีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน ดังรูปที่ 6.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อน ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

จากรูปที่ 6.3 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1 ที่ระดับกำลัง 1,200 kW โดยการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2 สามารถสร้างเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{C(max)} = 0.6947T_{in} + 63.415 \qquad (6.2)$$

โดยที่

$T_{C(max)}$ เป็นอุณหภูมิสูงสุดของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ

T_{in} เป็นอุณหภูมิขาเข้าของสารระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ

โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ (6.2) นี้ สำหรับตำแหน่งการวัดที่ 1 และระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯเท่ากับ 1,200 kW

6.2.3.2 ควรจะศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการระบายความร้อนของแกนปฏิกรณ์ฯ เพิ่มเติม เช่น ควรศึกษาถึงอัตราการไหลเชิงมวลของสาระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ฯ ศึกษาประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนทั้งระบบ เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย -1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1). กรุงเทพมหานคร, 2521.

[2] General Atomic Company. Mechanical Operating and Maintenance Manual. TRIGA Mark III Reactor, 1977.

[3] กองปฏิกรณ์ปฏิบัติ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2544.

[4] มงคล จุลละนันทน์. ระบบวัดและควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1). กองปฏิกรณ์ปฏิบัติ, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพมหานคร, 2540.

[5] Wetchagarun, S., Tippayakul, C., Pechrak, A. Thermal Hydraulic Calculation of TRR-1/M1 : Steady State using COOLOD-N2. Reactor Management Section, Thailand Institute of Nuclear Technology, Bangkok, Thailand, 2009.

[6] สันติ จังพานิช. การวิเคราะห์ลักษณะการระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/1. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.

[7] Jame J. Duderstadt., Louis J. Hamilton. Nuclear Reactor Analysis. United States of America : Hamilton Printing Company, 1976.

[8] Kaminaga, M. COOLOD-N2 : A Computer Code for the Analyses of Steady State Thermal-Hydraulics on Research Reactor. Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.

[9] สุพงษา เขตต์คีรี, ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์, ธนรรจน์ แสงจันทร์. การคำนวณอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์วิจัยไทยโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 10, 2550.

[10] E.Umar, K. Kamajaya, A. Suwono, N.P. Tandian, T. Hardianto. An Experimental Study of Natural Convection in the Hottest Channel of TRIGA 2000 kW. Institute of Nuclear Technology Bandung, Indonesia.

[11] M.Q. Huda.,S.I. Bhuiyan. Investigation of thermohydraulic parameters during natural convection cooking of TRIGA reactor. Institute of Nuclear Science and Technology. Bangladesh, 2006.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลขาเข้าของการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งที่ 1 ระดับกำลัง 800 kW

```
   COOLOD-N2 THERMAL HYDRAULIC CALC. FOR TRR-1/M1 0.8MW AT POINT 1
C   <CARD B1> INFORM     (data defined as point)
              1
C   <CARD B2> IAMAX IMAX  *JMAX  NMAX  NPLOT KEY(1) *KEY(2) KEY(3) IDMAX
              1     5     20     1     1     1      5      0      3
C   <CARD C > *QRR(MW)  *PFLOW(KG/SEC)  *TIN(DEG)  DT(DEG)  JAMX
              0.8       66.47           40.0      0.0      1
C   <CARD E1>   H1     H2    H3     A      B     C    D    ITWC
             0.023   0.0    0.0  0.800  0.400  0.01  0.0    1
C   <CARD E2> FRATE   VIN   VOUT    PRESIN     RAMF
             1.0    0.0    0.0    1.677      0.0
C   <CARD F1> *FUEL ELEMENT TITLE
    TRIGA ROD TYPE FUEL
C   <CARD F2> NPMX *NFUEL  MA  UDENST POROTY IDPMX IDCMX  *EAREA   FRATEN
             1    107.0   2  0.1665   0.2    1    1      5.388    1.000
C   <CARD FNEW>    *DE(CM)   *D(CM)  *PITCH/D (-)
                   1.83     3.7338    1.166
C   <CARD F221> Fuel Pellet UZr-H W/CM.C
              7
        0.00      0.1758
      100.00      0.1833
      200.00      0.1908
      300.00      0.1983
      500.00      0.2133
     1000.00      0.2508
     2000.00      0.3257
C   <CARD F222> GAP CON  W/CM2.C DUMMY (GAP = 0.05 CM)
C   k He = 0.142 / 0.05 (CM) = 2.84
              2
          0        2.84
        500        2.84
C   <CARD F223> CLAD SS = 16.2W/CM.C(100 C)  / =21.5 W/CM.C(500 C)
C   CLADDING THICKNESS = 0.05 CM
              2
       100.0         0.81
       500.0         1.075
C   <CARD F3 > *FR   FCOOL  FFILM  FHFLX  FCLAD  FBOND  FMEAT
             1.604   1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
C   <CARD F4 >  FZ      DDZ             ZET   (FROM NEUTRONICS CALC.)
             0.821     2.005263        0.0
             0.851     2.005263        0.0
             0.941     2.005263        0.0
             1.028     2.005263        0.0
             1.101     2.005263        0.0
             1.158     2.005263        0.0
             1.200     2.005263        0.0
             1.227     2.005263        0.0
             1.241     2.005263        0.0
             1.240     2.005263        0.0
             1.224     2.005263        0.0
             1.189     2.005263        0.0
             1.133     2.005263        0.0
             1.061     2.005263        0.0
             0.981     2.005263        0.0
             0.896     2.005263        0.0
             0.806     2.005263        0.0
             0.711     2.005263        0.0
             0.618     2.005263        0.0
             0.573     0.00            0.0
C   <CARD F51> FUEL PLATE TITLE
    TRIGA TYPE FUEL
C   <CARD F52> *NPROD   FLOC  IDPL  KMX  IPLOT  IOUT
               1.0    1.00    1     1     1     1
C   <CARD F53> ICHL(1) NHEAT(1) FRATEC(1)
```

```
                  1     1.0    1.000

C   <CARD F6 >   *XA     XB      *XC     YA      *HA    *HB     *HC
              1.8161 0.0023  0.0508    0.0    10.3568  38.1   10.2806
C   <*CARD F76 >  *YCHI(DE) *XCHI(AREA) *MSFLW*8+1 MSFUEL
                 1.832       5.388         9        6
C   <*CARD F77>  ZETA     DH     ZLAM    HDE     AR
                0.50     0.000   0.0    3.175    7.917
                0.00     3.175  64.0    3.175    7.917
                0.151    0.000   0.0    3.175    7.917
                0.00    4.2672  64.0    4.446   12.948
                0.292    0.000   0.0    1.83     5.388
                0.0     58.7375 64.0    1.83     5.388
                0.111    0.000   0.0    1.35     8.08
                0.00     3.175  64.0    1.35     8.08
                1.00     0.000   0.0    1.35     8.08
C   <CARD G1 > KVELO *JUMAX *JLMAX  IHTC *KBFLG *NCMAX  NATIP
               1      5       3     4      0      2      0
C   <*CARD G2 >  *MSFLW
                  4
C   <*CARD G3>  ZETA       DH     ZLAM    HDE     AR
                0.50     0.000   0.0    14.88    1067.254
                0.00     3.175   64.0    14.88    1067.254
                0.151    0.000   0.0    14.88    1067.254
                0.00     38.1    64.0    54.61    2342.255
C   <*CARD G2 >  *MSFLW
                  3
C   <*CARD G3>  ZETA       DH     ZLAM    HDE     AR
                0.50     0.000   0.0    8.89     620.72
                0.00     0.635  64.0    8.89     620.72
                1.0      0.000   0.0    8.89     620.72
C   <CARD G4 > ((JMSH(NN,NNP,JJ,KK),NNP=1,NPMAX),KK=1,KMAX)
    1
    2
    3
    4
    5
    6
    7
    8
    9
C   for non heated channel
    1
    2
    3
    4
    1
    2
    3
C   <CARD G5>  CB     GLIM  == SET IF KEY(2) => 5
             1.41    500.0
C   <CARD G6 > IDBG
    0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0  0 0 0 0 0
C   <CARD P1>  WITHX  WITHY  TMIN  TMAX  PMIN  PMAX  HMIN  HMAX
               140.0  200.0   0.0  800.0  0.0   4.0   0.0  200.0
C   <CARD P2>  NEWI
 NEW
C   <CARD P3>  TITLE(A40)
 TRR-1 TRIGA-ROD CORE CASE:GA BENCHMARK
C   <CARD P4>  ID1 ID2 ID3 ID4 ID5 ID6 ID7 NS1 NS2 NS3 NS4 NS5 NS6 NS7
                11  13  23  14  12  22  21   0   0   0   0   0   0   0
```

ภาคผนวก ข

ข้อมูลขาออกของการคำนวณด้วยรหัสคอมพิวเตอร์ COOLOD-N2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ตำแหน่งที่ 1

1.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	126.41	243.92	113.83	117.22	1.65916	22.00
2	2.005	41.71	126.69	248.37	113.80	117.18	1.65717	22.80
3	4.011	43.55	127.59	261.77	113.76	117.15	1.65518	25.22
4	6.016	45.57	128.36	274.56	113.72	117.12	1.65320	27.55
5	8.021	47.75	128.93	285.17	113.69	117.08	1.65121	29.50
6	10.026	50.07	129.31	293.37	113.65	117.04	1.64923	31.03
7	12.032	52.48	129.58	299.38	113.61	116.99	1.64726	32.16
8	14.037	54.97	129.71	303.20	113.58	116.94	1.64528	32.88
9	16.042	57.50	129.73	305.13	113.54	116.88	1.64331	33.26
10	18.047	60.04	129.63	304.90	113.50	116.81	1.64134	33.23
11	20.053	62.56	129.42	302.51	113.47	116.74	1.63937	32.80
12	22.058	65.03	129.06	297.38	113.43	116.67	1.63741	31.86
13	24.063	67.40	128.53	289.20	113.39	116.59	1.63544	30.36
14	26.068	69.65	127.87	278.65	113.36	116.50	1.63348	28.43
15	28.074	71.74	127.14	266.89	113.32	116.42	1.63152	26.29
16	30.079	73.66	126.33	254.31	113.29	116.33	1.62956	24.01
17	32.084	75.39	125.44	240.88	113.25	116.23	1.62760	21.60
18	34.089	76.94	124.43	226.58	113.21	116.14	1.62564	19.05
19	36.095	78.30	123.37	212.41	113.18	116.04	1.62368	16.56
20	38.100	79.52	122.81	205.50	113.14	115.97	1.62172	15.35

1.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	128.21	271.06	113.83	117.35	1.65913	26.90
2	2.005	41.94	128.49	276.53	113.80	117.31	1.65714	27.90
3	4.011	44.03	129.44	292.78	113.76	117.28	1.65515	30.89
4	6.016	46.32	130.26	308.48	113.72	117.25	1.65317	33.81
5	8.021	48.80	130.86	321.50	113.69	117.22	1.65119	36.27
6	10.026	51.44	131.31	332.11	113.65	117.17	1.64921	38.28
7	12.032	54.20	131.60	339.83	113.61	117.12	1.64723	39.76
8	14.037	57.05	131.76	345.39	113.58	117.06	1.64526	40.83
9	16.042	59.96	131.80	348.63	113.54	116.99	1.64329	41.47
10	18.047	62.90	131.74	349.59	113.50	116.92	1.64132	41.67
11	20.053	65.84	131.56	347.90	113.47	116.85	1.63936	41.37
12	22.058	68.73	131.21	342.86	113.43	116.76	1.63740	40.43
13	24.063	71.53	130.72	334.28	113.39	116.67	1.63544	38.82
14	26.068	74.19	130.07	322.12	113.36	116.58	1.63349	36.53
15	28.074	76.67	129.25	307.02	113.32	116.47	1.63153	33.71
16	30.079	78.95	128.36	290.91	113.29	116.37	1.62958	30.73
17	32.084	81.00	127.38	273.57	113.25	116.26	1.62762	27.54
18	34.089	82.83	126.31	255.51	113.21	116.15	1.62567	24.24
19	36.095	84.42	125.19	237.80	113.18	116.04	1.62371	21.05
20	38.100	85.85	124.60	228.96	113.14	115.95	1.62176	19.48

1.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	129.86	298.82	113.83	117.47	1.65910	32.00
2	2.005	42.16	130.15	305.23	113.79	117.43	1.65711	33.20
3	4.011	44.48	131.13	324.26	113.76	117.40	1.65513	36.76
4	6.016	47.03	131.98	342.64	113.72	117.37	1.65314	40.25
5	8.021	49.79	132.59	357.87	113.69	117.34	1.65116	43.17
6	10.026	52.73	133.07	370.30	113.65	117.28	1.64918	45.57
7	12.032	55.81	133.37	379.53	113.61	117.23	1.64721	47.37
8	14.037	58.99	133.53	386.02	113.58	117.16	1.64524	48.65
9	16.042	62.23	133.56	389.82	113.54	117.09	1.64327	49.42
10	18.047	65.51	133.49	391.14	113.50	117.02	1.64131	49.70
11	20.053	68.78	133.27	389.16	113.47	116.93	1.63935	49.34
12	22.058	72.01	132.92	383.49	113.43	116.84	1.63739	48.25
13	24.063	75.13	132.41	373.47	113.39	116.74	1.63544	46.33
14	26.068	78.10	131.70	359.25	113.36	116.63	1.63349	43.61
15	28.074	80.87	130.85	341.79	113.32	116.52	1.63153	40.29
16	30.079	83.41	129.93	322.94	113.29	116.40	1.62959	36.72
17	32.084	85.70	128.91	302.63	113.25	116.27	1.62764	32.92
18	34.089	87.74	127.77	281.24	113.21	116.15	1.62569	28.95
19	36.095	89.52	126.61	260.48	113.18	116.02	1.62374	25.15
20	38.100	91.12	126.00	250.12	113.14	115.92	1.62179	23.27

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	131.77	334.51	113.83	117.62	1.65906	38.67
2	2.005	42.41	132.08	342.60	113.79	117.58	1.65707	40.22
3	4.011	44.99	133.13	365.56	113.76	117.55	1.65508	44.61
4	6.016	47.84	134.03	387.70	113.72	117.52	1.65310	48.90
5	8.021	50.93	134.72	406.79	113.68	117.49	1.65112	52.64
6	10.026	54.23	135.23	422.17	113.65	117.43	1.64914	55.69
7	12.032	57.70	135.57	434.15	113.61	117.37	1.64717	58.08
8	14.037	61.29	135.76	443.05	113.58	117.30	1.64520	59.88
9	16.042	64.97	135.83	448.92	113.54	117.23	1.64324	61.08
10	18.047	68.70	135.78	452.01	113.50	117.14	1.64128	61.73
11	20.053	72.45	135.62	451.39	113.47	117.05	1.63933	61.63
12	22.058	76.17	135.32	446.53	113.43	116.94	1.63737	60.68
13	24.063	79.79	134.82	436.39	113.39	116.83	1.63543	58.68
14	26.068	83.26	134.16	421.20	113.36	116.70	1.63348	55.69
15	28.074	86.52	133.31	401.09	113.32	116.56	1.63154	51.75
16	30.079	89.51	132.29	377.21	113.29	116.42	1.62960	47.11
17	32.084	92.21	131.18	351.53	113.25	116.27	1.62766	42.17
18	34.089	94.61	129.96	324.51	113.21	116.12	1.62572	37.03
19	36.095	96.70	128.71	298.46	113.18	115.96	1.62377	32.14
20	38.100	98.57	128.06	285.31	113.14	115.83	1.62183	29.69

2. ตำแหน่งที่ 2

2.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	126.34	243.12	113.83	117.22	1.65916	21.86
2	2.005	41.70	126.65	248.00	113.80	117.18	1.65717	22.74
3	4.011	43.53	127.61	262.18	113.76	117.16	1.65518	25.29
4	6.016	45.55	128.45	276.05	113.72	117.13	1.65320	27.82
5	8.021	47.75	129.08	287.73	113.69	117.09	1.65121	29.97
6	10.026	50.10	129.51	296.86	113.65	117.05	1.64923	31.68
7	12.032	52.56	129.82	303.67	113.61	117.00	1.64725	32.95
8	14.037	55.09	129.98	308.16	113.58	116.95	1.64528	33.80
9	16.042	57.68	130.00	310.21	113.54	116.89	1.64331	34.20
10	18.047	60.28	129.88	309.83	113.50	116.82	1.64134	34.15
11	20.053	62.85	129.62	306.47	113.47	116.75	1.63937	33.54
12	22.058	65.35	129.16	299.38	113.43	116.67	1.63741	32.24
13	24.063	67.72	128.44	287.67	113.39	116.59	1.63544	30.08
14	26.068	69.89	127.40	270.94	113.36	116.50	1.63348	27.02
15	28.074	71.85	126.58	257.89	113.32	116.41	1.63152	24.66
16	30.079	73.64	125.76	245.63	113.29	116.32	1.62956	22.45
17	32.084	75.26	124.88	232.82	113.25	116.23	1.62760	20.16
18	34.089	76.69	123.89	219.28	113.21	116.13	1.62563	17.77
19	36.095	77.95	122.83	205.89	113.18	116.04	1.62367	15.43
20	38.100	79.07	122.19	198.36	113.14	115.96	1.62171	14.12

2.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	128.08	269.38	113.83	117.35	1.65913	26.60
2	2.005	41.91	128.40	275.33	113.80	117.31	1.65714	27.69
3	4.011	43.98	129.40	292.31	113.76	117.29	1.65515	30.81
4	6.016	46.26	130.29	309.07	113.72	117.26	1.65317	33.92
5	8.021	48.74	130.95	323.33	113.69	117.22	1.65119	36.61
6	10.026	51.40	131.43	334.68	113.65	117.18	1.64921	38.77
7	12.032	54.19	131.78	343.52	113.61	117.13	1.64723	40.46
8	14.037	57.08	131.96	349.52	113.58	117.07	1.64526	41.62
9	16.042	60.03	132.00	352.88	113.54	117.00	1.64329	42.28
10	18.047	63.01	131.92	353.47	113.50	116.93	1.64132	42.41
11	20.053	65.98	131.70	351.11	113.47	116.85	1.63936	41.98
12	22.058	68.89	131.30	344.91	113.43	116.77	1.63740	40.82
13	24.063	71.69	130.71	334.17	113.39	116.68	1.63544	38.80
14	26.068	74.31	129.85	317.93	113.36	116.57	1.63348	35.75
15	28.074	76.68	128.67	296.04	113.32	116.46	1.63153	31.67
16	30.079	78.79	127.67	278.40	113.29	116.36	1.62957	28.42
17	32.084	80.68	126.68	261.70	113.25	116.25	1.62762	25.37

18	34.089	82.35	125.62	244.64	113.21	116.15	1.62566	22.29
19	36.095	83.81	124.51	227.95	113.18	116.04	1.62370	19.30
20	38.100	85.10	123.86	218.78	113.14	115.95	1.62175	17.68

2.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	129.75	297.18	113.83	117.47	1.65910	31.70
2	2.005	42.13	130.07	304.19	113.79	117.43	1.65711	33.01
3	4.011	44.43	131.13	324.35	113.76	117.41	1.65512	36.78
4	6.016	46.98	132.04	343.84	113.72	117.38	1.65314	40.47
5	8.021	49.76	132.73	360.81	113.69	117.35	1.65116	43.73
6	10.026	52.72	133.26	374.35	113.65	117.30	1.64918	46.35
7	12.032	55.84	133.60	384.72	113.61	117.24	1.64721	48.38
8	14.037	59.07	133.78	391.96	113.58	117.18	1.64523	49.81
9	16.042	62.38	133.82	395.91	113.54	117.10	1.64327	50.60
10	18.047	65.72	133.72	396.81	113.50	117.03	1.64131	50.80
11	20.053	69.04	133.47	394.23	113.47	116.94	1.63935	50.32
12	22.058	72.31	133.07	387.19	113.43	116.85	1.63739	48.97
13	24.063	75.45	132.45	374.80	113.39	116.74	1.63544	46.59
14	26.068	78.39	131.54	355.73	113.36	116.63	1.63348	42.94
15	28.074	81.04	130.30	330.01	113.32	116.50	1.63153	38.05
16	30.079	83.41	129.26	309.29	113.29	116.38	1.62958	34.16
17	32.084	85.53	128.22	289.43	113.25	116.26	1.62763	30.46
18	34.089	87.41	127.11	269.36	113.21	116.14	1.62568	26.77
19	36.095	89.04	125.95	249.71	113.18	116.02	1.62373	23.20
20	38.100	90.50	125.29	238.91	113.14	115.92	1.62178	21.25

2.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	131.64	332.43	113.83	117.63	1.65906	38.28
2	2.005	42.37	131.99	340.98	113.79	117.59	1.65707	39.92
3	4.011	44.93	133.10	365.05	113.76	117.56	1.65508	44.52
4	6.016	47.77	134.07	388.80	113.72	117.53	1.65310	49.12
5	8.021	50.87	134.82	409.22	113.68	117.50	1.65112	53.12
6	10.026	54.19	135.39	425.96	113.65	117.44	1.64914	56.44
7	12.032	57.69	135.77	439.06	113.61	117.38	1.64717	59.06
8	14.037	61.32	135.99	448.85	113.58	117.32	1.64520	61.04
9	16.042	65.06	136.06	454.90	113.54	117.24	1.64324	62.27
10	18.047	68.84	135.98	457.46	113.50	117.15	1.64128	62.82
11	20.053	72.64	135.80	456.34	113.47	117.06	1.63932	62.62
12	22.058	76.38	135.45	450.29	113.43	116.95	1.63737	61.43
13	24.063	80.03	134.90	438.77	113.39	116.83	1.63542	59.16
14	26.068	83.49	134.15	420.97	113.36	116.70	1.63348	55.64
15	28.074	86.70	133.08	395.47	113.32	116.56	1.63154	50.65
16	30.079	89.55	131.64	361.99	113.29	116.40	1.62960	44.17
17	32.084	92.06	130.41	334.28	113.25	116.25	1.62765	38.88
18	34.089	94.25	129.18	308.31	113.21	116.10	1.62571	33.98
19	36.095	96.16	127.94	283.34	113.18	115.95	1.62376	29.33
20	38.100	97.84	127.22	269.66	113.14	115.83	1.62182	26.81

3. ตำแหน่งที่ 3

3.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	125.84	237.06	113.83	117.22	1.65916	20.79
2	2.005	41.62	126.26	243.09	113.80	117.18	1.65717	21.87
3	4.011	43.38	127.23	256.89	113.76	117.15	1.65518	24.34
4	6.016	45.31	128.05	269.98	113.72	117.12	1.65319	26.72
5	8.021	47.42	128.65	280.73	113.69	117.09	1.65121	28.69
6	10.026	49.65	129.06	289.08	113.65	117.05	1.64923	30.24
7	12.032	51.99	129.32	294.97	113.61	117.00	1.64725	31.34
8	14.037	54.40	129.46	298.67	113.58	116.95	1.64527	32.04
9	16.042	56.83	129.44	299.80	113.54	116.89	1.64330	32.27
10	18.047	59.27	129.28	298.64	113.50	116.82	1.64133	32.07
11	20.053	61.68	129.00	294.92	113.47	116.75	1.63936	31.39
12	22.058	64.01	128.50	287.40	113.43	116.68	1.63739	30.02

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13	24.063	66.20	127.77	275.91	113.39	116.59	1.63543	27.92
14	26.068	68.21	126.78	260.62	113.36	116.51	1.63346	25.14
15	28.074	70.03	125.91	247.70	113.32	116.42	1.63150	22.82
16	30.079	71.67	125.06	235.52	113.29	116.34	1.62954	20.64
17	32.084	73.15	124.14	223.10	113.25	116.25	1.62757	18.44
18	34.089	74.47	123.14	210.40	113.21	116.16	1.62561	16.22
19	36.095	75.61	122.07	197.83	113.18	116.07	1.62364	14.05
20	38.100	76.63	121.42	190.82	113.14	116.00	1.62168	12.85

3.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	127.54	262.01	113.83	117.35	1.65913	25.27
2	2.005	41.82	127.98	269.28	113.80	117.31	1.65714	26.60
3	4.011	43.80	129.00	285.95	113.76	117.29	1.65515	29.64
4	6.016	45.98	129.85	301.57	113.72	117.26	1.65316	32.54
5	8.021	48.35	130.49	314.72	113.69	117.22	1.65118	35.00
6	10.026	50.88	130.93	324.97	113.65	117.18	1.64920	36.94
7	12.032	53.52	131.23	332.56	113.61	117.13	1.64722	38.38
8	14.037	56.24	131.36	337.19	113.58	117.07	1.64525	39.28
9	16.042	59.01	131.36	339.20	113.54	117.00	1.64328	39.68
10	18.047	61.79	131.21	338.29	113.50	116.93	1.64131	39.52
11	20.053	64.53	130.92	334.29	113.47	116.86	1.63935	38.78
12	22.058	67.19	130.40	325.72	113.43	116.78	1.63738	37.18
13	24.063	69.71	129.63	312.19	113.39	116.69	1.63542	34.66
14	26.068	72.02	128.60	293.78	113.36	116.59	1.63346	31.24
15	28.074	74.11	127.70	278.38	113.32	116.49	1.63150	28.41
16	30.079	76.00	126.79	263.53	113.29	116.39	1.62954	25.70
17	32.084	77.70	125.84	248.55	113.25	116.29	1.62758	22.99
18	34.089	79.21	124.79	233.06	113.21	116.20	1.62562	20.22
19	36.095	80.53	123.68	217.76	113.18	116.10	1.62366	17.51
20	38.100	81.71	123.04	209.33	113.14	116.01	1.62170	16.04

3.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	129.22	289.01	113.83	117.47	1.65910	30.20
2	2.005	42.04	129.67	297.71	113.79	117.43	1.65711	31.81
3	4.011	44.25	130.74	317.44	113.76	117.40	1.65512	35.49
4	6.016	46.70	131.64	336.12	113.72	117.38	1.65314	39.01
5	8.021	49.36	132.30	351.82	113.69	117.34	1.65116	42.02
6	10.026	52.20	132.79	364.28	113.65	117.29	1.64918	44.42
7	12.032	55.18	133.10	373.54	113.61	117.24	1.64720	46.22
8	14.037	58.26	133.25	379.64	113.58	117.18	1.64523	47.42
9	16.042	61.39	133.26	382.62	113.54	117.11	1.64326	48.02
10	18.047	64.54	133.14	382.70	113.50	117.03	1.64130	48.06
11	20.053	67.67	132.87	379.29	113.47	116.95	1.63934	47.42
12	22.058	70.73	132.40	371.22	113.43	116.86	1.63738	45.88
13	24.063	73.66	131.75	358.46	113.39	116.76	1.63542	43.44
14	26.068	76.39	130.84	340.11	113.36	116.65	1.63347	39.95
15	28.074	78.86	129.65	316.61	113.32	116.53	1.63151	35.53
16	30.079	81.07	128.58	296.29	113.29	116.42	1.62956	31.74
17	32.084	83.03	127.53	277.19	113.25	116.30	1.62760	28.21
18	34.089	84.76	126.40	257.88	113.21	116.19	1.62565	24.68
19	36.095	86.26	125.24	239.37	113.18	116.07	1.62369	21.35
20	38.100	87.59	124.55	228.88	113.14	115.98	1.62174	19.47

3.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	131.09	322.94	113.83	117.62	1.65906	36.51
2	2.005	42.27	131.58	333.59	113.79	117.58	1.65707	38.52
3	4.011	44.74	132.71	357.27	113.76	117.56	1.65508	43.03
4	6.016	47.48	133.68	380.14	113.72	117.53	1.65310	47.44
5	8.021	50.46	134.39	399.35	113.68	117.49	1.65111	51.19
6	10.026	53.65	134.93	414.83	113.65	117.44	1.64914	54.24
7	12.032	57.00	135.29	426.85	113.61	117.38	1.64716	56.64
8	14.037	60.47	135.47	435.25	113.58	117.32	1.64519	58.33
9	16.042	64.02	135.52	440.31	113.54	117.24	1.64323	59.36
10	18.047	67.62	135.43	442.05	113.50	117.16	1.64127	59.73

11	20.053	71.21	135.21	440.03	113.47	117.07	1.63931	59.36
12	22.058	74.75	134.82	432.84	113.43	116.96	1.63736	57.95
13	24.063	78.17	134.23	420.40	113.39	116.85	1.63541	55.51
14	26.068	81.41	133.44	402.41	113.36	116.73	1.63346	51.99
15	28.074	84.40	132.38	378.02	113.32	116.59	1.63151	47.25
16	30.079	87.07	131.01	347.48	113.29	116.45	1.62957	41.39
17	32.084	89.40	129.75	320.74	113.25	116.31	1.62762	36.32
18	34.089	91.44	128.51	295.67	113.21	116.17	1.62567	31.63
19	36.095	93.21	127.25	271.80	113.18	116.03	1.62373	27.22
20	38.100	94.77	126.53	258.72	113.14	115.91	1.62178	24.82

4. **ตำแหน่งที่ 4**

4.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	123.31	209.41	113.83	117.17	1.65916	16.00
2	2.005	41.24	123.73	213.98	113.80	117.14	1.65717	16.79
3	4.011	42.58	124.65	224.42	113.76	117.11	1.65518	18.60
4	6.016	44.05	125.42	234.10	113.72	117.09	1.65319	20.31
5	8.021	45.63	125.98	241.92	113.69	117.05	1.65120	21.70
6	10.026	47.31	126.37	247.93	113.65	117.02	1.64922	22.78
7	12.032	49.06	126.58	251.85	113.61	116.98	1.64723	23.49
8	14.037	50.85	126.67	253.93	113.58	116.93	1.64525	23.88
9	16.042	52.65	126.63	254.09	113.54	116.88	1.64327	23.91
10	18.047	54.44	126.46	252.31	113.50	116.82	1.64130	23.60
11	20.053	56.20	126.14	248.37	113.47	116.76	1.63932	22.91
12	22.058	57.88	125.62	241.76	113.43	116.69	1.63734	21.73
13	24.063	59.46	124.85	232.02	113.39	116.62	1.63537	20.01
14	26.068	60.88	123.80	219.27	113.36	116.54	1.63340	17.78
15	28.074	62.15	122.89	208.91	113.32	116.47	1.63142	15.98
16	30.079	63.30	122.00	199.41	113.28	116.40	1.62945	14.36
17	32.084	64.32	121.04	190.00	113.25	116.32	1.62748	12.76
18	34.089	65.22	119.96	180.44	113.21	116.24	1.62550	11.17
19	36.095	66.01	118.76	171.12	113.17	116.17	1.62353	9.65
20	38.100	66.70	117.97	165.61	113.14	116.10	1.62156	8.77

4.2_ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	125.02	230.25	113.83	117.30	1.65913	19.65
2	2.005	41.41	125.45	235.93	113.80	117.27	1.65714	20.65
3	4.011	42.94	126.41	248.66	113.76	117.24	1.65515	22.91
4	6.016	44.61	127.24	260.71	113.72	117.22	1.65316	25.08
5	8.021	46.43	127.85	270.70	113.69	117.18	1.65117	26.89
6	10.026	48.36	128.26	278.31	113.65	117.15	1.64919	28.29
7	12.032	50.38	128.52	283.83	113.61	117.10	1.64721	29.32
8	14.037	52.45	128.67	287.20	113.58	117.05	1.64523	29.95
9	16.042	54.55	128.67	288.28	113.54	117.00	1.64325	30.16
10	18.047	56.66	128.54	287.32	113.50	116.94	1.64128	29.99
11	20.053	58.73	128.28	284.09	113.47	116.87	1.63930	29.41
12	22.058	60.75	127.85	277.92	113.43	116.80	1.63733	28.29
13	24.063	62.67	127.21	268.41	113.39	116.73	1.63536	26.57
14	26.068	64.44	126.31	255.23	113.36	116.65	1.63339	24.19
15	28.074	66.02	125.13	238.67	113.32	116.56	1.63142	21.23
16	30.079	67.42	124.07	224.81	113.28	116.48	1.62945	18.78
17	32.084	68.66	123.02	212.13	113.25	116.39	1.62748	16.57
18	34.089	69.74	121.91	199.82	113.21	116.31	1.62551	14.45
19	36.095	70.68	120.74	188.01	113.17	116.22	1.62354	12.45
20	38.100	71.51	119.98	181.05	113.14	116.15	1.62157	11.28

4.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	126.53	251.18	113.83	117.42	1.65910	23.37
2	2.005	41.57	126.97	257.82	113.79	117.39	1.65711	24.57
3	4.011	43.26	127.97	272.72	113.76	117.36	1.65512	27.26
4	6.016	45.13	128.82	286.83	113.72	117.33	1.65313	29.85
5	8.021	47.15	129.45	298.53	113.68	117.30	1.65114	32.02
6	10.026	49.30	129.88	307.59	113.65	117.26	1.64916	33.71

7	12.032	51.55	130.16	314.08	113.61	117.22	1.64718	34.93
8	14.037	53.85	130.30	318.02	113.58	117.16	1.64520	35.68
9	16.042	56.20	130.29	319.42	113.54	117.10	1.64323	35.96
10	18.047	58.54	130.15	318.30	113.50	117.04	1.64125	35.77
11	20.053	60.85	129.87	314.66	113.47	116.97	1.63928	35.10
12	22.058	63.10	129.42	307.44	113.43	116.90	1.63731	33.77
13	24.063	65.24	128.74	296.30	113.39	116.82	1.63535	31.71
14	26.068	67.21	127.79	280.86	113.36	116.73	1.63338	28.87
15	28.074	68.98	126.56	261.61	113.32	116.63	1.63141	25.37
16	30.079	70.54	125.46	245.38	113.28	116.54	1.62945	22.46
17	32.084	71.92	124.39	230.54	113.25	116.45	1.62748	19.82
18	34.089	73.13	123.27	216.15	113.21	116.36	1.62551	17.29
19	36.095	74.18	122.09	202.36	113.17	116.27	1.62354	14.90
20	38.100	75.11	121.34	194.25	113.14	116.19	1.62158	13.51

4.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	119.97	187.86	113.83	117.31	1.65909	12.56
2	2.005	40.91	122.35	206.71	113.79	117.32	1.65710	15.67
3	4.011	42.04	124.61	229.82	113.76	117.32	1.65510	19.64
4	6.016	43.43	126.40	252.10	113.72	117.32	1.65311	23.57
5	8.021	45.05	127.64	270.17	113.68	117.30	1.65113	26.83
6	10.026	46.85	128.35	281.91	113.65	117.27	1.64914	28.98
7	12.032	48.83	129.54	302.65	113.61	117.25	1.64716	32.80
8	14.037	51.07	130.67	324.26	113.57	117.22	1.64518	36.85
9	16.042	53.56	131.61	343.72	113.54	117.18	1.64320	40.53
10	18.047	56.26	132.29	359.60	113.50	117.14	1.64123	43.57
11	20.053	59.13	132.75	371.80	113.47	117.08	1.63926	45.93
12	22.058	62.13	132.99	379.48	113.43	117.02	1.63729	47.43
13	24.063	65.20	133.04	383.25	113.39	116.95	1.63533	48.19
14	26.068	68.30	132.94	383.69	113.36	116.87	1.63338	48.29
15	28.074	71.38	132.71	380.83	113.32	116.78	1.63143	47.76
16	30.079	74.40	132.36	374.64	113.28	116.68	1.62947	46.58
17	32.084	77.32	131.84	364.36	113.25	116.58	1.62753	44.61
18	34.089	80.09	131.07	348.80	113.21	116.47	1.62558	41.64
19	36.095	82.60	129.84	323.31	113.18	116.34	1.62363	36.81
20	38.100	84.65	127.14	271.91	113.14	116.17	1.62168	27.26

5. ตำแหน่งที่ 5

5.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	122.11	198.18	113.83	117.15	1.65916	14.10
2	2.005	41.09	122.49	201.87	113.80	117.11	1.65717	14.73
3	4.011	42.27	123.43	211.22	113.76	117.09	1.65518	16.32
4	6.016	43.56	124.23	220.06	113.72	117.06	1.65319	17.85
5	8.021	44.97	124.83	227.48	113.69	117.03	1.65120	19.15
6	10.026	46.45	125.24	233.05	113.65	117.00	1.64921	20.14
7	12.032	48.01	125.50	237.00	113.61	116.96	1.64723	20.84
8	14.037	49.60	125.61	239.25	113.58	116.91	1.64525	21.26
9	16.042	51.21	125.61	239.86	113.54	116.87	1.64327	21.37
10	18.047	52.82	125.48	238.70	113.50	116.81	1.64129	21.17
11	20.053	54.40	125.21	235.60	113.47	116.75	1.63931	20.63
12	22.058	55.93	124.74	230.07	113.43	116.69	1.63733	19.66
13	24.063	57.36	124.01	221.41	113.39	116.62	1.63536	18.15
14	26.068	58.66	122.99	210.02	113.36	116.55	1.63338	16.18
15	28.074	59.82	122.11	200.80	113.32	116.48	1.63140	14.60
16	30.079	60.87	121.25	192.45	113.28	116.41	1.62943	13.18
17	32.084	61.82	120.30	183.98	113.25	116.34	1.62745	11.77
18	34.089	62.65	119.23	175.37	113.21	116.26	1.62548	10.36
19	36.095	63.38	118.02	166.95	113.17	116.19	1.62350	9.01
20	38.100	64.04	117.25	162.21	113.14	116.12	1.62152	8.27

5.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	123.65	215.43	113.83	117.27	1.65913	17.08
2	2.005	41.23	124.06	220.07	113.80	117.24	1.65714	17.89
3	4.011	42.55	125.03	231.44	113.76	117.22	1.65515	19.87
4	6.016	44.01	125.87	242.18	113.72	117.19	1.65316	21.77
5	8.021	45.60	126.50	251.30	113.69	117.16	1.65117	23.40
6	10.026	47.29	126.96	258.50	113.65	117.12	1.64919	24.70
7	12.032	49.05	127.25	263.81	113.61	117.08	1.64720	25.67
8	14.037	50.88	127.42	267.29	113.58	117.04	1.64522	26.31
9	16.042	52.73	127.47	268.83	113.54	116.99	1.64324	26.60
10	18.047	54.60	127.40	268.55	113.50	116.93	1.64126	26.56
11	20.053	56.44	127.19	266.10	113.47	116.87	1.63929	26.13
12	22.058	58.24	126.81	261.14	113.43	116.81	1.63731	25.24
13	24.063	59.96	126.22	253.07	113.39	116.74	1.63534	23.79
14	26.068	61.56	125.36	241.48	113.36	116.66	1.63337	21.73
15	28.074	62.99	124.21	226.63	113.32	116.58	1.63140	19.10
16	30.079	64.25	123.20	214.56	113.28	116.50	1.62942	17.00
17	32.084	65.38	122.19	203.42	113.25	116.42	1.62745	15.08
18	34.089	66.37	121.09	192.37	113.21	116.34	1.62548	13.20
19	36.095	67.23	119.92	181.86	113.17	116.26	1.62351	11.44
20	38.100	68.00	119.22	176.08	113.14	116.19	1.62153	10.49

5.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	125.20	234.89	113.83	117.39	1.65910	20.50
2	2.005	41.38	125.62	240.34	113.79	117.36	1.65711	21.46
3	4.011	42.86	126.62	253.71	113.76	117.33	1.65512	23.84
4	6.016	44.50	127.47	266.35	113.72	117.31	1.65313	26.12
5	8.021	46.28	128.13	277.08	113.68	117.28	1.65114	28.08
6	10.026	48.17	128.59	285.56	113.65	117.24	1.64916	29.64
7	12.032	50.15	128.88	291.81	113.61	117.20	1.64717	30.81
8	14.037	52.20	129.07	295.92	113.58	117.15	1.64519	31.57
9	16.042	54.28	129.11	297.74	113.54	117.09	1.64322	31.92
10	18.047	56.37	129.02	297.40	113.50	117.03	1.64124	31.87
11	20.053	58.44	128.79	294.52	113.47	116.97	1.63927	31.35
12	22.058	60.46	128.38	288.67	113.43	116.90	1.63729	30.29
13	24.063	62.39	127.76	279.17	113.39	116.83	1.63532	28.55
14	26.068	64.17	126.87	265.52	113.36	116.75	1.63335	26.07
15	28.074	65.78	125.66	248.02	113.32	116.66	1.63138	22.93
16	30.079	67.20	124.61	233.80	113.28	116.57	1.62941	20.40
17	32.084	68.45	123.57	220.69	113.25	116.49	1.62744	18.09
18	34.089	69.56	122.46	207.71	113.21	116.40	1.62547	15.84
19	36.095	70.53	121.30	195.40	113.17	116.32	1.62350	13.73
20	38.100	71.39	120.61	188.67	113.14	116.24	1.62153	12.59

5.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	126.89	259.02	113.83	117.54	1.65906	24.82
2	2.005	41.54	127.32	265.73	113.79	117.50	1.65706	26.03
3	4.011	43.20	128.38	281.84	113.76	117.48	1.65507	28.96
4	6.016	45.03	129.30	297.40	113.72	117.45	1.65309	31.82
5	8.021	47.03	130.01	310.78	113.68	117.42	1.65110	34.31
6	10.026	49.16	130.50	321.37	113.65	117.39	1.64912	36.31
7	12.032	51.40	130.86	329.58	113.61	117.34	1.64713	37.86
8	14.037	53.72	131.10	335.46	113.57	117.29	1.64515	38.98
9	16.042	56.09	131.18	338.67	113.54	117.23	1.64318	39.61
10	18.047	58.48	131.13	339.41	113.50	117.17	1.64120	39.76
11	20.053	60.87	130.96	337.68	113.47	117.10	1.63923	39.45
12	22.058	63.21	130.61	332.34	113.43	117.03	1.63726	38.45
13	24.063	65.48	130.08	323.34	113.39	116.95	1.63530	36.77
14	26.068	67.62	129.31	309.97	113.36	116.86	1.63333	34.28
15	28.074	69.59	128.26	291.96	113.32	116.77	1.63137	30.95
16	30.079	71.33	126.90	269.52	113.28	116.67	1.62940	26.84
17	32.084	72.84	125.68	250.75	113.25	116.57	1.62744	23.45
18	34.089	74.16	124.48	233.66	113.21	116.47	1.62547	20.39
19	36.095	75.30	123.25	217.75	113.17	116.37	1.62350	17.59
20	38.100	76.32	122.54	209.17	113.14	116.29	1.62153	16.10

6. ตำแหน่งที่ 6

6.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	117.44	166.83	113.83	117.04	1.65916	9.09
2	2.005	40.73	118.41	171.69	113.80	117.02	1.65717	9.82
3	4.011	41.52	119.41	177.69	113.76	117.00	1.65518	10.76
4	6.016	42.38	120.18	182.95	113.72	116.97	1.65319	11.60
5	8.021	43.30	120.72	187.13	113.69	116.94	1.65120	12.28
6	10.026	44.26	121.10	190.29	113.65	116.91	1.64921	12.81
7	12.032	45.26	121.35	192.60	113.61	116.87	1.64722	13.19
8	14.037	46.28	121.51	194.15	113.58	116.83	1.64524	13.46
9	16.042	47.32	121.57	194.94	113.54	116.79	1.64325	13.59
10	18.047	48.37	121.55	194.97	113.50	116.75	1.64127	13.60
11	20.053	49.41	121.43	194.19	113.47	116.71	1.63928	13.48
12	22.058	50.44	121.23	192.60	113.43	116.66	1.63730	13.22
13	24.063	51.44	120.93	190.13	113.39	116.61	1.63532	12.81
14	26.068	52.40	120.52	186.69	113.36	116.55	1.63334	12.24
15	28.074	53.31	119.99	182.52	113.32	116.49	1.63136	11.55
16	30.079	54.17	119.34	177.61	113.28	116.43	1.62937	10.76
17	32.084	54.96	118.52	171.99	113.25	116.37	1.62739	9.86
18	34.089	55.68	117.47	165.63	113.21	116.30	1.62541	8.86
19	36.095	56.32	116.09	158.69	113.17	116.22	1.62343	7.83
20	38.100	56.89	114.59	153.02	113.13	116.15	1.62145	7.05

6.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	119.17	178.82	113.83	117.17	1.65913	11.01
2	2.005	40.82	120.03	184.41	113.80	117.15	1.65714	11.90
3	4.011	41.70	120.98	191.51	113.76	117.12	1.65515	13.06
4	6.016	42.67	121.72	197.80	113.72	117.10	1.65316	14.10
5	8.021	43.71	122.27	202.90	113.69	117.07	1.65117	14.96
6	10.026	44.80	122.67	206.96	113.65	117.03	1.64918	15.66
7	12.032	45.93	122.95	209.99	113.61	117.00	1.64719	16.18
8	14.037	47.09	123.12	212.09	113.58	116.96	1.64521	16.55
9	16.042	48.28	123.21	213.45	113.54	116.92	1.64322	16.79
10	18.047	49.48	123.22	213.90	113.50	116.87	1.64124	16.87
11	20.053	50.67	123.15	213.46	113.47	116.83	1.63926	16.80
12	22.058	51.86	122.99	211.97	113.43	116.77	1.63728	16.55
13	24.063	53.02	122.72	209.32	113.39	116.72	1.63529	16.09
14	26.068	54.14	122.32	205.42	113.36	116.66	1.63331	15.43
15	28.074	55.21	121.80	200.42	113.32	116.60	1.63133	14.58
16	30.079	56.21	121.15	194.39	113.28	116.54	1.62935	13.57
17	32.084	57.13	120.35	187.44	113.24	116.48	1.62738	12.41
18	34.089	57.97	119.38	179.78	113.21	116.41	1.62540	11.15
19	36.095	58.72	118.21	171.68	113.17	116.33	1.62342	9.85
20	38.100	59.38	117.15	165.32	113.13	116.26	1.62144	8.87

6.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	120.76	192.13	113.83	117.28	1.65911	13.21
2	2.005	40.92	121.56	198.59	113.79	117.26	1.65711	14.28
3	4.011	41.91	122.49	206.85	113.76	117.24	1.65512	15.67
4	6.016	43.00	123.22	214.19	113.72	117.21	1.65313	16.92
5	8.021	44.16	123.77	220.17	113.68	117.18	1.65114	17.96
6	10.026	45.38	124.17	224.92	113.65	117.14	1.64915	18.79
7	12.032	46.66	124.44	228.48	113.61	117.11	1.64717	19.41
8	14.037	47.96	124.60	230.95	113.57	117.07	1.64518	19.85
9	16.042	49.29	124.69	232.54	113.54	117.03	1.64320	20.14
10	18.047	50.64	124.69	233.08	113.50	116.98	1.64121	20.24
11	20.053	51.98	124.63	232.57	113.46	116.93	1.63923	20.16
12	22.058	53.31	124.46	230.81	113.43	116.88	1.63725	19.85
13	24.063	54.62	124.17	227.69	113.39	116.82	1.63527	19.31
14	26.068	55.87	123.76	223.11	113.35	116.76	1.63329	18.52
15	28.074	57.07	123.23	217.24	113.32	116.70	1.63131	17.50
16	30.079	58.20	122.56	210.15	113.28	116.63	1.62934	16.28
17	32.084	59.23	121.75	202.01	113.24	116.56	1.62736	14.89
18	34.089	60.17	120.80	193.07	113.21	116.49	1.62538	13.38
19	36.095	61.01	119.69	183.68	113.17	116.42	1.62340	11.82

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

20	38.100	61.76	118.73	176.39	113.13	116.34	1.62143	10.64

6.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	122.31	208.16	113.83	117.43	1.65906	15.95
2	2.005	41.02	123.12	215.94	113.79	117.40	1.65707	17.27
3	4.011	42.13	124.06	225.79	113.76	117.38	1.65508	18.97
4	6.016	43.34	124.83	234.79	113.72	117.35	1.65309	20.55
5	8.021	44.63	125.40	242.15	113.68	117.32	1.65110	21.85
6	10.026	46.00	125.82	248.03	113.65	117.29	1.64911	22.90
7	12.032	47.43	126.13	252.69	113.61	117.25	1.64712	23.74
8	14.037	48.90	126.33	256.16	113.57	117.21	1.64514	24.37
9	16.042	50.41	126.45	258.56	113.54	117.17	1.64315	24.81
10	18.047	51.93	126.50	259.81	113.50	117.12	1.64117	25.04
11	20.053	53.46	126.46	259.77	113.46	117.06	1.63919	25.04
12	22.058	54.99	126.33	258.34	113.43	117.01	1.63721	24.79
13	24.063	56.49	126.07	255.26	113.39	116.95	1.63523	24.24
14	26.068	57.94	125.68	250.30	113.35	116.89	1.63326	23.36
15	28.074	59.33	125.14	243.32	113.32	116.82	1.63128	22.12
16	30.079	60.64	124.46	234.77	113.28	116.75	1.62930	20.61
17	32.084	61.84	123.64	224.84	113.24	116.68	1.62733	18.87
18	34.089	62.94	122.66	213.72	113.21	116.60	1.62536	16.94
19	36.095	63.91	121.54	202.08	113.17	116.52	1.62338	14.94
20	38.100	64.78	120.62	193.26	113.13	116.45	1.62141	13.45

7. ตำแหน่ง B4

7.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	128.10	266.82	113.83	117.25	1.65916	26.10
2	2.005	42.03	128.28	270.78	113.80	117.20	1.65717	26.83
3	4.011	44.18	129.07	284.42	113.76	117.17	1.65519	29.33
4	6.016	46.51	129.74	297.26	113.72	117.14	1.65320	31.71
5	8.021	49.01	130.22	307.85	113.69	117.10	1.65122	33.70
6	10.026	51.65	130.56	315.93	113.65	117.05	1.64924	35.22
7	12.032	54.39	130.76	321.53	113.61	117.00	1.64727	36.29
8	14.037	57.19	130.83	325.00	113.58	116.94	1.64529	36.96
9	16.042	60.02	130.79	326.36	113.54	116.87	1.64332	37.24
10	18.047	62.86	130.66	325.61	113.50	116.80	1.64136	37.12
11	20.053	65.68	130.41	322.60	113.47	116.72	1.63939	36.57
12	22.058	68.43	130.03	316.98	113.43	116.64	1.63743	35.53
13	24.063	71.08	129.53	308.75	113.40	116.56	1.63547	34.00
14	26.068	73.61	128.93	298.21	113.36	116.46	1.63352	32.05
15	28.074	75.97	128.24	286.30	113.32	116.37	1.63156	29.85
16	30.079	78.15	127.47	273.15	113.29	116.27	1.62960	27.44
17	32.084	80.14	126.60	258.91	113.25	116.17	1.62765	24.85
18	34.089	81.93	125.64	243.53	113.21	116.07	1.62570	22.07
19	36.095	83.51	124.66	228.68	113.18	115.96	1.62374	19.41
20	38.100	84.94	124.18	221.80	113.14	115.88	1.62179	18.19

7.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	129.96	297.99	113.83	117.38	1.65913	31.81
2	2.005	42.29	130.13	302.61	113.80	117.34	1.65714	32.69
3	4.011	44.71	130.98	319.45	113.76	117.31	1.65516	35.84
4	6.016	47.36	131.70	335.28	113.72	117.27	1.65317	38.84
5	8.021	50.20	132.20	348.17	113.69	117.24	1.65119	41.31
6	10.026	53.19	132.58	358.41	113.65	117.18	1.64922	43.28
7	12.032	56.31	132.80	365.82	113.61	117.12	1.64724	44.72
8	14.037	59.50	132.89	370.63	113.58	117.06	1.64527	45.67
9	16.042	62.75	132.87	373.07	113.54	116.98	1.64331	46.17
10	18.047	66.02	132.75	373.15	113.50	116.91	1.64134	46.20
11	20.053	69.26	132.49	370.27	113.47	116.82	1.63939	45.67
12	22.058	72.45	132.14	364.45	113.43	116.73	1.63743	44.57
13	24.063	75.54	131.64	355.27	113.40	116.63	1.63548	42.82

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14	26.068	78.48	131.01	343.07	113.36	116.52	1.63352	40.51
15	28.074	81.24	130.28	328.60	113.32	116.41	1.63157	37.78
16	30.079	83.79	129.46	312.24	113.29	116.30	1.62963	34.70
17	32.084	86.12	128.53	294.31	113.25	116.18	1.62768	31.36
18	34.089	88.21	127.51	275.40	113.21	116.05	1.62573	27.87
19	36.095	90.05	126.46	256.91	113.18	115.93	1.62378	24.49
20	38.100	91.72	125.96	248.34	113.14	115.83	1.62184	22.93

7.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	131.75	331.02	113.83	117.50	1.65910	37.98
2	2.005	42.56	131.94	336.96	113.79	117.46	1.65711	39.13
3	4.011	45.27	132.80	356.35	113.76	117.43	1.65513	42.83
4	6.016	48.23	133.54	375.05	113.72	117.40	1.65315	46.44
5	8.021	51.41	134.08	390.50	113.69	117.35	1.65117	49.46
6	10.026	54.76	134.47	402.58	113.65	117.29	1.64919	51.83
7	12.032	58.26	134.69	411.54	113.61	117.23	1.64722	53.62
8	14.037	61.85	134.79	417.67	113.58	117.16	1.64525	54.85
9	16.042	65.50	134.77	421.01	113.54	117.08	1.64329	55.54
10	18.047	69.18	134.62	421.32	113.50	117.00	1.64133	55.63
11	20.053	72.84	134.39	418.65	113.47	116.90	1.63938	55.12
12	22.058	76.44	134.03	412.51	113.43	116.79	1.63743	53.94
13	24.063	79.93	133.51	402.16	113.40	116.68	1.63548	51.93
14	26.068	83.27	132.87	388.04	113.36	116.56	1.63354	49.18
15	28.074	86.40	132.09	370.53	113.32	116.43	1.63159	45.80
16	30.079	89.30	131.20	350.99	113.29	116.29	1.62965	42.05
17	32.084	91.93	130.22	329.60	113.25	116.15	1.62771	37.98
18	34.089	94.29	129.14	306.78	113.21	116.01	1.62577	33.69
19	36.095	96.37	128.04	284.69	113.18	115.86	1.62383	29.57
20	38.100	98.26	127.52	274.55	113.14	115.74	1.62188	27.70

7.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	133.79	372.97	113.83	117.66	1.65906	45.98
2	2.005	42.85	133.98	380.23	113.79	117.61	1.65707	47.40
3	4.011	45.88	134.91	403.90	113.76	117.58	1.65509	52.02
4	6.016	49.19	135.70	426.69	113.72	117.55	1.65311	56.53
5	8.021	52.75	136.31	445.82	113.68	117.50	1.65113	60.35
6	10.026	56.52	136.73	461.09	113.65	117.44	1.64915	63.43
7	12.032	60.46	136.98	472.83	113.61	117.38	1.64718	65.83
8	14.037	64.52	137.11	481.43	113.58	117.30	1.64522	67.59
9	16.042	68.67	137.11	486.88	113.54	117.21	1.64326	68.74
10	18.047	72.87	137.03	489.26	113.50	117.11	1.64131	69.25
11	20.053	77.07	136.84	488.00	113.47	117.00	1.63936	69.02
12	22.058	81.23	136.51	482.53	113.43	116.88	1.63742	67.94
13	24.063	85.29	136.04	471.99	113.40	116.75	1.63548	65.83
14	26.068	89.19	135.40	456.88	113.36	116.60	1.63354	62.80
15	28.074	92.87	134.62	436.83	113.32	116.44	1.63161	58.81
16	30.079	96.29	133.68	412.59	113.29	116.27	1.62968	54.02
17	32.084	99.40	132.61	385.77	113.25	116.10	1.62774	48.77
18	34.089	102.18	131.44	356.86	113.22	115.91	1.62581	43.18
19	36.095	104.63	130.25	329.08	113.18	115.73	1.62388	37.88
20	38.100	106.84	129.68	316.12	113.14	115.57	1.62195	35.42

8. **ตำแหน่ง E7**

8.1 ระดับกำลัง 800 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	124.41	220.18	113.83	117.17	1.65916	17.84
2	2.005	41.40	124.78	224.78	113.80	117.14	1.65717	18.65
3	4.011	42.92	125.77	237.21	113.76	117.11	1.65518	20.83
4	6.016	44.60	126.63	249.08	113.72	117.08	1.65320	22.95
5	8.021	46.44	127.27	259.16	113.69	117.05	1.65121	24.77

6	10.026	48.40	127.73	267.11	113.65	117.02	1.64923	26.22
7	12.032	50.45	128.03	273.11	113.61	116.97	1.64725	27.33
8	14.037	52.58	128.22	277.08	113.58	116.92	1.64527	28.06
9	16.042	54.75	128.27	279.03	113.54	116.87	1.64329	28.43
10	18.047	56.93	128.21	279.09	113.50	116.81	1.64132	28.45
11	20.053	59.10	128.02	277.13	113.47	116.75	1.63935	28.11
12	22.058	61.23	127.72	273.29	113.43	116.68	1.63738	27.42
13	24.063	63.29	127.29	267.17	113.39	116.61	1.63541	26.31
14	26.068	65.26	126.75	259.38	113.36	116.53	1.63344	24.91
15	28.074	67.10	126.11	250.27	113.32	116.46	1.63148	23.27
16	30.079	68.82	125.37	239.96	113.28	116.38	1.62951	21.43
17	32.084	70.38	124.52	228.40	113.25	116.30	1.62755	19.38
18	34.089	71.78	123.55	215.83	113.21	116.21	1.62558	17.17
19	36.095	73.02	122.50	203.25	113.17	116.12	1.62362	14.99
20	38.100	74.12	121.93	196.83	113.14	116.05	1.62165	13.88

8.2 ระดับกำลัง 1,000 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	126.05	241.94	113.83	117.30	1.65913	21.69
2	2.005	41.58	126.43	247.50	113.80	117.27	1.65714	22.69
3	4.011	43.29	127.46	262.40	113.76	117.24	1.65515	25.36
4	6.016	45.18	128.36	276.79	113.72	117.21	1.65317	27.98
5	8.021	47.25	129.04	288.99	113.69	117.18	1.65118	30.23
6	10.026	49.47	129.53	298.93	113.65	117.15	1.64920	32.08
7	12.032	51.80	129.87	306.37	113.61	117.10	1.64722	33.47
8	14.037	54.21	130.08	311.65	113.58	117.04	1.64525	34.47
9	16.042	56.68	130.16	314.61	113.54	116.99	1.64327	35.04
10	18.047	59.17	130.10	315.28	113.50	116.92	1.64130	35.18
11	20.053	61.66	129.93	313.68	113.47	116.86	1.63933	34.90
12	22.058	64.11	129.64	309.64	113.43	116.78	1.63736	34.16
13	24.063	66.49	129.21	303.00	113.39	116.71	1.63540	32.93
14	26.068	68.77	128.65	294.03	113.36	116.62	1.63344	31.28
15	28.074	70.91	127.97	282.72	113.32	116.54	1.63148	29.20
16	30.079	72.90	127.18	269.79	113.28	116.45	1.62952	26.84
17	32.084	74.71	126.28	255.51	113.25	116.35	1.62756	24.25
18	34.089	76.33	125.25	239.98	113.21	116.26	1.62560	21.46
19	36.095	77.76	124.16	224.61	113.18	116.16	1.62363	18.73
20	38.100	79.03	123.57	216.85	113.14	116.08	1.62167	17.36

8.3 ระดับกำลัง 1,200 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	127.61	264.97	113.83	117.42	1.65910	25.83
2	2.005	41.76	128.01	271.68	113.79	117.38	1.65711	27.05
3	4.011	43.67	129.07	288.98	113.76	117.36	1.65513	30.22
4	6.016	45.78	130.01	306.06	113.72	117.33	1.65314	33.38
5	8.021	48.09	130.71	320.38	113.69	117.30	1.65116	36.07
6	10.026	50.56	131.22	332.05	113.65	117.26	1.64918	38.28
7	12.032	53.17	131.59	340.97	113.61	117.21	1.64720	39.99
8	14.037	55.86	131.80	347.15	113.58	117.15	1.64522	41.18
9	16.042	58.62	131.86	350.62	113.54	117.09	1.64325	41.86
10	18.047	61.41	131.80	351.59	113.50	117.02	1.64128	42.06
11	20.053	64.19	131.62	349.89	113.47	116.95	1.63932	41.76
12	22.058	66.94	131.30	345.15	113.43	116.87	1.63735	40.87
13	24.063	69.60	130.84	337.53	113.39	116.79	1.63539	39.44
14	26.068	72.16	130.26	327.03	113.36	116.69	1.63343	37.47
15	28.074	74.56	129.55	313.76	113.32	116.60	1.63148	34.98
16	30.079	76.78	128.72	298.58	113.28	116.50	1.62952	32.16
17	32.084	78.81	127.77	281.80	113.25	116.39	1.62756	29.06
18	34.089	80.63	126.70	263.57	113.21	116.28	1.62561	25.73
19	36.095	82.22	125.57	245.51	113.18	116.18	1.62365	22.46
20	38.100	83.65	124.96	236.21	113.14	116.08	1.62169	20.79

8.4 ระดับกำลัง 1,500 kW

J	X(J)	TCOOLANT	TCLAD	TMEAT	TSAT	TONB	PRESS	HEAT FLUX
1	0.000	40.00	129.37	294.23	113.83	117.57	1.65906	31.19
2	2.005	41.95	129.78	302.12	113.79	117.53	1.65707	32.66
3	4.011	44.07	130.91	323.04	113.76	117.51	1.65508	36.56
4	6.016	46.42	131.90	343.45	113.72	117.48	1.65310	40.42
5	8.021	49.00	132.65	360.98	113.68	117.45	1.65111	43.78
6	10.026	51.76	133.22	375.30	113.65	117.41	1.64913	46.55
7	12.032	54.67	133.62	386.50	113.61	117.35	1.64716	48.73
8	14.037	57.69	133.86	394.59	113.58	117.29	1.64518	50.33
9	16.042	60.79	133.95	399.64	113.54	117.23	1.64321	51.34
10	18.047	63.94	133.91	401.68	113.50	117.15	1.64125	51.75
11	20.053	67.09	133.74	400.70	113.47	117.07	1.63929	51.59
12	22.058	70.21	133.43	396.07	113.43	116.99	1.63733	50.71
13	24.063	73.26	133.01	388.22	113.39	116.89	1.63537	49.19
14	26.068	76.19	132.43	376.46	113.36	116.79	1.63342	46.93
15	28.074	78.96	131.70	361.36	113.32	116.68	1.63147	44.03
16	30.079	81.53	130.81	342.87	113.28	116.56	1.62951	40.51
17	32.084	83.87	129.80	322.00	113.25	116.44	1.62757	36.56
18	34.089	85.97	128.66	299.57	113.21	116.31	1.62562	32.36
19	36.095	87.81	127.45	277.10	113.18	116.19	1.62366	28.21
20	38.100	89.46	126.82	265.88	113.14	116.08	1.62171	26.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนันตชัย เพชรรักษ์ เกิดวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อปีการศึกษา 2543 และได้เข้าศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิต ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่ง ช่างเทคนิคอาวุโส ฝ่ายจัดการเครื่องปฏิกรณ์ กลุ่มปฏิบัติการเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย